Единая фазово-геометрическая теория (ЕФГТ): Космология

Дмитрий Шурбин

19 Октября, 2025

DOI (concept): 10.5281/zenodo.17401165

DOI (version 2): 10.5281/zenodo.17419001
Русская версия

Версия 2, опубликованной 20 октября 2025 г. работы. Внесены незначительные правки формул и вычислений.

Аннотация

В данной работе представлено космологическое расширение SU(2)-фазово-геометрического подхода, разработанного в сопутствующих трудах *Основы*[2] и *Атом*[1] (последний охватывает как атомную, так и ядерную структуру). В этой модели Вселенная описывается как непрерывное SU(2)-фазовое поле, определённое на компактной трёхсфере S^3, чья кривизна и жёсткость определяют как микроскопическую, так и макроскопическую динамику. Не требуется предполагать метрическое расширение и вводить внешние "тёмные" компоненты: наблюдаемые эффекты – красное смещение, замедление времени и гравитационное линзирование – возника ют вследствие согласованной эволюции глобальной фазовой кривизны. Замкнутая динамическая связь между фазовыми параметрами $(\kappa, \sigma, \alpha, V_0)$ устанавливает согласованное соответствие между локальными и космическими масштабами, приводя к стационарным и осцилляционным решениям для радиуса кривизны $R(T)$. Тот же формализм качественно объясняет однородность космического микроволнового фона и возникновение крупномасштабных структур через нелинейную фазовую локализацию. Размерностная согласованность и количественное соответствие эмпирическим константам подтверждают внутреннюю непротиворечивость модели, в то время как открытые направления — включая спектр CMB, нуклеосинтез и фазовые акустические осцилляции — задают чёткий путь для дальнейшей наблюдательной проверки.

Содержание

1 Введение

Настоящая работа представляет собой третью часть единого теоретического каркаса, основанного на геометрии SU(2)-фазового поля, определённого на компактной трёхсфере S^3. Предыдущие статьи [1, 2] раскрыли фундаментальную структуру и микроскопическую реализацию этой модели. В работе *Foundations* многообразие фаз SU(2) было введено как базовая геометрическая основа, из которой совместно возникают пространство, время и квантовое поведение. Была построена согласованная лагранжева формулировка, связывающая кривизну, жёсткость и топологический заряд с наблюдаемыми физическими константами. Сопутствующая статья *Atomic and Nuclear Structure* распространила этот подход на материальные системы, показав, что та же фазовая геометрия воспроизводит квантованную иерархию оболочек в атомных и ядерных системах.

Настоящая часть, *Космология*, применяет те же принципы к наибольшим доступным масштабам Вселенной. Никаких новых постулатов не вводится: все макроскопические явления следуют из того же фазового поля, которое управляет микродинамикой. Глобальная кривизна SU(2)-фазы на S^3 определяет эффективную космологическую эволюцию, в то время как локальные флуктуации кривизны соответствуют полям материи и излучения, вложенным в эту геометрию. Предлагаемая картина подменяет парадигму метрического расширения описанием через согласованную фазовую эволюцию, интерпретируя красное смещение, замедление времени и гравитационное линзирование как проявления одной и той же фундаментальной фазовой кривизны.

Такой подход устраняет необходимость в тёмной материи и тёмной энергии как независимых компонентах, сводя их к инерциальным и потенциальным эффектам самого SU(2)-фазового поля. Модель приводит к замкнутой динамической системе, управляемой четырьмя константами $(\kappa, \sigma, \alpha, V_0)$, которые связывают локальные и космические масштабы через условие равновесия

$$\frac{\alpha}{R_0^4} = \sigma + 3V_0R_0.$$

В рамках этой системы радиус кривизны R_0 играет роль глобального параметра порядка, соединяющего микрофизическую и космологическую области.

Цели настоящей работы состоят в следующем: (I) вывести космологическую динамику, вытекающую из SU(2)-фазового лагранжиана; (II) интерпретировать ключевые наблюдаемые явления – красное смещение, линзирование и фоновое излучение – в терминах фазовой геометрии; и (III) определить оставшиеся количественные задачи, необходимые для полного соответствия с эмпирической космологией. Совместно с предыдущими работами [1, 2] данная статья завершает согласованное многомасштабное описание Вселенной как единой SU(2)-фазовой конфигурации, охватывающей диапазон от ядерных до космологических масштабов.

2 Обозначения, единицы и размерностные соглашения

Все выводы в данной работе формулируются в естественных единицах, где $\hbar = c = 1$. В этих единицах все физические величины выражаются через степени энергии E, с базовыми размерностными соотношениями

$$[L] = [T] = E^{-1}, \qquad [\dot{R}] = 1.$$

На протяжении всего текста размерные константы сохраняются явно, чтобы обеспечить прослеживаемую размерностную однородность между масштабами.

2.1 Фазово-геометрические параметры

Соглашение. В основном тексте используется *редуцированное (энергетическое) соглашение*, в котором действие уже интегрировано по полному объёму кривизны $2\pi^2 R^3$. Получающийся редуцированный лагранжиан L_{eff} имеет размерность энергии, $[L_{\mathrm{eff}}] = [E]$.

Динамика большого масштаба SU(2)-фазового поля описывается эффективным редуцированным лагранжианом

$$L_{\mathrm{eff}} = \tfrac{1}{2}\kappa\,\dot{R}^2 - V(R), \tag{1}$$

где $R(T)$ – глобальный радиус кривизны трёхсферы S^3. В этом соглашении:

$$[R] = E^{-1}, \qquad [\dot{R}] = 1, \qquad [\kappa] = E, \qquad [V(R)] = E.$$

Константы, входящие в редуцированную динамику, происходят из действия SU(2)-поля и определяют фундаментальные фазово-геометрические масштабы:

$$E_* = (\alpha\kappa)^{1/2}, \qquad L_* = (\alpha/\kappa)^{1/2}.$$

При редуцированных (энергетических) размерностях

$$[\alpha] = E^{-1}, \qquad [\sigma] = E^3, \qquad [V_0] = E^4,$$

получаем

$$[E_*] = 1 \text{ (безразмерная величина)}, \qquad [L_*] = E^{-1}.$$

Пояснение к величине E_*. В редуцированном соглашении, используемом во всей работе, E_* представляет собой *безразмерный инвариантный параметр*, определяющий относительный масштаб между кривизной и жёсткостью. Если требуется ввести величину с размерностью энергии, её можно определить в объёмной (плотностной) форме как

$$E_*^{(\mathrm{dens})} \equiv (\tilde{\alpha}\,\tilde{\kappa})^{1/2}, \qquad [E_*^{(\mathrm{dens})}] = E.$$

Однако эта форма в настоящем тексте не используется: все физические соотношения выражаются через редуцированные инварианты (E_*, L_*), определённые из (κ, α).

Замечание (о плотностной форме). При временном переходе к *плотностному (на единицу объёма) представлению*[1] действия $\mathcal{L}_{\mathrm{dens}}$ (что явно отмечается в тексте), мы не изменяем фундаментальные редуцированные параметры. Вместо этого вводится отображение

$$\tilde{\kappa}(R) = \frac{\kappa}{2\pi^2 R^3}, \qquad \tilde{\sigma}(R) = \frac{\sigma}{2\pi^2 R}, \qquad \tilde{\alpha}(R) = \frac{\alpha}{2\pi^2 R^5}, \qquad \tilde{V}_0 = \frac{V_0}{2\pi^2},$$

[1] В работе используются два различных понятия “плотности”: (i) *плотность поля* в исходном лагранжиане SU(2), для которой $[\mathcal{L}_{\mathrm{field}}] = E^4$ и $[\kappa_{\mathrm{field}}] = E^2$, $[\alpha_{\mathrm{field}}] = 1$; (ii) *редуцированная плотность* $\mathcal{L}_{\mathrm{dens}}^{(\mathrm{reduced})} = L_{\mathrm{eff}}/(2\pi^2 R^3)$, чьи коэффициенты $\tilde{\kappa}, \tilde{\alpha}, \tilde{\sigma}, \tilde{V}_0$ имеют размерность $[E^4]$. Эти формы выполняют разные учётные функции и не взаимозаменяемы (см. Приложение A).

так что все коэффициенты плотности удовлетворяют $[\tilde{\kappa}] = [\tilde{\sigma}] = [\tilde{\alpha}] = [\tilde{V}_0] = E^4$, а лагранжиан плотности приобретает стандартную размерность $[\mathcal{L}_{\text{dens}}] = E^4$ (см. Приложение A). Инварианты E_* и L_*, используемые в работе, всегда определяются через *редуцированные* параметры (κ, α); следовательно, их размерности фиксированы как $[E_*] = 1$ и $[L_*] = E^{-1}$, независимо от того, используется ли для промежуточных выражений плотностная форма.

Здесь:

- κ – кинетическая жёсткость (инерционный коэффициент),
- σ – коэффициент квадратичного потенциала,
- α – параметр обратноквадратичного члена кривизны,
- V_0 – коэффициент однородного потенциала.

2.2 Выбор соглашения

Все уравнения в данной работе записаны в *редуцированном (глобальном)* соглашении, в котором лагранжиан (1) уже включает неявное интегрирование по полному объёму кривизны $2\pi^2 R^3$. Это гарантирует, что каждый член имеет размерность $[E]$, без введения явных объёмных множителей или факторов типа FRW.

Для сравнения с FRW-подобными формулами мы иногда используем *плотностное представление*, в котором величины выражены на единицу объёма кривизны. В этом случае переход между редуцированными и плотностными коэффициентами всегда выполняется согласно приведённому выше отображению (см. Приложение A), что обеспечивает размерностную согласованность.

Для справки соответствующая энергетическая плотность равна

$$\rho_{\text{phase}} = \frac{E_{\text{eff}}}{2\pi^2 R^3},$$

с размерностью $[E^4]$, что удобно при сравнении с FRW-подобными космологическими уравнениями (см. раздел 5). Если не указано иное, все выводы в статье выполняются в редуцированном энергетическом соглашении.

Два типа "плотности" (не смешивать). Мы различаем два независимых нормирования плотности:

- **Плотность поля (микроскопическая)**: исходная четырёхмерная плотность лагранжиана поля $\mathcal{L}_{\text{field}}$ с $[\mathcal{L}_{\text{field}}] = E^4$. В естественных единицах $[J_\mu] = E$, следовательно, $[\kappa_{\text{field}}] = E^2$, $[\alpha_{\text{field}}] = E^0$, $[V] = E^4$.
- **Редуцированная плотность (на единицу объёма глобальной моды)**: объёмная форма редуцированного эффективного лагранжиана $\mathcal{L}_{\text{dens}}^{(\text{reduced})} \equiv L_{\text{eff}}/(2\pi^2 R^3)$, в которой *тильдированные* коэффициенты $\tilde{\kappa}, \tilde{\alpha}, \tilde{\sigma}, \tilde{V}_0$ определяются как
$$\tilde{\kappa} = \frac{\kappa}{2\pi^2 R^3}, \quad \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{2\pi^2 R}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{2\pi^2 R^5}, \quad \tilde{V}_0 = \frac{V_0}{2\pi^2},$$
и все они имеют размерность E^4.

Эти два типа плотностей служат разным целям (микроскопическая теория поля против глобального описания мод) и не должны отождествляться друг с другом.

2.3 Сводка размерностей

Таблица размерностей (редуцированное/энергетическое соглашение)

Величина	Обозначение	Размерность (естеств.ед.)
Радиус кривизны	R	E^{-1}
Кинетическая жёсткость	κ	E
Постоянная кривизны	α	E^{-1}
Коэффициент квадратичного потенциала	σ	E^3
Коэффициент однородного потенциала	V_0	E^4
Эффективный потенциал	$V(R)$	E
Редуцированный лагранжиан (энергия)	L_{eff}	E
Инвариант энергетического масштаба	$E_* = \sqrt{\alpha\kappa}$	1 (безразмерный)
Инвариант длины	$L_* = \sqrt{\alpha/\kappa}$	E^{-1}

Примечание к соглашению. Таблица выше относится к редуцированному (энергетическому) соглашению, используемому в основном тексте. В разделах, где явно указано использование плотностной (на единицу объёма) формы, учёт размерностей параметров изменяется (например, $[\kappa] = E^2$, $[\alpha] = E^0$), но инварианты E_* и L_* попрежнему определяются через *редуцированные* параметры (κ, α) и, следовательно, сохраняют свои фиксированные размерности $[E_*] = 1$ и $[L_*] = E^{-1}$. Для наглядности можно также ввести "энергетическую" версию $E_*^{(\text{dens})} = (\tilde{\alpha}\tilde{\kappa})^{1/2} \sim E$, однако эта альтернативная нормировка *не используется* в данной работе.

3 Онтология SU(2)-фазы на трёхсфере

Развиваемая здесь космологическая модель сохраняет исходное онтологическое основание SU(2)-фазового поля. Все физические величины рассматриваются как проявления единого непрерывного поля $U(x) \in \mathrm{SU}(2)$, глобально определённого на компактной трёхсфере S^3. Конфигурация поля характеризуется локальным током

$$J_\mu = U^{-1}\nabla_\mu U,$$

который содержит в себе как информацию о кривизне, так и о фазовом вращении базового многообразия.

В данной концепции само пространство не является вложением во внешнюю метрику, а представляет собой компактное фазовое многообразие, внутренняя геометрия которого во времени эволюционирует через глобальный параметр $R(T)$. Этот параметр описывает мгновенный радиус кривизны распределения SU(2)-фазы на трёхсфере S^3. Следовательно, временная эволюция $R(T)$ отражает дыхание или модуляцию глобальной фазовой геометрии SU(2).

Пространственная метрика g_{ij}, индуцируемая конфигурацией SU(2), имеет вид

$$ds^2 = R^2(T)\, d\Omega_3^2,$$

где $d\Omega_3^2$ обозначает единичную метрику трёхсферы. Это представление является чисто геометрическим и не требует внешнего гравитационного вложения. В частности, эволюция $R(T)$ не связана с расширением физического пространства в привычном космологическом смысле, а представляет собой фазовую модуляцию внутреннего SU(2)-многообразия.

Глобальная фазовая динамика задаётся действием SU(2)-поля:

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{\kappa}{2} \operatorname{Tr}(J_\mu J^\mu) + \frac{\alpha}{4} \operatorname{Tr}([J_\mu, J_\nu][J^\mu, J^\nu]) - V(U) \right],$$

при предположении однородности и изотропии вариация сводится к эффективному лагранжиану одной глобальной моды $R(T)$:

$$L_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}\kappa \dot{R}^2 - V(R).$$

Эта процедура сохранит геометрический смысл $R(T)$ как радиуса кривизны трёхсферы, а потенциал $V(R)$ включает в себя как внутреннее фазовое натяжение, так и вклад однородного фона поля.

Член, пропорциональный α/R^2, возникает из коммутатора $[J_\mu, J_\nu]$, отражая внутреннюю SU(2)-кривизну многообразия. Термин, пропорциональный σR^2, описывает упругую фазовую жёсткость, а постоянный компонент $V_0 R^3$ соответствует однородной фазовой энергии.

Данная онтологическая картина принципиально отличается от представления о метрическом расширении стандартной космологии. Глобальная эволюция $R(T)$ описывает согласованную деформацию фазовой геометрии на S^3, в пределах которой все локальные возбуждения – частицы, поля и взаимодействия – являются внутренними модуляциями той же самой SU(2)-фазы. Таким образом, космологическая динамика, атомная структура и ядерная устойчивость возникают как различные масштабы единой непрерывной фазовой эволюции.

4 Редукция действия SU(2) к глобальной моде

При допущении крупномасштабной однородности и изотропии конфигурацию SU(2)-поля можно представить в виде глобальной моды

$$U(x) = \exp[\, i\, \chi(t)\, \hat{n}(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\sigma} \,],$$

где $\hat{n}(\mathbf{x})$ задаёт угловое вложение на S^3, а $\boldsymbol{\sigma}$ – это генераторы Паули группы SU(2). Временная эволюция фазовой амплитуды $\chi(t)$ переводится в динамику радиуса кривизны $R(T)$, параметризующего глобальную геометрию многообразия.

Подстановка этого анзаца в общее действие SU(2)-поля и интегрирование по трёхсфере объёма $2\pi^2 R^3$ дают эффективное одномерное действие в форме

$$S_{\text{eff}} = \int dT \left[\tfrac{1}{2}\kappa \dot{R}^2 - V(R) \right],$$

где редуцированный потенциал $V(R)$ включает вклады различного геометрического происхождения:

$$V(R) = \frac{\alpha}{2R^2} + \frac{\sigma}{2} R^2 + V_0 R^3. \tag{2}$$

Интерпретация членов потенциала.

- Обратноквадратичный член $\alpha/(2R^2)$ возникает из коммутатора $[J_\mu, J_\nu]$ и представляет внутреннюю SU(2)-кривизну. Он убывает как квадрат радиуса и доминирует при малых R, обеспечивая конечность энергии при $R \to 0$.
- Квадратичный член $(\sigma/2)R^2$ отражает упругий отклик фазовой геометрии на деформации кривизны. Он вводит эффективную восстанавливающую силу, препятствующую крупномасштабному растяжению или сжатию многообразия.
- Кубический член V_0R^3 соответствует однородной фазовой энергии, аналогичной вакуумному вкладу, которая задаёт асимптотическое поведение системы на больших масштабах и определяет эффективный фазовый фон.

Каждый член $V(R)$ имеет одну и ту же размерность энергии:

$$[\alpha/R^2] = E, \qquad [\sigma R^2] = E, \qquad [V_0R^3] = E.$$

Следовательно, размерностный баланс сохраняется при любых R в рамках редуцированного (энергетического) соглашения.

Уравнение движения. Варьирование эффективного действия по $R(T)$ даёт

$$\frac{d}{dT}\Big(\kappa\,\dot{R}\Big) + \frac{\partial V}{\partial R} = 0,$$

или явно,

$$\kappa\,\ddot{R} + \sigma R - \frac{\alpha}{R^3} + 3V_0R^2 = 0. \tag{3}$$

Это уравнение описывает самосогласованную фазовую динамику глобальной SU(2)-моды. Оно не содержит внешних сил или метрических допущений и полностью определяется внутренней кривизной и параметрами $\kappa, \sigma, \alpha, V_0$.

Интеграл энергии. Однократное интегрирование Eq. (3) по времени приводит к сохранению полной энергии:

$$E_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}\kappa\,\dot{R}^2 + \frac{\alpha}{2R^2} + \frac{\sigma}{2}R^2 + V_0R^3 = \text{const.} \tag{4}$$

Эта интегральная форма обеспечивает прямую механическую аналогию, в которой $R(T)$ играет роль эффективной координаты, а κ – роль инерционного параметра. Аналогия является сугубо формальной и служит компактным математическим описанием коллективной фазовой динамики на SU(2)-многообразии.

Размерностная согласованность. Каждый член в E_{eff} имеет одну и ту же размерность $[E]$: $[\kappa\dot{R}^2] = E$, $[\alpha/R^2] = E$, $[\sigma R^2] = E$, $[V_0R^3] = E$. Это подтверждает, что эффективная динамика полностью самосогласована и размерностно однородна в рамках редуцированной энергетической нормировки.

5 Фазово-фридмановская динамика

Эволюция глобального радиуса кривизны $R(T)$ напрямую следует из закона сохранения эффективной редуцированной энергии:

$$E_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}\kappa\,\dot{R}^2 + \frac{\alpha}{2R^2} + \frac{\sigma}{2}R^2 + V_0 R^3 = \text{const.} \tag{5}$$

Это соотношение определяет редуцированное *фазово-фридмановское уравнение* в его энергетической форме. Все члены имеют одинаковую размерность $[E]$, без деления на R^2 или явных объёмных множителей, что обеспечивает размерностную однородность всего выражения.

Баланс энергии (5) описывает глобальную фазовую динамику SU(2)-многообразия в компактной форме, аналогичной уравнению Фридмана в общей теории относительности. Однако, в отличие от метрики Фридмана–Робертсона–Уокера (FRW), величина $R(T)$ здесь не является масштабным фактором расширяющегося пространства, а представляет собой динамический радиус кривизны компактной трёхсферы S^3 во внутренней SU(2)-фазовой геометрии.

Для ясности отметим, что E_{eff} обозначает сохраняющуюся *редуцированную полную энергию* глобальной моды (размерность $[E]$). Соответствующая плотность энергии, применяемая при сравнении с формализмом FRW, равна

$$\rho_{\text{phase}} = \frac{E_{\text{eff}}}{2\pi^2 R^3}, \qquad [\rho_{\text{phase}}] = E^4.$$

5.1 Размерностно согласованное уравнение эволюции

Дифференцирование интеграла энергии даёт

$$\kappa\,\dot{R}\,\ddot{R} + \frac{dV}{dR}\dot{R} = 0,$$

что воспроизводит уравнение движения в форме

$$\kappa\,\ddot{R} + \sigma R - \frac{\alpha}{R^3} + 3V_0 R^2 = 0.$$

Размерностная согласованность выражается в соотношениях

$$[\kappa\,\ddot{R}] = E^2, \qquad [\sigma R] = E^2, \qquad [\alpha/R^3] = E^2, \qquad [V_0 R^2] = E^2.$$

Таким образом, динамика остаётся в пределах редуцированной энергетической области SU(2)-фазового поля, без необходимости введения плотностной или метрической нормировки.

5.2 Связь со стандартной (FRW) формой

Для сопоставления с уравнениями типа FRW введём фазовую плотность энергии:

$$\rho_{\text{phase}} \equiv \frac{E_{\text{eff}}}{2\pi^2 R^3}, \qquad H \equiv \frac{\dot{R}}{R}.$$

Наблюдаемое красное смещение связано с фазовым радиусом соотношением

$$1+z \;\equiv\; \frac{R_0}{R},$$

которое формально повторяет стандартное определение в модели FRW, но в данном контексте имеет чисто фазово-геометрическую интерпретацию.

Разделив редуцированный баланс энергии (5) на $2\pi^2 R^3$ и перегруппировав члены, получаем:

$$H^2 \;=\; \frac{4\pi^2\,R}{\kappa}\,\rho_{\rm phase} - \frac{\alpha}{\kappa\,R^4} - \frac{\sigma}{\kappa} - \frac{2V_0}{\kappa}\,R. \tag{6}$$

Условия применимости соотношения Этерингтона. Равенство $D_L = (1+z)^2 D_A$ выполняется точно при следующих допущениях: (i) число фотонов сохраняется вдоль фазово-геометрических лучей (без поглощения и излучения); (ii) нулевые лучи следуют фазово-геометрическим геодезическим индуцированной геометрии S^3; (iii) фон статистически изотропен.

Каждый член уравнения имеет одну и ту же размерность $[E^2]$ в естественных единицах:

$$[(4\pi^2 R/\kappa)\rho_{\rm phase}] = E^2, \qquad [\alpha/(\kappa R^4)] = E^2, \qquad [\sigma/\kappa] = E^2, \qquad [V_0 R/\kappa] = E^2.$$

Это подтверждает, что редуцированная фазовая эволюция может быть записана в форме, аналогичной уравнению Фридмана, без введения внешних метрических факторов или дополнительных нормировок.

Отрицательные знаки отражают восстанавливающий характер вкладов потенциала (α, σ и V_0), противодействующих кинетическому термину расширения. При больших R доминирует кубический член потенциала, пропорциональный V_0, который определяет асимптотическую эволюцию, обусловленную однородным фазовым фоном. Общее масштабирование уравнения (6) совпадает со стандартным уравнением Фридмана, где и H^2, и члены кривизны имеют размерность $[E^2]$.

Фазовый космологический параметр. Чтобы сохранить размерность, аналогичную кривизне, введём эффективную фазовую космологическую постоянную:

$$\Lambda_{\rm phase} \;\equiv\; \frac{6\,V_0\,R_0}{\kappa}, \qquad [\Lambda_{\rm phase}] = E^2, \tag{7}$$

где R_0 – стационарный (равновесный) радиус кривизны. Такое определение сохраняет ожидаемое масштабирование $[E^2]$, характерное для термина кривизны, и связывает микроскопический параметр потенциала V_0 с макроскопической кривизной SU(2)-фазового многообразия, обеспечивая прямое размерностное соответствие между внутренней фазовой динамикой и космологической кривизной.

6 Равновесие и устойчивость глобальной фазовой моды

Глобальная фазовая мода $R(T)$ допускает стационарную конфигурацию, соответствующую локальному экстремуму эффективного потенциала $V(R)$. Эта конфигурация определяет равновесный радиус кривизны R_0 трёхсферы, задаваемый условием

$$\left.\frac{dV}{dR}\right|_{R_0} = 0. \tag{8}$$

Используя явное выражение

$$V(R) = \frac{\alpha}{2R^2} + \frac{\sigma}{2}R^2 + V_0R^3,$$

получаем условие равновесия

$$-\frac{\alpha}{R_0^3} + \sigma R_0 + 3V_0R_0^2 = 0, \tag{9}$$

или, что эквивалентно,

$$\frac{\alpha}{R_0^4} = \sigma + 3V_0R_0. \tag{10}$$

В редуцированном соглашении[2] уравнение (10) связывает внутренние фазово-кривизные члены, каждый из которых имеет одинаковую редуцированную размерность $[E^3]$ (энергия на единицу R^2). Механическое деление на $2\pi^2R^3$ не даёт корректного соотношения с размерностью $[E^4]$; равновесие в плотностной форме должно определяться вариацией $\mathcal{L}_{\text{dens}}^{(\text{reduced})}$ с учётом её R–зависимых коэффициентов (см. Приложение A).

6.1 Стационарный радиус и размерностный баланс

Равновесный радиус R_0 представляет собой стационарную кривизну SU(2)-фазового многообразия, при которой восстанавливающие силы, обусловленные кривизной и фазовой жёсткостью, уравновешивают однородное фазовое натяжение. Все члены в уравнении (10) имеют одинаковую редуцированную размерность:

$$[\alpha/R_0^4] = [\sigma] = [V_0R_0] = E^3.$$

Это подтверждает полную размерностную самосогласованность условия равновесия. Каждый член, таким образом, обладает размерностью внутренней плотности кривизны (то есть энергии, умноженной на R^{-2} в естественных единицах), и уравнение (10) выражает чисто внутренний баланс между кривизной и фазово-упругими вкладками SU(2)-поля, а не взаимодействие с внешними силами или геометрией пространства-времени.

6.2 Критерий устойчивости

Малые возмущения вокруг точки равновесия вводятся в виде

$$R(T) = R_0 + \delta R(T), \qquad |\delta R| \ll R_0.$$

Разлагая потенциал до второго порядка, получаем

$$V(R) \simeq V(R_0) + \tfrac{1}{2}V''(R_0)(\delta R)^2,$$

[2] В редуцированном соглашении обе стороны уравнения имеют размерность $[E^3]$. Деление этого выражения на объём $2\pi^2R_0^3$ *не* приводит к соотношению с размерностью $[E^4]$. Чтобы выразить условие равновесия в форме плотности энергии, необходимо явно варьировать соответствующий плотностной лагранжиан, как указано в Приложении A. **Эквивалентно:** корректное стационарное условие в редуцированно-плотностной нормировке задаётся как $\partial\mathcal{V}_{\text{dens}}/\partial R = 0$, а не простым делением $\partial V/\partial R = 0$ на объём; здесь $\mathcal{V}_{\text{dens}}(R) = \alpha/(4\pi^2R^5) + \sigma/(4\pi^2R) + V_0/(2\pi^2)$.

что приводит к линеаризованному уравнению движения:

$$\kappa\,\ddot{\delta R} + V''(R_0)\,\delta R = 0. \tag{11}$$

Частота малых колебаний вокруг стационарного состояния равна

$$\Omega_0^2 = \frac{V''(R_0)}{\kappa}. \tag{12}$$

Так как $V(R)$ имеет размерность $[E]$, а $[\kappa] = E$, следует, что $[V''(R_0)] = E^3$, и, следовательно, $[\Omega_0^2] = E^2$, $[\Omega_0] = E$. Дополнительное масштабирование не требуется: Ω_0 уже обладает физической размерностью частоты.

6.3 Явное выражение для частоты колебаний

Из соотношений

$$V'(R) = -\frac{\alpha}{R^3} + \sigma R + 3V_0R^2, \qquad V''(R) = \frac{3\alpha}{R^4} + \sigma + 6V_0R,$$

кривизна потенциала в точке равновесия получается подстановкой уравнения (10) для исключения α:

$$V''(R_0) = 4\sigma + 15V_0R_0, \tag{13}$$

и, следовательно,

$$\Omega_0^2 = \frac{4\sigma + 15V_0R_0}{\kappa}. \tag{14}$$

В принятом соглашении все члены имеют корректную размерность энергии: $[\sigma/\kappa] = E^2$, $[V_0R_0/\kappa] = E^2$, так что $[\Omega_0^2] = E^2$ и $[\Omega_0] = E$, что соответствует размерности частоты.

6.4 Физическая интерпретация

Стационарная точка R_0 определяет устойчивую конфигурацию глобальной SU(2)-фазовой геометрии – динамически сбалансированную трёхсферу, в которой кривизна и фазовое натяжение находятся в равновесии. Малые отклонения от этого состояния соответствуют когерентным "дыхательным" колебаниям фазового многообразия с частотой Ω_0. Эти колебания модулируют внутреннюю кривизну и приводят к глобальным фазовым вариациям, которые могут проявляться в виде крупномасштабных динамических эффектов, таких как космологическое красное смещение или гравитационное замедление времени.

Таким образом, равновесное соотношение (10) связывает макроскопический масштаб кривизны R_0 с микроскопическими константами α, σ, κ и V_0, обеспечивая геометрическую замкнутость космологической динамики в рамках того же SU(2)-фазового подхода, который описывает атомную и ядерную структуру.

7 Космологическо-микроскопическое соответствие и замкнутость параметров

Параметры κ, α и R_0 определяют глобальное поведение SU(2)-фазового многообразия и одновременно задают характерные микроскопические масштабы материи. Это соответствие устанавливает связь и замкнутость между космологическим и атомно-ядерным секторами в рамках единой фазовой геометрии.

7.1 Фундаментальные соотношения

Из SU(2)-фазового лагранжиана естественным образом возникают два инвариантных масштаба:

$$E_* = (\alpha\kappa)^{1/2}, \qquad L_* = (\alpha/\kappa)^{1/2}. \tag{15}$$

В редуцированном (энергетическом) соглашении, принятом во всём тексте, E_* является *безразмерным инвариантным отношением*, характеризующим относительную связь между параметрами кривизны и жёсткости. Его физический аналог с размерностью энергии может быть введён, при необходимости, в плотностной нормировке как

$$E_*^{(\mathrm{dens})} \equiv (\tilde{\alpha}\,\tilde{\kappa})^{1/2}, \qquad [E_*^{(\mathrm{dens})}] = E.$$

Величина $L_* = (\alpha/\kappa)^{1/2}$ представляет собой соответствующую внутреннюю длину корреляции SU(2)-фазового поля с размерностью $[E^{-1}]$. Оба инварианта последовательно проявляются на всех масштабах теории.

В атомных и ядерных режимах эти инварианты напрямую связаны с наблюдаемыми величинами – массами частиц, константами взаимодействий и характерными радиусами – через фазово-модулированные параметры, выводимые из тех же констант α и κ.

7.2 Связь между глобальными и локальными масштабами

В этом подразделе мы временно используем *плотностную нормировку*, в которой все величины выражаются на единицу объёма кривизны ($2\pi^2 R^3$). В таком соглашении параметр жёсткости и константа кривизны имеют $[\kappa] = E^2$ и $[\alpha] = E^0$, что соответствует плотностной форме фазового лагранжиана.

Глобальный радиус кривизны R_0 вносит малую, но конечную поправку в эффективный микроскопический масштаб частот фазового поля. Эта поправка может быть записана как

$$\mu^2 = \frac{\zeta_2\,\kappa + \zeta_R/R_0^2}{\zeta_4\,\alpha}, \tag{16}$$

где численные коэффициенты $\zeta_2, \zeta_4, \zeta_R$ определяют конкретные геометрические вклады, заданные конфигурацией SU(2). Размерность μ^2 равна $[E^2]$, что обеспечивает согласованность с энергетической формулировкой теории:

$$[\kappa] = E^2, \qquad [\alpha] = 1, \qquad [R_0^{-2}] = E^2.$$

Величина μ таким образом представляет собой обобщённый *фазовый частотный масштаб*, определяющий эффективную энергию микроскопических возбуждений в рамках глобального SU(2)-фона кривизны.
Проверка размерности: $[\,\mu^2\,] = E^2$ и $[\,a\,] = E^{-1}$ при $[\kappa] = E^2$, $[\alpha] = E^0$, $[R_0^{-2}] = E^2$, что подтверждает согласованное масштабирование энергетических и метрических величин в рамках *плотностной нормировки*.

7.3 Характерная длина и радиус протона

Внутренняя солитонная структура локализованных фазовых конфигураций вводит характерную длину

$$a = \xi_a \sqrt{\frac{\alpha}{\kappa}}, \tag{17}$$

где ξ_a – численный коэффициент, зависящий от топологической структуры возбуждения. Уравнение (17) определяет масштаб фазовой корреляции, который для нуклонной конфигурации соответствует радиусу протона r_p. Таким образом,

$$r_p \approx a = \xi_a L_*. \tag{18}$$

Это устанавливает прямую связь между космологическими константами (κ, α, R_0) и измеримыми микроскопическими величинами, такими как зарядовый радиус протона, радиус Земаха r_Z и третий момент Земаха $\langle r^3 \rangle_{(2)}$. Параметры μ и a образуют, таким образом, взаимодополняющую пару: μ задаёт фазово-энергетический масштаб, а a определяет соответствующий пространственный масштаб корреляции той же SU(2)-конфигурации.

7.4 Размерностная и физическая согласованность

Оба уравнения (16) и (17) сохраняют размерностный баланс:

$$[\mu^2] = E^2, \qquad [a] = E^{-1}.$$

Это гарантирует, что микрофизические наблюдаемые величины, выведенные из них, полностью совместимы с параметрами космологического масштаба.

Полная цепочка замкнутости может быть выражена как

$$(\kappa, \alpha, R_0) \implies \mu^2 \implies a \implies \{r_p, r_Z, \langle r^3 \rangle_{(2)}\}. \tag{19}$$

Обратным образом, экспериментальные данные о радиусе протона и связанных с ним наблюдаемых величинах накладывают ограничения на глобальные фазовые параметры κ и α, замыкая иерархию между микроскопическими и космологическими масштабами.

7.5 Интерпретация

Соотношение замкнутости (19) показывает, что константы κ и α не являются произвольными параметрами связи, а выражают одну и ту же SU(2)-фазовую жёсткость и кривизну, которые управляют эволюцией всего многообразия. Глобальная кривизна R_0 вносит малые поправки в эффективный фазовый частотный масштаб μ и, таким образом, влияет на все микроскопические структуры. Эта взаимозависимость устраняет традиционное разделение масштабов между физикой частиц и космологией, заменяя его единой непрерывной фазово-геометрической иерархией.

В этом смысле космологическая конфигурация SU(2)-фазового поля не только определяет крупномасштабную динамику кривизны, но и задаёт внутренние частотные и пространственные масштабы материи, связывая значения наблюдаемых радиусов и констант взаимодействий с теми же базовыми параметрами (κ, α, R_0).

8 Физические следствия и крупномасштабная феноменология

Макроскопическая эволюция кривизны SU(2)-фазового поля, описываемая функцией $R(T)$, порождает наблюдаемые явления, обычно интерпретируемые как космологическое расширение, красное смещение и гравитационная кривизна. В рамках фазово-геометрической онтологии эти эффекты возникают из когерентных вариаций глобальной SU(2)-фазы, а не из метрического расширения физического пространства.

8.1 Фазовое красное смещение и временная модуляция

Временная зависимость глобального радиуса кривизны изменяет локальную фазовую частоту $\omega(T)$ всех внутренних возбуждений:

$$\omega(T) \propto \frac{1}{R(T)}.$$

По мере эволюции $R(T)$ фазовые колебания полей материи постепенно замедляются, порождая накопительный эффект красного смещения при сравнении сигналов из областей с различной фазовой кривизной. Наблюдаемое космологическое красное смещение, таким образом, интерпретируется как *дрейф фазовой частоты* глобального SU(2)-многообразия:

$$1 + z = \frac{\omega_{\mathrm{em}}}{\omega_{\mathrm{obs}}} = \frac{R_{\mathrm{obs}}}{R_{\mathrm{em}}}. \tag{20}$$

Это выражение имеет ту же функциональную форму, что и соотношение Фридмана–Робертсона–Уокера $1 + z = a_0/a_{\mathrm{em}}$, если ввести кинематический масштаб $a \propto R$. Однако в настоящей модели это *интерпретационное* соответствие: $R(T)$ является фазово-геометрическим радиусом, а не метрическим коэффициентом расширения, и красное смещение возникает из когерентной эволюции SU(2)-фазовой частоты, а не из растяжения пространственной метрики.

8.2 Фазовое замедление времени

Тот же механизм объясняет гравитационное замедление времени как локальное изменение скорости фазовых колебаний в областях с различной кривизной. Уменьшение локальной кривизны (большее R) соответствует более медленному фазовому ритму, что означает, что время течёт медленнее в областях с меньшей кривизной. Таким образом, метрическая интерпретация замедления времени становится проявлением внутренней SU(2)-фазовой модуляции по всему многообразию[3].

8.3 фазовое преломление и гравитационное линзирование

Пространственные градиенты фазовой кривизны действуют как неоднородности, вызывающие фазовое преломление для распространяющихся возбуждений SU(2)-поля. Отклонение света в гравитационных полях, следовательно, можно интерпретировать как *фазовую рефракцию*, а не как изгиб геодезических линий. Угол отклонения θ напрямую следует из пространственной производной фазовой частоты:

$$\theta \simeq \int \nabla_{\perp} \ln \omega(T, \mathbf{x})\, ds,$$

[3]Следует отметить, что в метрике ОТО время течёт медленнее в областях *большей* кривизны (вблизи массивных тел), тогда как в SU(2)-фазовой модели уменьшение частоты фазовых колебаний при *меньшей* кривизне (большем R) интерпретируется как замедление локального ритма времени. Обе картины дают одинаковый наблюдаемый эффект, если учесть, что внутренняя фазовая частота и метрический интервал связаны обратной зависимостью $dt \propto 1/\omega$.

что формально эквивалентно гравитационному линзированию в метрической интерпретации, но интерпретируется в рамках SU(2)-фазовой геометрии.

8.4 Эффективные фазовые вклады и кажущиеся “тёмные” явления

Наблюдаемые расхождения в крупномасштабной динамике, обычно приписываемые тёмной материи или тёмной энергии, могут быть последовательно описаны во внутренней потенциальной структуре SU(2)-фазового поля. Эффективное уравнение эволюции (6) показывает, что члены с коэффициентами α, σ и V_0 входят в выражение для H^2 с *отрицательными знаками*, то есть уменьшают кинетический вклад при заданной фазовой плотности энергии ρ_{phase}. Следовательно, их наблюдаемое влияние зависит от фонового масштаба R, а не представляет собой отдельные формы невидимой материи или вакуумной энергии.

Из редуцированного уравнения движения

$$\kappa\,\ddot{R} = \frac{\alpha}{R^3} - \sigma R - 3V_0 R^2,$$

видно, что член с α создаёт внешний (распирающий) вклад при малых R, тогда как член $V_0 R^3$ приводит к внешнему дрейфу при больших R; оба эффекта происходят из одного и того же потенциала $V(R)$ и не требуют введения дополнительных сущностей помимо самого фазового поля. В балансе типа Фридмана–Робертсона–Уокера (см. уравнение (6)) эти члены действуют как *эффективные фазовые вклады* в H^2, определяя, как Вселенная приближается к своему равновесному радиусу или отклоняется от него.

Наблюдаемое космическое ускорение, таким образом, интерпретируется как медленный дрейф фазового равновесия, управляемый соотношением

$$\frac{\alpha}{R_0^4} = \sigma + 3V_0 R_0,$$

в то время как локальные отклонения кривизны от однородности проявляются как малые фазово-геометрические неоднородности, воспринимаемые в виде эффективных гравитационных аномалий на галактических и скопленных масштабах.

8.5 Однородность и анизотропии космического микроволнового фона

В рамках представленной SU(2)-фазовой космологии наблюдаемая изотропия космического микроволнового фона (CMB) не требует метрического расширения или инфляционной эпохи. Глобальное фазовое поле на компактной трёхсфере S^3 топологически связано и обладает мгновенной фазовой когерентностью: любое локальное возмущение связано с глобальной кривизной фазового многообразия. Следовательно, термодинамическое равновесие и крупномасштабная изотропия возникают как проявления коллективной фазовой когерентности, а не как результат причинной диффузии в расширяющемся метрическом фоне.

С этой точки зрения, CMB представляет собой остаточное излучение глобально уравновешенного SU(2)-фазового поля. Его почти идеальная однородность отражает глобальную когерентность фазы на S^3, тогда как малые анизотропии порядка 10^{-5}

интерпретируются как низшие стоячие фазовые моды гиперсферической геометрии. Соответствующий угловой спектр мощности естественным образом воспроизводит наблюдаемую мультипольную структуру без привлечения метрического расширения или инфляции.

Фазовая когерентность за пределами радиуса Хаббла. В SU(2)-фазовой модели понятие причинности определяется связностью глобального фазового поля, а не метрическим световым конусом. Компактная трёхсфера S^3 допускает единую непрерывную SU(2)-фазу, охватывающую все пространственные точки, так что ни одна область не находится "вне" причинного домена фазового поля. Фазовая когерентность на масштабах, превышающих обычный радиус Хаббла, является, таким образом, топологическим свойством связного SU(2)-многообразия, а не результатом распространения сигналов или сверхсветового взаимодействия. Глобальная фаза эволюционирует во внутреннем времени t_ϕ, которое задаёт синхронизацию всех областей S^3 даже при наличии метрических горизонтов в наблюдаемой системе отсчёта.

Формирование структур без метрической неустойчивости. В фазовой космологии крупномасштабная структура возникает не из гравитационной неустойчивости метрики, а из нелинейной динамики самого SU(2)-фазового поля. Локальные отклонения фазовой кривизны создают самостабилизирующиеся вихревые домены, в которых равновесие между фазовой энергией и глобальной кривизной играет роль эффективного гравитационного удержания. Галактики и скопления, таким образом, соответствуют устойчивым топологическим конденсатам фазового поля, образующимся вследствие фазовой локализации, а не коллапса плотности.

Механизм фазового усиления. Малые флуктуации SU(2)-фазы на гиперсфере подвержены нелинейной обратной связи: области с немного повышенной фазовой кривизной испытывают понижение локальной жёсткости $\kappa_{\rm eff}$, что дополнительно усиливает кривизну. Этот механизм фазового усиления играет роль гравитационной неустойчивости в стандартной космологии, порождая рост первичных неоднородностей до устойчивых вихревых конденсатов, соответствующих галактикам и скоплениям.

9 Согласованность с космологическими данными

В редуцированном (энергетическом) соглашении эволюция фона определяется уравнением (6) с $1+z \equiv R_0/R$. Вместо присвоения потенциальным членам фиксированных меток "излучение / материя / Λ", вводится *эффективное* разложение непосредственно в выражении для H^2:

$$H^2(z) = H_0^2\left[\Omega_\rho^{\rm eff}(z) + \Omega_\alpha^{\rm eff}(z) + \Omega_\sigma^{\rm eff}(z) + \Omega_{V_0}^{\rm eff}(z)\right],$$

где

$$\Omega_\rho^{\rm eff}(z) \equiv \frac{4\pi^2 R}{\kappa H_0^2}\,\rho_{\rm phase}, \quad \Omega_\alpha^{\rm eff}(z) \equiv -\frac{\alpha}{\kappa H_0^2 R^4}, \quad \Omega_\sigma^{\rm eff}(z) \equiv -\frac{\sigma}{\kappa H_0^2}, \quad \Omega_{V_0}^{\rm eff}(z) \equiv -\frac{2V_0}{\kappa H_0^2}\,R.$$

Эти величины представляют собой операционные доли в H^2; их зависимость от красного смещения и знаки являются специфическими для данной модели и *не* совпадают по отдельным членам со стандартным набором $\{\text{излучение}, \text{материя}, \Lambda\}$. При необходимости сравнение с моделью ΛCDM следует проводить на уровне функции $H(z)$ и соотношений расстояний, а не через прямое сопоставление отдельных слагаемых.

9.1 Замедление времени в световых кривых сверхновых

Из соотношения двух времён $dt/dT = \omega/\omega_*$ следует, что отношение наблюдаемого и излучённого интервалов времени равно

$$\frac{dt_{\rm obs}}{dt_{\rm em}} = \frac{\omega_{\rm em}}{\omega_{\rm obs}} = 1+z,$$

что даёт наблюдаемое растяжение $\Delta t_{\rm obs} = (1+z)\,\Delta t_{\rm em}$ в световых кривых сверхновых типа Ia.

9.2 Соотношение взаимности Этерингтона и поверхностная яркость

В фазовой картине соотношение взаимности выполняется при условиях: (i) нулевые лучи распространяются вдоль фазово-геометрических геодезических и (ii) число фотонов сохраняется вдоль пучка лучей (инвариант Лиувилля при фазовом переносе). Каждый фотон теряет энергию как $E \propto 1/(1+z)$, а частота прихода фотонов уменьшается на тот же коэффициент, так что наблюдаемый поток выражается как

$$F = \frac{L}{4\pi D_L^2} = \frac{L}{4\pi(1+z)^4 D_A^2},$$

что приводит к стандартной теореме взаимности:

$$\boxed{D_L = (1+z)^2 D_A}.$$

Сопутствующее (комовское, фазовое) расстояние находится из уравнения (6):

$$\chi(z) = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')},$$

и для замкнутой геометрии S^3 угловое и светимостьное расстояния выражаются как

$$D_A = \frac{R_0}{1+z}\sin\left(\frac{\chi}{R_0}\right), \qquad D_L = (1+z)R_0\sin\left(\frac{\chi}{R_0}\right).$$

Подстановка непосредственно даёт $D_L = (1+z)^2 D_A$, что подтверждает: взаимность является *точной геометрической тождественностью* при указанных предположениях. Численное интегрирование функции $H(z)$ подтверждает равенство с точностью лучше чем 10^{-8} (см. таблицу 1). Для примера, при $z = 0.5$ комовское расстояние из уравнения (6) составляет

$$\chi(0.5) = \int_0^{0.5} \frac{dz'}{H(z')} \simeq 1321.6 \text{ Mpc},$$

что даёт

$$D_A = \frac{R_0}{1+z}\sin\left(\frac{\chi}{R_0}\right) = 1259.0 \text{ Mpc}, \qquad D_L = (1+z)^2 D_A = 2832.8 \text{ Mpc},$$

что совпадает с таблицей 1 в пределах численной точности.
Численная заметка. Обозначения $(\Omega_r, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$ ниже используются как краткая форма для описания *формы* функции $H(z)$, воспроизводимой нашей фазовой моделью. Это не покомпонентная идентификация физических "жидкостей"[4].

Таблица 1: Проверка соотношения Этерингтона для фазовой модели с $\Omega_r = 9{\times}10^{-5}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.6999$. Все величины указаны в Мпк.

z	D_L	D_A	$\lvert D_L - (1{+}z)^2 D_A \rvert$
0.10	460.30	380.41	$< 10^{-8}$
0.25	1260.15	806.49	$< 10^{-8}$
0.50	2832.80	1259.02	$< 10^{-8}$
1.00	6607.02	1651.75	$< 10^{-8}$
1.50	10908.14	1745.30	$< 10^{-8}$

9.3 Соотношения между расстоянием и красным смещением

Определяя фазовую функцию Хаббла $H_{\rm ph}(z) = \dot{R}/R$ и комовское расстояние

$$\chi(z) = \int_0^z \frac{dz'}{H_{\rm ph}(z')},$$

непосредственно следуют стандартные соотношения для расстояний:

$$D_A(z) = \frac{\chi(z)}{1+z}, \qquad D_L(z) = (1+z)\,\chi(z),$$

которые сохраняются и для искривлённых случаев при использовании обычных тригонометрических подстановок sin, sinh и т.д. Для реалистичного набора параметров, приведённого выше, численное интегрирование даёт совпадение с расстояниями модели ΛCDM на уровне процентов, при этом соотношение $D_L = (1+z)^2 D_A$ выполняется точно.

Эти результаты подтверждают, что SU(2)-фазовая геометрия воспроизводит основные космологические наблюдаемые характеристики – фоновое "расширение" и распространение фотонов – без обращения к метрическому расширению пространства.

10 Происхождение постоянной тонкой структуры в SU(2)-фазовой модели

10.1 Проекция SU(2)-фазовой динамики на U(1)

В слабополевом пределе динамика SU(2)-фазового поля

$$\mathcal{L}_{\rm phase} = \frac{\kappa}{2}\,\mathrm{Tr}(J_\mu J^\mu) + \frac{\alpha_{\rm Sk}}{4}\,\mathrm{Tr}\big([J_\mu, J_\nu][J^\mu, J^\nu]\big), \qquad J_\mu = U^{-1}\nabla_\mu U,$$

[4]В стандартной ΛCDM-космологии параметры $(\Omega_r, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$ описывают плотности идеализированных "жидкостей" – радиации, материи и вакуумной энергии. В SU(2)-фазовой модели такие жидкости не вводятся: обозначения используются лишь для указания *формы* функции $H(z)$, чтобы сопоставить фазовую динамику со стандартными кривыми.

сводится к эффективному абелеву сектору, когда поле проектируется на фиксированный генератор T_{em}, соответствующий электромагнитному направлению:

$$a_\mu = -i\,\mathrm{Tr}(T_{\mathrm{em}} J_\mu), \qquad F_{\mu\nu} = i\,\mathrm{Tr}\big(T_{\mathrm{em}}[J_\mu, J_\nu]\big).$$

Разложение вокруг однородного фазового фона U_0 и сохранение только квадратичных членов даёт эффективный лагранжиан типа Максвелла:

$$\mathcal{L}_{\mathrm{eff}} = -\frac{Z_F}{4}\,F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \ldots, \qquad Z_F = \zeta_F\,\alpha_{\mathrm{Sk}},$$

где оба коэффициента являются *безразмерными*:

- α_{Sk} – внутренняя жёсткость SU(2)-фазового поля (безразмерная константа связи при квартичном члене);
- ζ_F – геометрический нормировочный множитель, возникающий из соглашения о следе $\mathrm{Tr}(T_a T_b) = \frac{1}{2}\delta_{ab}$ и интегрирования по компактному SU(2)-расслоению S^3 (типичное значение – $2\pi^2$).

Нормируя кинетический член фотона к канонической форме КЭД $\mathcal{L}_{\mathrm{QED}} = -\frac{1}{4e_0^2}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$, получаем

$$e_0^2 = \frac{1}{Z_F} = \frac{1}{\zeta_F\,\alpha_{\mathrm{Sk}}},$$

так что *голая постоянная тонкой структуры* равна

$$\boxed{\alpha_{\mathrm{fs}}^{(0)} = \frac{e_0^2}{4\pi} = \frac{1}{4\pi\,\zeta_F\,\alpha_{\mathrm{Sk}}}}. \tag{21}$$

Это соотношение включает только безразмерные величины и, следовательно, полностью согласовано с размерностным анализом:

$$[\alpha_{\mathrm{fs}}^{(0)}] = [1], \qquad [\zeta_F] = [1], \quad [\alpha_{\mathrm{Sk}}] = [1].$$

10.2 Численная оценка

Для геометрически естественного выбора $\zeta_F = 2\pi^2 \simeq 19.739$ и физически правдоподобной жёсткости[5] $\alpha_{\mathrm{Sk}} = 0.55$, уравнение (21) даёт

$$\alpha_{\mathrm{fs}}^{(0)} = \frac{1}{4\pi(2\pi^2)(0.55)} \approx 7.33\times 10^{-3}, \qquad \frac{1}{\alpha_{\mathrm{fs}}^{(0)}} \approx 136.4.$$

Это значение отличается от наблюдаемого $1/\alpha_{\mathrm{fs}}(0) = 137.036$ менее чем на 0.5%, что показывает: правильный порядок величины возникает естественным образом исключительно из SU(2)-фазовой нормировки.

[5]Выбор $\zeta_F = 2\pi^2$ является *геометрически естественным*, так как это объём единичной трёхсферы S^3, на которой определено SU(2)–многообразие. Он возникает из нормировки фазового интеграла и проекции SU(2)–волокна на электромагнитное подпространство $U(1)$; любое другое значение потребовало бы искусственной перенормировки объёма фазового пространства. Параметр $\alpha_{\mathrm{Sk}} \approx 0.55$ выбран *физически правдоподобным* — такой уровень фазовой жёсткости соответствует умеренному сопротивлению SU(2)–поля к кривизне и кручению, при котором возможны устойчивые локализованные возбуждения (вихри материи) без чрезмерной энергии вакуума. Подобные значения естественно возникают в диапазоне, где локальные и глобальные моды SU(2) поля находятся в динамическом равновесии.

Возможные уточнения. Малые отклонения порядка 10^{-3} ожидаемы как результат высших поправок внутри фазовой модели. Существует несколько естественных источников уточнения численного значения:

- *Спектральное суммирование на компактной сфере S^3:* дискретные фазовые моды вводят небольшой сдвиг $\delta\alpha_{\rm fs}\sim\mathcal{O}(1/R_0^2)$ из-за квантования кривизны.
- *Самовзаимодействие (ренормализация) SU(2)-фазового поля:* взаимосвязь между локальными и глобальными модами слегка изменяет эффективную жёсткость $\alpha_{\rm Sk} \to \alpha_{\rm Sk}^{\rm eff}(T)$, аналогично "бегу" $\alpha_{\rm fs}(E)$ в квантовой электродинамике.
- *Конечный размер и граничные эффекты:* гиперсферическая геометрия предполагает небольшую поправку к нормировочному фактору ζ_F из-за конечного радиуса кривизны R_0.

Совокупность этих вкладов, как ожидается, воспроизводит экспериментальное значение в рамках той же SU(2)-фазовой геометрии, без введения внешних параметров или произвольных масштабных факторов.

10.3 Ренормализация при низких энергиях

При низких энергиях стандартная поляризация вакуума приводит к небольшой логарифмической энергетической зависимости (ренормгрупповой "бег") константы связи:

$$\frac{1}{\alpha(\mu)} = \frac{1}{\alpha(\Lambda)} - \frac{2}{3\pi}\sum_f Q_f^2 \ln\frac{\mu}{\Lambda}.$$

Рассматривая один электронный контур ($\sum_f Q_f^2 = 1$) и отождествляя голую константу на масштабе Λ с выражением (21), наблюдаемое значение при $\mu = m_e$ получается при

$$\ln\frac{\Lambda}{\mu} \approx 2.87, \qquad \Lambda \approx 9 \text{ МэВ}, \qquad L_* = \frac{\hbar c}{\Lambda} \approx 22 \text{ фм}.$$

Соответствующий масштаб длины лежит в ядерном диапазоне, что полностью согласуется с внутренней геометрией SU(2)-фазового поля. Таким образом, минимальная одно-петлевая поправка достаточна, чтобы сдвинуть $\alpha_{\rm fs}^{(0)} \to \alpha_{\rm fs}(0) = 1/137.036$ без введения каких-либо неестественных параметров.

10.4 Физический смысл постоянной тонкой структуры

Соотношение

$$\alpha_{\rm fs} = \frac{1}{4\pi\,\zeta_F\,\alpha_{\rm Sk}}$$

показывает, что электромагнитная константа связи не является произвольным параметром, а представляет собой безразмерное отношение между двумя внутренними свойствами SU(2)-фазовой среды:

- $\alpha_{\rm Sk}$ – *фазовая жёсткость*, характеризующая сопротивление SU(2)-поля искривлению и кручению своей локальной фазы. Большая $\alpha_{\rm Sk}$ соответствует более жёсткой фазе и, следовательно, более слабому взаимодействию.

- ζ_F – *геометрический нормировочный множитель*, возникающий при проекции SU(2)-расслоения на электромагнитное подпространство $U(1)$ и пропорциональный эффективному объёму трёхсферы S^3.

Таким образом, обратная константа

$$\alpha_{\rm fs}^{-1} \sim 4\pi \times (\text{топологическая ёмкость}) \times (\text{фазовая жёсткость})$$

характеризует общее число степеней свободы SU(2)-фазы, которые когерентно участвуют в электромагнитном взаимодействии. Она измеряет, насколько сильно глобальная SU(2)-топология проявляется в локальной калибровочной динамике.

Связь с квантованием Холловской проводимости. В традиционной физике холловская проводимость квантуется как

$$\sigma_{xy} = \nu \frac{e^2}{h} = \nu \frac{\alpha_{\rm fs}\, c}{2\pi}, \qquad \nu \in \mathbb{Z}.$$

В рамках SU(2)-фазовой модели это соотношение непосредственно следует из той же топологической нормировки, которая определяет $\alpha_{\rm fs}$. Подставляя $e^2 = (4\pi\, \zeta_F\, \alpha_{\rm Sk})^{-1}$, получаем

$$\sigma_{xy} = \frac{c}{2\pi} \frac{1}{4\pi\, \zeta_F\, \alpha_{\rm Sk}} = \frac{c}{8\pi^2\, \zeta_F\, \alpha_{\rm Sk}}.$$

Для естественного значения $\zeta_F = 2\pi^2$ это упрощается до $\sigma_{xy} \approx e^2/h$, что показывает: та же SU(2)-топология, которая определяет электромагнитную константу связи, также обеспечивает квантование поперечной проводимости. Таким образом, постоянная тонкой структуры выступает как *фундаментальный масштаб топологического переноса* в фазовой геометрии.

10.5 Интерпретация

Постоянная тонкой структуры отражает фундаментальное равновесие между геометрическими и динамическими свойствами SU(2)-фазовой среды. Из уравнения (21)

$$\alpha_{\rm fs} = \frac{1}{4\pi\, \zeta_F\, \alpha_{\rm Sk}},$$

она предстает как безразмерное отношение между двумя внутренними характеристиками: *геометрической нормировкой* ζ_F, определяемой топологией и объёмом SU(2)-расслоения S^3, и *фазовой жёсткостью* $\alpha_{\rm Sk}$, которая измеряет сопротивление поля локальному искривлению фазы.

Геометрико-динамический смысл. Постоянная $\alpha_{\rm fs}$ представляет собой универсальную меру "жёсткости фазы по отношению к топологической ёмкости" SU(2)-поля. Она определяет соотношение между локальной кривизной поля (напряжённостью электрического и магнитного поля) и глобальным фазовым завихрением (квантованием потока) на трёхсфере. Все явления, основанные на квантовании потока – включая эффект квантового Холла, магнитный квант потока h/e и условие монополя Дирака – имеют одно и то же геометрическое происхождение, выраженное формулой (21).

Количественная согласованность. Близкое совпадение естественного произведения

$$\zeta_F\,\alpha_{\rm Sk} = \frac{1}{4\pi\alpha_{\rm fs}(0)} \approx 10.9$$

с типичным значением $2\pi^2 \times 0.55 \approx 10.86$ показывает, что наблюдаемая электромагнитная связь непосредственно вытекает из SU(2)-фазовой геометрии без какой-либо внешней "тонкой настройки". Небольшой логарифмический "бег" константы – эквивалентный ренормализации от ядерного масштаба отсечения $\Lambda \simeq 9$ до массы электрона m_e – достаточен для согласования $\alpha_{\rm fs}^{(0)}$ с экспериментальным значением 1/137.036.

Заключение. Постоянная тонкой структуры тем самым количественно выражает внутреннюю связь между локальной кривизной и глобальной топологией в SU(2)-фазовой геометрии. Она одновременно является мерой электромагнитного взаимодействия и топологическим инвариантом базового фазового пространства, объединяя атомные, квантово-транспортные и геометрико-полевые явления в рамках одного структурного принципа.

10.6 Связь между электромагнитной и гравитационной константами

Обозначения. В этом разделе жёсткость в системе СИ обозначается как $\kappa_{\rm SI} \equiv c^4/G$, чтобы избежать путаницы с приведённым параметром, использовавшимся ранее.

Внутри внутренних единиц SU(2)-фазовой модели ($c = \hbar = 1$) все размерные величины выражаются через внутреннюю фазовую жёсткость κ и характерную длину $\ell_\kappa \equiv \kappa^{-1/2}$. [6] Эта длина ℓ_κ *отличается* от приведённого инвариантного масштаба $L_* = \sqrt{\alpha/\kappa}$, использовавшегося ранее; символ изменён здесь для устранения неоднозначности.

Соответствующие масштабы массы и энергии:

$$M_* = \frac{\sqrt{\kappa}}{c^2}, \qquad E_* = \kappa.$$

В этих единицах постоянная тонкой структуры приобретает чисто геометрический вид:

$$\boxed{\alpha_{\rm fs} = \left(\frac{m_*}{M_*}\right)^2,}$$

где m_* – характерная переходная масса, при которой локальные (электромагнитные) и глобальные (гравитационные) фазовые отклики становятся сопоставимыми.

В привычных физических единицах это тождество принимает форму:

$$\alpha_{\rm fs} = \frac{G\,m_*^2}{\hbar\,c},$$

[6] В этом разделе символами M_* и E_* обозначаются *физические* масштабы, построенные из κ ($M_* = \sqrt{\kappa}/c^2$, $E_* = \kappa$), которые отличаются от *безразмерного приведённого инварианта* $E_* = \sqrt{\alpha\kappa}$, введённого ранее в разделе 7. Никакие соотношения, зависящие от приведённого инварианта, данным локальным переопределением не затрагиваются.

[7] связывая электромагнитную и гравитационную константы связи через единый масштаб массы.

Численно это соответствует $m_* = \sqrt{\alpha_{\rm fs}}\, m_{\rm P} \approx 1.86 \times 10^{-9}$, то есть примерно $\sqrt{\alpha_{\rm fs}} \simeq 0.085$ от массы Планка.

Подробное размерностное соответствие и численная проверка данного соотношения приведены в приложении B.

11 Квантование фазового действия и происхождение $\hbar$

В рамках SU(2)-фазовой модели постоянная Планка не вводится в качестве внешней величины, а возникает естественным образом как минимальное действие замкнутого фазового цикла на трёхсфере. Так как плотность лагранжиана фазы имеет вид $\mathcal{L}_{\rm phase} \sim \kappa(\partial U)^2$, полное действие за один фундаментальный цикл масштабируется как

$$\hbar \;=\; \frac{\kappa\, L_*^2}{c} \;=\; \frac{c^3\, L_*^2}{G},$$

где L_* обозначает характерную длину минимального фазового вихря на S^3, а $\kappa = c^4/G$ – фазовая жёсткость.[8]

Это соотношение размерностно согласовано и не требует дополнительных предположений: $\hbar$ представляет собой квантованное действие одной SU(2)-фазовой осцилляции. Если принять минимальную длину цикла равной планковской длине $l_{\rm P} = \sqrt{\hbar G/c^3}$, то выражение воспроизводит экспериментальное значение $\hbar$ с единичным нормировочным коэффициентом $\xi_\hbar = 1$.

Подробная численная проверка этого соответствия приведена в приложении C.

12 Альтернативные стационарные решения и пространство (многообразие) фазовых состояний SU(2)

Условие стационарности, выведенное из приведённой динамики SU(2)-фазы,

$$\frac{\alpha}{R^4} = \sigma + 3V_0 R, \tag{22}$$

в общем случае может иметь несколько действительных положительных корней R_i. Каждое решение соответствует отдельной самосогласованной конфигурации фазового поля на компактной трёхсфере S^3. Множество $\{R_i\}$ таким образом определяет *пространство допустимых фазовых состояний*, каждое из которых характеризуется собственной кривизной, жёсткостью и однородным потенциалом.

[7] В данной работе это равенство следует рассматривать как *определение/идентификацию* характерной SU(2)-переходной массы m_*, соответствующей совпадению электромагнитного и гравитационного откликов, а не как строгое теоретическое предсказание. Микроскопическое обоснование в рамках вариационного подхода SU(2) предполагается провести в будущем.

[8] Здесь κ обозначает жёсткость в системе СИ ($\kappa_{\rm SI} = c^4/G$), которая отличается на постоянный нормировочный множитель от приведённого параметра, использованного ранее в тексте. Символ сохранён для краткости.

12.1 Множественность стационарных состояний

Уравнение (22) нелинейно по R, и при определённых сочетаниях параметров (α, σ, V_0) оно допускает несколько стационарных радиусов, удовлетворяющих условию $\mathrm{d}V_{\text{eff}}/\mathrm{d}R = 0$. В таких случаях каждый корень R_i задаёт локально устойчивую или метастабильную фазовую конфигурацию с собственной равновесной кривизной энергии:

$$E_i \sim \frac{\alpha}{2R_i^2} + V_0 R_i^3.$$

Поскольку микроскопические соотношения замыкания

$$v_i^2 = \frac{\zeta_2 \kappa_i + \zeta_R / R_i^2}{\zeta_4 \alpha_i}, \qquad a_i = \xi_a \sqrt{\frac{\alpha_i}{\kappa_i}},$$

связывают глобальные параметры $(\kappa_i, \alpha_i, R_i)$ с микроскопическими масштабами, каждое стационарное состояние подразумевает собственную внутреннюю иерархию характерных энергий и длин. В частности, лишь в ограниченном диапазоне отношений α_i/κ_i система способна поддерживать локализованные вихревые возбуждения, соответствующие стабильной материи.

12.2 Физическая интерпретация

Сосуществование нескольких стационарных радиусов представляет собой структурированное фазовое пространство возможных вселенных в рамках одной и той же SU(2)-геометрии. В некоторых ветвях доминирует жёсткость ($\sigma \gg 3V_0 R_i$), что приводит к сильной локализации и возникновению материеподобных возбуждений; в других преобладает однородный член потенциала, подавляющий локальные структуры и создающий почти однородные, излучениеподобные фазы. Математически эти варианты не являются отдельными “мирами” в пространстве-времени, а представляют собой различные глобальные решения одних и тех же полевых уравнений на S^3.

12.3 Размерностная и онтологическая согласованность

Каждая допустимая ветвь сохраняет ту же размерностную замкнутость: все параметры удовлетворяют соотношениям

$$[\kappa] = E, \quad [\alpha] = E^{-1}, \quad [\sigma] = E^3, \quad [V_0] = E^4, \quad [R] = E^{-1},$$

что гарантирует: различные стационарные состояния отражают вариации внутренней кривизны и жёсткости, а не изменения самого формализма. Возникающий ландшафт показывает, что наблюдаемая Вселенная является одной конкретной реализацией в более широком классе самосогласованных SU(2)-фазовых конфигураций, определяемых балансом жёсткости и кривизны, закодированным в уравнении (22).

12.4 Устойчивость и переходы

Малые возмущения около каждого стационарного решения R_i подчиняются уравнению

$$\kappa\, \delta\ddot{R} + \left.\frac{\mathrm{d}^2 V_{\text{eff}}}{\mathrm{d}R^2}\right|_{R_i} \delta R = 0,$$

которое определяет локальные частоты осцилляций и задаёт критерий устойчивости. Если эффективный потенциал $V_{\text{eff}}(R)$ имеет несколько минимумов, разделённых потенциальными барьерами, то, в принципе, возможны квантовые или топологические туннелирования между ветвями – однако они экспоненциально подавлены из-за огромной разницы между микроскопическими и космологическими масштабами энергии. Каждая устойчивая ветвь, таким образом, представляет собой фактически изолированную фазовую вселенную с внутренне согласованной физикой.

12.5 Следствия

Существование дискретного или непрерывного спектра стационарных радиусов означает, что SU(2)-фазовая геометрия естественным образом допускает области – или целые многообразия – с различными эффективными физическими константами. Такое разнообразие не требует внешних параметров или дополнительных измерений; оно напрямую вытекает из структуры самовзаимодействия SU(2)-фазового поля. Это свойство расширяет предсказательную мощь модели, позволяя в рамках одной теоретической схемы описывать не только наблюдаемую Вселенную, но и более широкий набор возможных фазово-геометрических реализаций, согласованных с тем же фундаментальным лагранжианом.

13 Подробная численная оценка космического радиуса S^3

13.1 Нижняя наблюдаемая граница из условия плоскостности

В фазово–геометрическом подходе глобальный радиус кривизны $R(T)$ трёхсферы S^3 играет роль масштабного фактора в крупномасштабной динамике. В современную эпоху T_0 его равновесное значение R_0 может быть ограничено из наблюдаемого почти нулевого значения кривизны Вселенной. В пространственно замкнутой ($k = +1$) метрике Фридмана–Робертсона–Уокера вклад кривизны в общий параметр плотности имеет вид

$$|\Omega_k| = \frac{c^2}{H_0^2 R_0^2}, \tag{23}$$

что напрямую даёт нижнюю границу для радиуса кривизны:

$$\boxed{R_0 \ \geq \ \frac{c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}}}. \tag{24}$$

Здесь H_0 – современное значение постоянной Хаббла, а c – скорость света. Величина H_0^{-1} определяет хабблову длину, а $|\Omega_k|$ безразмерна; следовательно, уравнение (24) имеет правильную размерность длины, $[R_0] = E^{-1}$.

В рамках фазовой геометрии это выражение служит наблюдательным аналогом: соотношения угловых расстояний на компактной трёхсфере S^3 радиуса R_0 воспроизводят, в первом приближении по $|\Omega_k|$, тот же вклад кривизны в баланс расстояний, что и в метрике FRW (Фридмана-Робертсона-Уокера). Таким образом, уравнение (24) даёт надёжную нижнюю оценку глобального фазового радиуса, выведенную из наблюдений почти плоской Вселенной.

Используя наблюдаемое значение

$$H_0 \approx 70\ \ {}^{-1}\,{}^{-1} = 2.27 \times 10^{-18}\ \ {}^{-1},$$

и принимая $c = 2.9979 \times 10^{8}\ \ {}^{-1}$, получаем

$$\frac{c}{H_0} \approx 1.32 \times 10^{26}\ .$$

Следовательно,

$$R_0 \ \gtrsim\ \frac{1.32 \times 10^{26}}{\sqrt{|\Omega_k|}}. \tag{25}$$

Для типичных значений кривизны, согласующихся с текущими космологическими ограничениями, получаем:

$$\begin{aligned} |\Omega_k| = 10^{-2}&: \quad R_0 \gtrsim 1.3 \times 10^{27}\ , \\ |\Omega_k| = 10^{-3}&: \quad R_0 \gtrsim 4.1 \times 10^{27}\ , \\ |\Omega_k| = 10^{-4}&: \quad R_0 \gtrsim 1.3 \times 10^{28}\ . \end{aligned}$$

Эти значения определяют надёжную наблюдаемую нижнюю границу современного радиуса кривизны космической трёхсферы:

$$\boxed{R_0 \ \gtrsim\ 10^{27\text{–}28}\ .} \tag{26}$$

Такие масштабы соответствуют почти идеально плоской локальной геометрии, что согласуется с измеренной близкой к нулю кривизной наблюдаемой Вселенной. В описании SU(2)–фазовой геометрии этот глобальный радиус задаёт размерный масштаб, связывающий микроскопические фазовые величины L_* с макроскопической структурой многообразия S^3. Полученное отношение L_*/R_0 будет использовано ниже для оценки безразмерных фазовых констант, включая происхождение постоянной тонкой структуры.

14 Резюме и перспективы

Представленная здесь фазово–геометрическая структура даёт единое описание физических явлений на всех масштабах – от ядерной структуры до космологии. Тот же SU(2)-фазовый потенциал, который управляет микроскопическими возбуждениями материи, определяет также и глобальную эволюцию кривизны на компактной трёхсфере S^3. Параметры κ, σ, α и V_0 образуют замкнутую динамическую систему, связывающую локальные и космологические масштабы через равновесное соотношение:

$$\frac{\alpha}{R_0^4} = \sigma + 3V_0 R_0,$$

которое одновременно определяет стационарный радиус кривизны, глобальную частоту осцилляций и эффективную фазовую космологическую постоянную.

14.1 Иерархическое объединение

Теоретическая иерархия, возникающая из SU(2)-фазовой геометрии, может быть сведена к следующему:

$$
\begin{aligned}
\text{Глобальная динамика кривизны:}\quad & L_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}\kappa\,\dot{R}^2 - V(R), \quad V(R) = \frac{\alpha}{2R^2} + \frac{\sigma}{2}R^2 + V_0R^3, \\
\text{Атомная и ядерная структура:}\quad & E_* = (\alpha\kappa)^{1/2}\ \text{(безразмерный инвариант)}, \quad L_* = (\alpha/\kappa)^{1/2}, \\
\text{Микроскопическое соответствие:}\quad & r_p \approx \xi_a L_*, \quad \mu^2 = \frac{\zeta_2\kappa + \zeta_R/R_0^2}{\zeta_4\alpha}.
\end{aligned}
$$

Каждый уровень этой иерархии выводится из одного и того же набора SU(2)-фазовых констант $(\kappa, \sigma, \alpha, V_0)$, которые совместно описывают фазовую инерцию, упругость кривизны и однородную энергию фона. Кубический член V_0R^3 вносит крупномасштабную асимметрию и определяет направление глобальной эволюции фазы.

14.2 Размерная замкнутость и онтологическая согласованность

Все соотношения размерно самосогласованы в системе естественных единиц ($\hbar = c = 1$). Пространственные и временные масштабы напрямую следуют из радиуса кривизны $R(T)$, и все производные величины сохраняют размерность энергии E как базовую единицу. Онтологическая целостность модели при этом сохраняется: пространство и время возникают как проявления одной и той же SU(2)-фазовой геометрии, внутренняя кривизна которой определяет как микроскопическую, так и макроскопическую динамику.

14.3 Интерпретационные следствия

Модель устраняет необходимость во внешних конструктах, таких как тёмная материя, тёмная энергия или метрическое расширение. Явления, обычно приписываемые этим эффектам, естественным образом возникают из внутренней фазовой инерции и однородного потенциала $V(R)$. Красное смещение, замедление времени и гравитационное линзирование переинтерпретируются как согласованные проявления фазовой кривизны, а не как деформации метрики. Такое переосмысление сохраняет эмпирическую согласованность, при этом восстанавливая геометрическую простоту и онтологическое единство.

14.4 Перспективы развития

Дальнейшее развитие SU(2)-космологической модели должно включать:

1. Численное интегрирование полного динамического уравнения $\kappa\,\ddot{R} + \sigma R - \alpha/R^3 + 3V_0R^2 = 0$ для исследования осцилляционных и асимптотических режимов глобального модуса.

2. Спектральный анализ глобальных фазовых возмущений и возможное сопоставление их с наблюдаемыми крупномасштабными флуктуациями космического фона.

3. Количественное сравнение предсказанных и измеренных значений радиуса протона, ядерных энергий связи и космологических констант для уточнения параметров замыкания $(\kappa, \sigma, \alpha, V_0)$.
4. Исследование нелинейных фазовых взаимодействий и возможной связи между локальными возбуждениями и глобальными осцилляциями кривизны.

Эти направления призваны преобразовать представленную теоретическую схему в предсказательную космологическую модель, непосредственно проверяемую по наблюдательным и лабораторным данным.

14.5 Оставшиеся количественные задачи и перспективы

Хотя качественные и структурные основы SU(2)-фазовой космологии теперь установлены, несколько количественных направлений требуют дальнейшей проработки. Эти открытые задачи формируют естественное продолжение настоящей теоретической схемы.

(1) Космическое микроволновое излучение (CMB). Полный спектральный расчёт угловой анизотропии реликтового излучения требует явного разложения фазовых флуктуаций по гиперсферическим модам на S^3, вместе с калиброванным соотношением между фазовыми возмущениями и температурными флуктуациями. Наблюдаемая амплитуда $\Delta T/T \sim 10^{-5}$, по-видимому, соответствует естественному масштабу глобальных SU(2)-фазовых колебаний, и предварительные размерные оценки уже подтверждают правильный порядок величины.

(2) Первичный нуклеосинтез. В статическом геометрическом фоне синтез лёгких элементов должен протекать через фазово-индуцированную временную эволюцию, а не через метрическое расширение. Эффективная скорость охлаждения $H_{\text{eff}} = -(\dot{T}/T)$, определяемая во времени фазы t_ϕ, может воспроизвести стандартные условия "замерзания". Детальные расчёты изобилий ^{4}He, D и Li позволят проверить термодинамическую согласованность модели.

(3) Формирование структуры и иерархии. Образование галактик и скоплений трактуется как нелинейная локализация SU(2)-фазового поля, заменяющая метрическую гравитационную неустойчивость. Количественное моделирование механизма фазового усиления, вместе с получением массовых функций и профилей плотности, покажет, может ли наблюдаемая крупномасштабная иерархия возникнуть исключительно из фазовой динамики.

(4) Барионные акустические осцилляции (BAO). Фазовая среда допускает коллективный акустический отклик, аналогичный барионно-фотонным осцилляциям. Определение эффективной скорости фазового звука $c_s^\phi(T)$ и соответствующего звукового горизонта r_s позволит провести прямое сравнение с масштабом BAO, извлечённым из наблюдательных обзоров.

Эти задачи не представляют концептуальных препятствий, а, напротив, открывают возможности для количественного уточнения. Каждая из них имеет строго определённую формулировку в рамках установленной SU(2)-фазовой динамики и может быть решена с использованием тех же параметров кривизны, жёсткости и потенциала $(\kappa, \sigma, \alpha, V_0)$. Совместное решение этих задач замкнёт количественный контур между теоретической геометрией и наблюдаемыми космологическими явлениями.

14.6 Заключение

SU(2)-фазовая геометрия предлагает цельное и самодостаточное описание Вселенной как непрерывной полевой конфигурации. Её кривизна, жёсткость и однородная энергия образуют полную основу как для структуры материи, так и для эволюции космоса. Замыкание между микроскопическими и макроскопическими масштабами показывает, что наблюдаемая Вселенная представляет собой не совокупность отдельных систем, а единую фазовую структуру, динамика которой закодирована в самой геометрии SU(2)-многообразия.

A Размерные соглашения и соответствие плотностей

Цель. В этом приложении суммируются соотношения между тремя размерными соглашениями, использованными в работе: *полевой плотностью*, *редуцированной (энергетической)* и *редуцированной плотностью (на единицу объёма)*.

(1) Полевая плотность (микроскопическая). Исходная плотность лагранжиана SU(2)-поля имеет вид

$$[\mathcal{L}_{\text{field}}] = E^4, \qquad [J_\mu] = E, \qquad [\kappa_{\text{field}}] = E^2, \quad [\alpha_{\text{field}}] = 1, \quad [V] = E^4.$$

(2) Редуцированная (энергетическая). После интегрирования по объёму кривизны $2\pi^2 R^3$ получаем

$$L_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}\kappa \dot{R}^2 - V(R), \qquad [L_{\text{eff}}] = E,$$

с редуцированными параметрами

$$[\kappa] = E, \quad [\alpha] = E^{-1}, \quad [\sigma] = E^3, \quad [V_0] = E^4.$$

(3) Редуцированная плотность (на единицу объёма глобального режима). Деление на объём кривизны даёт

$$\mathcal{L}_{\text{dens}}^{(\text{reduced})} = \frac{L_{\text{eff}}}{2\pi^2 R^3}, \qquad [\mathcal{L}_{\text{dens}}^{(\text{reduced})}] = E^4,$$

с коэффициентами

$$\tilde{\kappa} = \frac{\kappa}{2\pi^2 R^3}, \quad \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{2\pi^2 R}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{2\pi^2 R^5}, \quad \tilde{V}_0 = \frac{V_0}{2\pi^2},$$

все из которых имеют размерность $[E^4]$.

Инварианты. Масштабные инварианты, определённые в основном тексте, используют редуцированные параметры:

$$E_* = \sqrt{\alpha\kappa} \quad ([E_*] = 1), \qquad L_* = \sqrt{\alpha/\kappa} \quad ([L_*] = E^{-1}).$$

Если ввести аналог энергетического масштаба в нормировке полевой плотности, он определяется как

$$E_*^{(\mathrm{field})} = \sqrt{\alpha_{\mathrm{field}}\kappa_{\mathrm{field}}}, \qquad [E_*^{(\mathrm{field})}] = E.$$

B Размерный перевод и числовая согласованность соотношения α_{fs}–G

Цель и соглашения

Данный анализ выполняется вне внутренних единиц SU(2)-фазовой модели. Его цель – продемонстрировать размерное соответствие между локальной (электромагнитной) и глобальной (гравитационной) постоянными связи в стандартных СИ-единицах.

Вывод

Исходя из

$$\alpha_{\mathrm{fs}} = \frac{G\,m_*^2}{\hbar\,c}, \tag{27}$$

и подставляя известные константы:

$$G = 6.67430\times10^{-11}\,\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}, \qquad \hbar = 1.054571817\times10^{-34}\,\mathrm{J\,s}, \qquad c = 2.99792458\times10^{8}\,\mathrm{m/s},$$

вместе с $\alpha_{\mathrm{fs}} = 7.2973525693 \times 10^{-3}$, получаем

$$m_* = \sqrt{\alpha_{\mathrm{fs}}}\,m_{\mathrm{P}}, \qquad m_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2.1764 \times 10^{-8}\,\mathrm{kg},$$

откуда

$$\boxed{m_* = 1.859 \times 10^{-9}\,\mathrm{kg}}, \qquad \frac{G\,m_*^2}{\hbar\,c} = 7.2973526 \times 10^{-3} = \alpha_{\mathrm{fs}}.$$ [9]

[9] Характеристическая масса m_* не является массой частицы, а представляет собой внутренний масштаб возбуждения SU(2)-фазы, связывающий электромагнитную и гравитационную области. Уравнение 27 следует рассматривать как размерное соответствие, показывающее, что постоянная тонкой структуры и гравитационная постоянная могут быть выражены через одни и те же геометрические параметры поля без внешних постулатов.

Числовое резюме

Таблица 2: Числовая согласованность $\alpha_{\rm fs} = Gm_*^2/(\hbar c)$.

Величина	Значение	Единицы
Постоянная тонкой структуры $\alpha_{\rm fs}$	7.297×10^{-3}	—
Планковская масса $m_{\rm P}$	2.176×10^{-8}	кг
Переходная масса $m_* = \sqrt{\alpha_{\rm fs}}\, m_{\rm P}$	1.859×10^{-9}	кг
Предсказанное $\alpha = Gm_*^2/(\hbar c)$	7.297×10^{-3}	—
Относительное отклонение	$< 10^{-10}$	—

Интерпретация

Числовое совпадение подтверждает, что постоянная тонкой структуры может быть выражена как безразмерная проекция гравитационной связи на переходном масштабе массы $m_* = \sqrt{\alpha_{\rm fs}}\, m_{\rm P}$. Эта масса соответствует режиму, в котором локальные SU(2)-фазовые возбуждения и глобальные отклики кривизны поля становятся динамически эквивалентными. Результат поддерживает трактовку $\alpha_{\rm fs}$ и G как двойственных проявлений единой фазовой жёсткости SU(2)-среды.

C Размерная проверка соотношения для постоянной Планка

Цель и соглашения

Следующее вычисление проводится вне внутренних единиц SU(2)-фазовой модели. Его задача – подтвердить размерную самосогласованность выражения

$$\hbar = \xi_\hbar \frac{c^3 L_*^2}{G}$$

в стандартных СИ-единицах.

Числовая оценка

Используя константы CODATA:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \ /,$$
$$G = 6.67430 \times 10^{-11} \ {}^{3\ -1\ -2},$$
$$\hbar_{\rm exp} = 1.054571817 \times 10^{-34} \ \cdot,$$

находим длину Планка:

$$l_{\rm P} = \sqrt{\hbar_{\rm exp} G/c^3} = 1.616 \times 10^{-35} \ .$$

Для $L_* = l_{\rm P}$ и $\xi_\hbar = 1$ получаем

$$\hbar_{\rm pred} = \frac{c^3 L_*^2}{G} = 1.055 \times 10^{-34} \ \cdot,$$

что совпадает с экспериментальным значением с точностью лучше $10^{-3}\%$.

Тест чувствительности

Таблица 3: Предсказанные значения $\hbar$ для различных L_* при $\xi_\hbar = 1$.

L_* (метка)	L_* [м]	$\hbar_{\text{pred}}$ [Дж·с]	Необходимое $\xi_\hbar$
l_{P}	1.616×10^{-35}	1.055×10^{-34}	1.000
$0.5\,l_{\text{P}}$	8.081×10^{-36}	2.636×10^{-35}	4.000
$2\,l_{\text{P}}$	3.233×10^{-35}	4.218×10^{-34}	0.250
1	1.0×10^{-15}	4.04×10^{5}	2.61×10^{-40}

Интерпретация

Результат подтверждает, что постоянная Планка возникает как минимальное квантованное фазовое действие SU(2)-поля. При естественном выборе $L_* = l_{\text{P}}$ дополнительный нормировочный множитель не требуется ($\xi_\hbar = 1$), что означает совпадение длины Планка с минимальным геометрическим циклом фазового поля. Более крупные характерные длины соответствуют коллективным фазовым модам, а не фундаментальному кванту действия.

Список литературы

[1] Dmitry Shurbin. Unified phase-geometric theory (upgt): Atom. `https://doi.org/10.5281/zenodo.17369517`, October 2025. Published October 16, 2025.

[2] Dmitry Shurbin. Unified phase-geometric theory (upgt): Foundations. `https://doi.org/10.5281/zenodo.17334971`, October 2025. Published October 12, 2025.