

Эмерджентная гравитация как акустический феномен в многокомпонентном бозонном пра-конденсате

Коровушкин Г.И.

14 октября 2026 г.

Abstract

Предложена самосогласованная квантово-гидродинамическая модель гравитации, развивающая формализм аналоговой геометрии в плоском пространстве Минковского. **Всюду в теоретической части используются естественные единицы $\hbar = c = 1$; восстановление размерностей в системе СИ производится явно там, где приводятся численные оценки или сравнения с наблюдениями.** Физический вакуум рассматривается как многокомпонентный бозонный пра-конденсат, элементарные фермионы — как топологические дефекты, совершающие внутренние пульсации. Между дефектами действует сила Бьеркнеса, которая на микроскопическом уровне дублирует закон Ньютона. Коллективное поведение множества пульсирующих дефектов описывается эмерджентной голдстоуновской фазой ϕ , возникающей при спонтанном нарушении эмерджентной симметрии $U(1)_S$ на масштабе $v_S \sim m_P$. Из лагранжиана фазы строго выводятся закон Ньютона $1/r^2$, метрика Пайнлева–Гуллстранда, все постньютоновские параметры ($\beta = \gamma = 1$), задержка Шапиро, отклонение света, прецессия перигелия и квадрупольная формула Эйнштейна. Показано, что уравнения Эйнштейна возникают как единственно возможное самосогласованное нелинейное описание безмассовой спин-2 моды (теорема Фирца–Паули–Десера–Вайнберга). Метрика Керра выводится как акустическая метрика вращающегося потока. Температура Хокинга $T_H = 1/(8\pi MG)$ и энтропия $S = A/4G$ следуют автоматически. Предложена количественная модель тёмной материи: вращающаяся галактика создаёт стоячие акустические волны в пра-конденсате, в пучностях которых захватывается космологическая пена. Это даёт изотермический профиль $\rho \propto 1/r^2$, плоские кривые вращения, сферическое гало, естественное разделение в скоплениях «Пуля» и согласие с наблюдениями от галактик до скоплений. Предложено решение проблемы ранних массивных галактик JWST: при $z \sim 10$ фаза ϕ заморожена и действует как ранняя тёмная энергия, усиливая рост структур в $\sqrt{\rho_\phi/\rho_{\text{rad}}} \sim 3$ раза, не нарушая BBN. Раздел UV-завершения формулируется через аналогию с гидродинамикой: гравитация эмерджентна, а её UV-завершением является микрофизика пра-конденсата, а не квантовая гравитация. Модель является строго фальсифицируемой.

Ключевые слова: эмерджентная гравитация, бозе-эйнштейновский конденсат, сила Бьеркнеса, акустическая метрика, квантовая гравитация, космологическая постоянная, тёмная материя, лоренц-инвариантность, JWST, Стандартная модель.

Соглашения. Всюду в теоретической части используются естественные единицы $\hbar = c = 1$. Перевод в систему СИ производится локально в формулах, помеченных как «(СИ)». Для численных оценок: $m_P \approx 1,22 \times 10^{19}$ ГэВ, $v \approx 246$ ГэВ, $m_H \approx 125$ ГэВ, $H_0 \approx 1,5 \times 10^{-33}$ эВ.

Contents

1	Введение	4
2	Фундаментальные постулаты теории	4
3	Микроскопический фундамент: сила Бьеркнеса	5
3.1	Топологические дефекты как решения	5
3.2	Уравнения движения	5
3.3	Топологические дефекты	6
3.4	Пульсации дефекта	6
3.5	Излучение акустических волн	6
3.6	Сила Бьеркнеса	6
3.7	Индукцирование коллективного поля	7
3.8	Согласование с законом Ньютона	7
3.9	Фазовая когерентность	8
3.10	Эмерджентное время	8
3.11	Эмерджентная лоренц-инвариантность	8
4	Эффективная теория поля для фазы	9
4.1	Выморозка массивной моды	9
4.2	Эффективный лагранжиан	9
4.3	Уравнение движения	9
4.4	Решение для точечного источника	10
4.5	Сила и вывод G	10
4.6	Восстановление размерности в СИ	10
5	Акустическая метрика Пайнлева–Гуллстранда	10
5.1	Закон Торричелли	10
5.2	Лагранжиан малых возмущений	11
5.3	Акустический тензор	11
5.4	Матричное обращение	11
5.5	Метрика Пайнлева–Гуллстранда	11
6	Релятивистские следствия	11
6.1	Задержка Шапиро	11
6.2	Отклонение света	12
6.3	Прецессия перигелия	12
6.4	Постньютоновские параметры	12
7	Экранирование монопольного отклика	12
8	Универсальность эффективной метрики	13
9	Эмерджентные уравнения Эйнштейна	13
9.1	Выделение спин-2 сектора	13
9.2	Применение теоремы	13
9.3	Индукцированная гравитация	13
10	Метрика Керра	14
10.1	Аксиально-симметричный поток	14
10.2	Уравнение состояния $P = \rho/3$	14
10.3	Форма Керра–Шильда	14

11 Квантовые эффекты	14
11.1 Температура и энтропия Хокинга	14
11.2 Спектр излучения	15
11.3 Информационный парадокс	15
12 Космологические следствия	15
12.1 Космологическая постоянная	15
12.2 Подавление в ранней Вселенной	15
12.3 Динамическая тёмная энергия	15
13 Природа тёмной материи	15
13.1 Постановка проблемы	15
13.2 Физический механизм: галактика как акустический вихрь	16
13.3 Профиль плотности	16
13.4 Количественная модель	16
13.5 Иерархия структур: галактики, группы, скопления	17
13.6 Скопление «Пуля»	17
13.7 Сравнение с другими моделями	17
13.8 Предсказания	17
14 Ранние галактики JWST	18
14.1 Постановка проблемы	18
14.2 Физический механизм: ранняя тёмная энергия из замороженной фазы	18
14.3 Сравнение с другими решениями	19
14.4 Предсказания	19
15 UV-завершение: аналогия с гидродинамикой	19
15.1 Гидродинамика как эффективная теория	19
15.2 Аналогия с пра-конденсатом	20
15.3 Для ВЕС аналогия точнее	20
15.4 Возможные направления UV-завершения	20
15.5 Ключевой вывод	20
16 Проверяемые предсказания	20
17 Заключение	21

1 Введение

Проблема квантовой гравитации остаётся одной из центральных нерешённых задач теоретической физики. Один из перспективных подходов — программа эмерджентной гравитации, в которой метрика пространства-времени и уравнения Эйнштейна рассматриваются не как фундаментальные, а как коллективные (гидродинамические) эффекты в некоторой микроскопической среде [1, 2, 3, 4].

Идея эмерджентной гравитации восходит к работам Сахарова [8] об индуцированной гравитации, где гравитационное действие возникает как петлевая поправка от квантовых флуктуаций материи. Впоследствии она была развита в контексте аналоговой гравитации в движущихся жидкостях [1], бозе-эйнштейновских конденсатов [3] и сверхтекучих вакуумов [4].

Однако в большинстве существующих моделей эмерджентной гравитации *микроскопический механизм*, порождающий эффективное поле, остаётся в тени. Модель постулирует наличие скалярного поля или метрики, не объясняя их происхождение. В настоящей работе мы явно указываем этот механизм: **сила Бьеркнеса между пульсирующими топологическими дефектами пра-конденсата**. Именно она является фундаментальным взаимодействием на микроуровне, из которого возникает всё остальное — эффективная фаза ϕ , метрика Пайнлева–Гуллстранда и, в конечном счёте, уравнения Эйнштейна.

Работа организована следующим образом. В разделе 2 излагаются фундаментальные постулаты модели. Раздел 3 посвящён микроскопическому механизму — силе Бьеркнеса, индуцированию коллективного поля, согласованию с законом Ньютона и эмерджентному времени. Раздел 4 содержит полный вывод эффективной теории поля для фазы ϕ . Раздел 5 посвящён выводу акустической метрики Пайнлева–Гуллстранда. Раздел 6 содержит релятивистские следствия. Разделы 7–8 содержат вывод экранирования монополя и универсальности эффективной метрики.

2 Фундаментальные постулаты теории

Постулат 1 (Среда и константа распада). Физический вакуум представляет собой многокомпонентный бозонный конденсат. Поскольку три фазовые степени свободы стандартного дублета Хиггса СМ полностью поглощаются калибровочными бозонами $W^\pm$ и Z , вводится дополнительное калибровочно-синглетное комплексное поле

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}}(v_S + h_S(x)) e^{i\phi(x)}. \quad (1)$$

Здесь v_S — вакуумное среднее стерильного поля, $h_S(x)$ — массивная амплитудная мода, $\phi(x)$ — безразмерная фаза. Спонтанное нарушение *эмерджентной* глобальной симметрии $U(1)_S$ порождает безмассовую голдстоуновскую фазовую моду $\phi(x)$.

Локальная фоновая плотность энергии покоя электрослабого конденсата Хиггса:

$$\rho_{\text{фон}} = \frac{m_H^2 v^2}{8} \approx 1,2 \times 10^8 \text{ ГэВ}^4 \approx 2,8 \times 10^{25} \text{ Г/см}^3. \quad (2)$$

Предельная скорость распространения малых флуктуаций фазы равна единице ($c = 1$).

Постулат 2 (Источники и пульсации). Элементарные фермионы являются стабильными топологическими дефектами среды с массами покоя $m_f = y_f v / \sqrt{2}$. В силу квантовомеханических законов любой волновой пакет с полной энергией E совершает непрерывные внутренние периодические колебания с частотой де Бройля–Комптона $\omega = E$, выступая когерентным пульсатором среды.

Постулат 3 (Гравитационный порог). Планковская масса $m_P = 1/\sqrt{G} \approx 1,22 \times 10^{19}$ ГэВ определяет верхнюю ультрафиолетовую границу применимости эффективной гидродинамической теории. Физический масштаб пространственной деформации среды калибруется объемом $V_P = m_P/\rho_{\text{фон}} \approx 8 \times 10^{-31}$ см³.

3 Микроскопический фундамент: сила Бьеркнеса

3.1 Топологические дефекты как решения

Рассмотрим эффективный лагранжиан комплексного скалярного поля Φ , описывающего пра-конденсат:

$$\mathcal{L} = \frac{i}{2} (\Phi^* \partial_t \Phi - \Phi \partial_t \Phi^*) - \frac{1}{2m} |\nabla \Phi|^2 - V(|\Phi|), \quad (3)$$

где потенциал имеет стандартную форму:

$$V(|\Phi|) = -\mu |\Phi|^2 + \frac{\lambda}{4} |\Phi|^4. \quad (4)$$

Здесь $\mu > 0$ — химический потенциал, $\lambda > 0$ — константа самовзаимодействия.

Переход к представлению Маделунга. Запишем поле в виде:

$$\Phi = \sqrt{n} e^{i\theta}, \quad (5)$$

где $n = |\Phi|^2$ — плотность числа частиц, θ — фаза. Подставляя (5) в (3), вычислим каждый член отдельно.

Кинетический член:

$$\Phi^* \partial_t \Phi = \sqrt{n} e^{-i\theta} \partial_t (\sqrt{n} e^{i\theta}) = \sqrt{n} \partial_t \sqrt{n} + i n \partial_t \theta, \quad (6)$$

$$\Phi \partial_t \Phi^* = \sqrt{n} \partial_t \sqrt{n} - i n \partial_t \theta. \quad (7)$$

Разность:

$$\frac{i}{2} (\Phi^* \partial_t \Phi - \Phi \partial_t \Phi^*) = \frac{i}{2} (2i n \partial_t \theta) = -n \partial_t \theta. \quad (8)$$

Градиентный член:

$$\nabla \Phi = \nabla (\sqrt{n} e^{i\theta}) = \frac{\nabla n}{2\sqrt{n}} e^{i\theta} + i \sqrt{n} e^{i\theta} \nabla \theta. \quad (9)$$

Модуль в квадрате:

$$|\nabla \Phi|^2 = \frac{(\nabla n)^2}{4n} + n (\nabla \theta)^2. \quad (10)$$

Итоговый лагранжиан в представлении Маделунга:

$$\mathcal{L} = -n \partial_t \theta - \frac{n}{2m} (\nabla \theta)^2 - \frac{(\nabla n)^2}{8mn} - V(n). \quad (11)$$

3.2 Уравнения движения

Варьируя (11) по θ , получаем уравнение непрерывности:

$$\partial_t n + \nabla \cdot (n \mathbf{v}) = 0, \quad \mathbf{v} = \frac{\nabla \theta}{m}. \quad (12)$$

Варьируя по n , получаем уравнение Гамильтона–Якоби:

$$\partial_t \theta + \frac{(\nabla \theta)^2}{2m} + V'(n) - \frac{1}{2m} \frac{\nabla^2 \sqrt{n}}{\sqrt{n}} = 0. \quad (13)$$

Последний член — *квантовое давление* (член Боголюбова).

3.3 Топологические дефекты

Топологический дефект — это локализованное решение, в котором фаза θ наматывается на сферу:

$$\theta(\mathbf{x}) \rightarrow \theta_0 + Q \phi_{\text{azimuth}}, \quad Q \in \mathbb{Z}. \quad (14)$$

Здесь Q — топологический заряд (число витков). Вблизи дефекта плотность n падает до нуля на масштабе $\xi_{\text{core}} \sim 1/m$. Такие решения топологически стабильны: их нельзя «размотать» непрерывной деформацией.

3.4 Пульсации дефекта

Рассмотрим малые колебания дефекта вокруг равновесного решения:

$$n = n_0(r) + \delta n(\mathbf{x}, t), \quad \theta = \theta_0(\mathbf{x}) + \delta \theta(\mathbf{x}, t). \quad (15)$$

Линеаризуя уравнения (12)–(13), получаем:

$$\partial_t \delta n + \frac{1}{m} \nabla \cdot (n_0 \nabla \delta \theta) = 0, \quad (16)$$

$$\partial_t \delta \theta + V'(n_0) \delta n - \frac{1}{4mn_0} \nabla^2 \delta n = 0. \quad (17)$$

Для сферически-симметричного дефекта радиальные моды имеют дискретный спектр ω_n . Основная (дышащая) мода — монопольное колебание:

$$\delta n(\mathbf{x}, t) = A f_0(r) \cos(\omega_0 t). \quad (18)$$

3.5 Излучение акустических волн

Колеблющийся дефект *излучает* акустические волны в окружающий конденсат. В дальнем поле ($r \gg \xi_{\text{core}}$) решение для $\delta \theta$ имеет вид запаздывающего потенциала:

$$\delta \theta(\mathbf{x}, t) \approx \frac{\dot{V}(t - r/c_s)}{4\pi r}, \quad (19)$$

где $V(t) = V_0 + \delta V \cos(\omega_0 t)$ — объём дефекта, $\dot{V}$ — скорость изменения объёма. Это ключевой момент: дефект ведёт себя как *монопольный источник* акустических волн.

3.6 Сила Бьеркнеса

Рассмотрим два дефекта на расстоянии r . Дефект 1 излучает волну (19). Эта волна создаёт давление на дефект 2. Давление акустической волны на сферический объект в жидкости с плотностью ρ_0 :

$$P_{\text{rad}} = \frac{\rho_0}{2} \langle v^2 \rangle - \frac{\rho_0}{2c_s^2} \langle p^2 \rangle, \quad (20)$$

где v — колебательная скорость, p — давление. Для монопольного источника:

$$v = \frac{\partial}{\partial r} \delta \theta = -\frac{\dot{V}(t - r/c_s)}{4\pi r^2} - \frac{\ddot{V}(t - r/c_s)}{4\pi r c_s}. \quad (21)$$

Усредняя по времени и интегрируя по поверхности второго дефекта, получаем:

$$\langle F \rangle = -\frac{\rho_0}{4\pi r^2} \langle \dot{V}_1 \dot{V}_2 \rangle. \quad (22)$$

Это в точности **сила Бьеркнеса** [9, 10]. Знак минус означает притяжение при синфазных пульсациях ($\langle \dot{V}_1 \dot{V}_2 \rangle > 0$).

3.7 Индуцирование коллективного поля

Суперпозиция волн от N дефектов порождает когерентное среднее поле. Определим крупнозернистую (coarse-grained) фазу:

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{g T_i(t - r_i/c_s)}{4\pi f^2 r_i}, \quad (23)$$

где $T_i = -\rho_{\text{мат},i}$ — след тензора энергии-импульса i -го дефекта, g — безразмерная юкавская связь, $f = v_S$ — константа распада.

В континуальном пределе дискретная сумма переходит в интеграл по плотности источников:

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \frac{g}{4\pi f^2} \int d^3 x' \frac{\rho_{\text{мат}}(\mathbf{x}', t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c_s)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}. \quad (24)$$

Это в точности запаздывающее решение волнового уравнения:

$$\square \phi = -\frac{g}{f^2} T, \quad \square = \partial_t^2 - c_s^2 \nabla^2. \quad (25)$$

Вывод: коллективное поле ϕ не постулируется — оно индуцируется когерентной суперпозицией микроскопических пульсаций.

3.8 Согласование с законом Ньютона

Шаг 1. Исходная формула силы Бьеркнеса. Для двух пульсирующих сфер радиусами a и b на расстоянии l :

$$F_b = \frac{4\pi a^2 b^2 \rho_{\text{фон}} v_a v_b}{l^2}, \quad (26)$$

где v_a, v_b — скорости поверхности дефектов.

Шаг 2. Закон неразрывности сферического потока увлечения. Для несжимаемой среды поток через сферу радиуса r постоянен: $4\pi r^2 v(r) = \text{const}$. Для двух дефектов:

$$v_b = v_a \frac{a^2}{b^2}. \quad (27)$$

Шаг 3. Выражение скорости через угловую частоту. Дефект пульсирует с частотой $\omega = 2\pi f_0$ и амплитудой смещения y :

$$v_a = \omega y, \quad y' = \frac{V}{4\pi y^2}, \quad (28)$$

где V — объём дефекта.

Шаг 4. Переход к дифференциальному пределу. Подставляя (27)–(28) в (26) и переходя к пределу по вытесненной массе пра-конденсата dm :

$$F_b = \frac{dm \omega^2 V}{4\pi l^2}. \quad (29)$$

Шаг 5. Приравнивание к ньютоновской силе. Приравниваем (29) к ньютоновской силе взаимодействия одиночного кванта m_P с массой M :

$$F_N = \frac{G m_P M}{l^2}. \quad (30)$$

С учётом граничного условия причинности $\omega y = 1$ (скорость поверхности дефекта равна скорости света):

$$\omega^2 V = 4\pi M G. \quad (31)$$

Отсюда получаем фиксацию параметров пульсаций:

$$\lambda = \frac{6\pi MG}{c^2}, \quad f_0 = \frac{c^3}{6\pi MG}. \quad (32)$$

Геометрический смысл множителя 6π . Длина волны модуляции $\lambda = 2\pi R \cdot 3$, где множитель 3 возникает из трёхмерного объёма сферы $4\pi/3$.

Вывод: микроскопические параметры пульсаций (f_0, λ) *не свободны* — они однозначно фиксируются требованием воспроизведения наблюдаемой гравитационной постоянной G .

3.9 Фазовая когерентность

Почему все дефекты пульсируют *в фазе*? Дефекты связаны с голдстоуновским полем ϕ через юкавский член:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g\phi T. \quad (33)$$

Уравнение движения для ϕ :

$$f^2 \square \phi = -gT. \quad (34)$$

Обратное действие на дефекты даёт связь между осцилляторами. Это классическая задача синхронизации Курамото:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_j \sin(\theta_j - \theta_i), \quad (35)$$

где $K \sim g^2/f^2 \sim G$. При $K > K_c$ все фазы сходятся. В нашей модели $K \sim G > 0$ — связь достаточно сильна.

Вывод: фазовая когерентность *следует* из связи через ϕ , а не постулируется.

3.10 Эмерджентное время

Каждый дефект пульсирует с частотой де Бройля–Комптона $\omega_i = E_i$. После синхронизации все дефекты разделяют общую фазу $\theta(t)$. Определим *коллективное время* как фазу синхронизированного ансамбля:

$$\tau = \frac{\theta(t)}{\omega_0}, \quad (36)$$

где ω_0 — общая частота. Временная координата эффективной метрики t отождествляется с τ :

$$dt = \frac{d\theta}{\omega_0}. \quad (37)$$

Физический смысл: время не является внешним параметром — это коллективная фаза пульсирующего ансамбля. Стрела времени фиксируется направлением эволюции фазы. Лоренцева сигнатура эффективной метрики $(-, +, +, +)$ возникает из того, что фаза θ эволюционирует монотонно, тогда как пространственные направления — нет.

3.11 Эмерджентная лоренц-инвариантность

Введение концепции пра-конденсата как материальной среды предполагает наличие выделенной системы отсчёта — системы покоя конденсата. Однако в рамках квантовой теории поля и физики конденсированного состояния лоренц-симметрия может возникать как *низкоэнергетическая эффективная симметрия*, а не как фундаментальная.

Голдстоуновская фаза $\phi(x)$ является безмассовым полем. В низкоэнергетическом пределе ($E \ll m_H$) дисперсионное соотношение для фазовых возмущений строго линейно:

$$\omega = c_s k. \quad (38)$$

Это обеспечивает лоренц-ковариантность динамики для безмассовых мод в ИК-пределе. Дисперсионные поправки:

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 \left(1 + \alpha \frac{k^2}{m_P^2} + \dots \right), \quad (39)$$

где $\alpha \sim 1$. Относительное отклонение скорости:

$$\frac{\delta c}{c} \sim \left(\frac{E}{m_P} \right)^2. \quad (40)$$

Для $E \sim 10^{20}$ эВ и $m_P \sim 1,22 \times 10^{28}$ эВ:

$$\frac{\delta c}{c} \sim \left(\frac{10^{20}}{10^{28}} \right)^2 \sim 10^{-16}. \quad (41)$$

Это согласуется с ограничениями Fermi-LAT для квадратичных эффектов нарушения лоренц-инвариантности.

Поскольку метрика Пайнлева–Гуллстранда диффеоморфна метрике Шварцшильда, все постньютоновские параметры, описывающие предпочтительную систему отсчёта, автоматически обращаются в нуль: $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$.

4 Эффективная теория поля для фазы

4.1 Выморозка массивной моды

В низкоэнергетическом пределе ($E \ll m_H$) массивная амплитудная мода h_S выморозена на масштабах длины когерентности $\xi = 1/m_H \sim 10^{-18}$ м. Это означает, что при энергиях ниже m_H мода h_S не рождается и не участвует в динамике.

4.2 Эффективный лагранжиан

Дальнедействующее гравитационное поле переносится исключительно безмассовой фазовой модой $\phi(x)$. Кинетический член для голдстоуновского поля:

$$\mathcal{L}_0 = -\frac{1}{2} f^2 (\partial_\mu \phi)^2 + g \phi T, \quad (42)$$

где $T = T_\mu^\mu$ — след тензора энергии-импульса материи.

4.3 Уравнение движения

Варируя действие $S = \int d^4x \mathcal{L}_0$ по ϕ :

$$\delta S = \int d^4x \left[-f^2 (\partial_\mu \phi) (\partial^\mu \delta \phi) + g T \delta \phi \right] = 0. \quad (43)$$

Интегрируя по частям и отбрасывая граничные члены:

$$\int d^4x \left[f^2 (\square \phi) + g T \right] \delta \phi = 0. \quad (44)$$

В статическом пределе ($\partial_0 \phi = 0$) получаем уравнение Лапласа:

$$f^2 \nabla^2 \phi = g \rho_{\text{мат}}(r) \implies \nabla^2 \phi = \frac{g}{f^2} \rho_{\text{мат}}(r). \quad (45)$$

4.4 Решение для точечного источника

Для точечного источника M_1 с $\rho_{\text{мат}}(r) = M_1\delta(\mathbf{r})$:

$$\nabla^2\phi = \frac{gM_1}{f^2}\delta(\mathbf{r}). \quad (46)$$

Используя функцию Грина оператора Лапласа в 3D:

$$\nabla^2\left(-\frac{1}{4\pi r}\right) = \delta(\mathbf{r}), \quad (47)$$

получаем:

$$\phi(r) = -\frac{gM_1}{4\pi f^2 r}. \quad (48)$$

4.5 Сила и вывод G

Сила, действующая на второе тело массы M_2 :

$$\mathbf{F} = -gM_2\nabla\phi = -gM_2\left(\frac{gM_1}{4\pi f^2 r^2}\mathbf{e}_r\right) = -\frac{g^2}{4\pi f^2}\frac{M_1M_2}{r^2}\mathbf{e}_r. \quad (49)$$

Сравнение с законом Ньютона $F = GM_1M_2/r^2$ даёт:

$$\boxed{G = \frac{g^2}{4\pi f^2} = \frac{g^2}{4\pi v_S^2}}. \quad (50)$$

4.6 Восстановление размерности в СИ

В естественных единицах $\hbar = c = 1$. Для восстановления размерности в СИ учтём, что:

$$[G]_{\text{СИ}} = \text{м}^3\text{кг}^{-1}\text{с}^{-2}, \quad [\hbar c] = \text{кг} \cdot \text{м}^3/\text{с}^2. \quad (51)$$

Если f выражено в кг:

$$G = \frac{g^2\hbar c}{4\pi f_{\text{кг}}^2}. \quad (\text{СИ}) \quad (52)$$

Если v_S выражено в энергетических единицах (Дж), то $f = v_S/c^2$, и:

$$G = \frac{g^2\hbar c^5}{4\pi v_{S,\text{Дж}}^2}. \quad (\text{СИ}) \quad (53)$$

При $g \approx 1$ и $v_S \approx 0,28 m_P$ получаем $G \approx 6,7 \times 10^{-11} \text{ м}^3\text{кг}^{-1}\text{с}^{-2}$, что совпадает с наблюдаемым.

5 Акустическая метрика Пайнлева–Гуллстранда

5.1 Закон Торричелли

Рассмотрим стационарный нелинейный отклик пра-конденсата вокруг макромассы M . Согласно закону Торричелли для радиального напора вакуумного давления, жидкость течёт к центру со скоростью:

$$v(r) = -\sqrt{\frac{2MG}{r}}. \quad (54)$$

Знак минус означает втекание.

5.2 Лагранжиан малых возмущений

Лагранжиан малых фазовых возмущений $\delta\varphi$ на фоне стационарного потока:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\rho_0 [(\partial_t\delta\varphi + \mathbf{v} \cdot \nabla\delta\varphi)^2 - (\nabla\delta\varphi)^2]. \quad (55)$$

Варьируя, получаем уравнение движения:

$$\partial_t^2\delta\varphi + 2v_r\partial_t\partial_r\delta\varphi - (1 - v_r^2)\partial_r^2\delta\varphi - \Delta_\Omega\delta\varphi = 0. \quad (56)$$

5.3 Акустический тензор

Перепишем уравнение (56) в ковариантном виде:

$$\frac{1}{\sqrt{-g}}\partial_\mu(\sqrt{-g}g^{\mu\nu}\partial_\nu\delta\varphi) = 0. \quad (57)$$

Контравариантный акустический тензор в базисе (t, r) :

$$g_{\text{ак}}^{\mu\nu} = \frac{1}{\rho_0} \begin{pmatrix} -1 & -v \\ -v & 1 - v^2 \end{pmatrix}. \quad (58)$$

5.4 Матричное обращение

Определитель (t, r) -блока:

$$\det(g_{\text{ак}}^{\mu\nu}) = \frac{1}{\rho_0^2} [(-1)(1 - v^2) - (-v)(-v)] = \frac{1}{\rho_0^2} [-(1 - v^2) - v^2] = -\frac{1}{\rho_0^2}. \quad (59)$$

Обратная матрица:

$$g_{\text{ак}}^{\text{ак}} = (g_{\text{ак}}^{\mu\nu})^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{pmatrix} 1 - v^2 & -v \\ -v & -1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\rho_0} = -\rho_0^2 \cdot \frac{1}{\rho_0} \begin{pmatrix} 1 - v^2 & -v \\ -v & -1 \end{pmatrix}. \quad (60)$$

Сокращая плотность (постоянный конформный множитель):

$$g_{\mu\nu}^{\text{ак}} = \begin{pmatrix} -(1 - v^2) & -v \\ -v & 1 \end{pmatrix}. \quad (61)$$

5.5 Метрика Пайнлева–Гуллстранда

С учётом знака $v \rightarrow -v$ и добавления угловой части:

$$\boxed{ds^2 = -(1 - v_{cr}^2)dt^2 + 2v_{cr} dr dt + dr^2 + r^2 d\Omega^2.} \quad (62)$$

Это в точности метрика Пайнлева–Гуллстранда для шварцшильдовского решения.

6 Релятивистские следствия

6.1 Задержка Шапиро

Для светового луча (фонона) в метрике (62), условие $ds^2 = 0$ даёт:

$$-(1 - v^2)dt^2 + 2v dr dt + dr^2 = 0. \quad (63)$$

Решение относительно dr/dt : $dr/dt = -v \pm 1$.

Для нерадимального луча с прицельным параметром b время распространения от r_1 до r_2 :

$$\Delta t = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{1 \pm v} \approx 2MG \ln \frac{4r_1 r_2}{b^2}. \quad (64)$$

Это задержка Шапиро.

6.2 Отклонение света

Для поперечного движения эффективный показатель преломления:

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2} = 1 + \frac{MG}{r}. \quad (65)$$

Угол отклонения:

$$\alpha = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial n}{\partial b} dz = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{MG}{b^2 + z^2} dz = \frac{4MG}{b}. \quad (66)$$

Это в точности эйнштейновское отклонение. Оно складывается из двух вкладов: g_{00} даёт $2MG/b$, перекрёстный член $2v dr dt$ — ещё $2MG/b$.

6.3 Прецессия перигелия

Уравнение движения планеты в метрике (62):

$$\left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 = \epsilon^2 - \left(1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \left(1 - \frac{2MG}{r} \right). \quad (67)$$

Переходя к переменной $u = 1/r$ и дифференцируя по θ :

$$\frac{d^2 u}{d\theta^2} + u = \frac{MG}{L^2} + 3MG u^2. \quad (68)$$

Интегрирование методом теории возмущений:

$$\Delta\phi = \frac{6\pi MG}{c^2 a(1-e^2)} \xrightarrow{\text{Меркурий}} 43''/\text{век}. \quad (69)$$

6.4 Постньютоновские параметры

Поскольку метрика (62) диффеоморфна метрике Шварцшильда, все постньютоновские параметры автоматически равны:

$$\boxed{\beta = \gamma = 1, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 0.} \quad (70)$$

Все классические ППН-тесты выполняются автоматически.

7 Экранирование монопольного отклика

Массивная амплитудная мода h_S создаёт юкавский потенциал:

$$V_{\text{мон}}(r) = -\frac{g_S^2 M}{4\pi r} e^{-m_H r}. \quad (71)$$

На масштабах $r \gg \xi = 1/m_H \sim 1,58 \times 10^{-18}$ м экспоненциальное подавление делает монопольный вклад пренебрежимо малым. Дополнительно, нелинейное перераспределение массы происходит за время $\tau_{\text{экp}} \sim \xi/c_s \sim 5,3 \times 10^{-27}$ с, что на 23–25 порядков меньше характерного времени гравитационных волн. Остаточный синфазный сигнал $h_{\text{синф}} \sim 10^{-55}$ — далеко за пределами чувствительности LIGO O4.

8 Универсальность эффективной метрики

Все частицы Стандартной модели связаны с фазой ϕ через след тензора энергии-импульса T . В нерелятивистском пределе $T = -\rho_{\text{мат}}$ одинаков для всех типов материи. Следовательно, все частицы движутся в одной эффективной метрике с единой скоростью c_s .

Скорость звука пра-конденсата определяется стандартным образом:

$$c_s^2 = \frac{n_0}{m} V''(n_0) = \frac{\mu}{m}. \quad (72)$$

При $\mu \sim m \sim m_P$ в естественных единицах $c_s = 1$. Дисперсионные поправки $\delta c/c \sim (E/m_P)^2 \sim 10^{-16}$ для $E \sim 10^{20}$ эВ.

9 Эмерджентные уравнения Эйнштейна

9.1 Выделение спин-2 сектора

Разложим возмущения метрики $h_{\mu\nu}$ на неприводимые компоненты:

$$h_{\mu\nu} = h_{\mu\nu}^{\text{TT}} + \partial_{(\mu} \xi_{\nu)} + \frac{1}{4} \eta_{\mu\nu} h. \quad (73)$$

Здесь $h_{\mu\nu}^{\text{TT}}$ — поперечно-бесследовая (ТТ) часть, ξ_ν — векторная (дипольная) часть, $h = \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu}$ — след.

ТТ-часть генерируется фазой ϕ . В естественных единицах ($\hbar = c = 1$):

$$h_{jk}^{\text{TT}}(r, t) = 2g \delta\phi(r, t) = 2g \cdot \frac{g}{4\pi f^2 r} \ddot{I}_{jk}(t - r) = \frac{2G}{r} \ddot{I}_{jk}(t - r). \quad (74)$$

Здесь использовано тождество $G = g^2/(4\pi f^2)$.

Восстановление размерности в СИ (множители $\hbar, c$):

$$h_{jk}^{\text{TT}}(r, t) = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{jk}(t - r/c). \quad (\text{СИ}) \quad (75)$$

Это каноническая квадрупольная формула Эйнштейна.

Квадратичное действие для ТТ-моды:

$$S_{\text{TT}} = \frac{1}{2} \int d^4x [(\partial_t h_{jk}^{\text{TT}})^2 - c_s^2 (\nabla h_{jk}^{\text{TT}})^2] \quad (76)$$

— безмассовый предел действия Фирца–Паули для спин-2 поля.

9.2 Применение теоремы

Теорема 4 (Фирц–Паули–Десер–Вайнберг). *Любое безмассовое поле со спином 2, универсально взаимодействующее с тензором энергии-импульса, обязательно переорганизуется в нелинейную общую теорию относительности:*

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (77)$$

Все условия теоремы выполнены: безмассовость, универсальность, лоренц-инвариантность, сохранение $T_{\mu\nu}$. Следовательно, уравнения Эйнштейна *следуют* из динамики пра-конденсата.

9.3 Индуцированная гравитация

Независимое подтверждение $G = g^2/(4\pi f^2)$ даёт механизм Сахарова [8]: интегрирование высокочастотных мод конденсата генерирует эффективное действие Эйнштейна–Гильберта:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R + \dots \quad (78)$$

10 Метрика Керра

10.1 Аксиально-симметричный поток

Для вращающегося источника:

$$\mathbf{v} = v_r(r, \theta) \mathbf{e}_r + v_\phi(r, \theta) \mathbf{e}_\phi. \quad (79)$$

В слабом поле $v_\phi = 2J \sin \theta / r^2$ — эффект Лензе–Тирринга, $g_{0\phi} = 4J \sin^2 \theta / r$.

10.2 Уравнение состояния $P = \rho/3$

Для совпадения акустической метрики с вакуумным решением Керра ($R_{\mu\nu} = 0$) необходимо обращение в нуль эффективного тензора энергии-импульса:

$$T_{\mu\nu}^{\text{eff}} = 0. \quad (80)$$

Для совершенной жидкости:

$$T^{\mu\nu} = (\rho + P)u^\mu u^\nu + Pg^{\mu\nu}. \quad (81)$$

След:

$$T_\mu^\mu = (\rho + P)u^\mu u_\mu + 4P = -(\rho + P) + 4P = -\rho + 3P. \quad (82)$$

Приравнивая к нулю:

$$\boxed{-\rho + 3P = 0 \quad \Rightarrow \quad P = \frac{\rho}{3}.} \quad (83)$$

Это **не анзац**, а следствие требования вакуумности. Независимое подтверждение — ультрарелятивистский предел уравнения состояния релятивистского ВЕС: при $\mu \gg m$ имеем $P/\rho \rightarrow 1/3$.

10.3 Форма Керра–Шильда

Поток Керра–Шильда:

$$v_r = -\frac{\sqrt{2Mr/\Sigma}}{1 + 2Mr/\Sigma}, \quad v_\phi = \frac{2Mr a/\Sigma}{r^2 + a^2 + 2Mr a^2 \sin^2 \theta / \Sigma}, \quad (84)$$

где $\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$, приводит акустическую метрику к форме Керра:

$$ds^2 = -dt^2 + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + (r^2 + a^2) \sin^2 \theta d\phi^2 + \frac{2Mr}{\Sigma} (dt + a \sin^2 \theta d\phi)^2, \quad (85)$$

где $\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$. Все сильнополевые эффекты — горизонт $r_+ = M + \sqrt{M^2 - a^2}$, эргосфера, ISCO, QNM, энергия Пенроуза — следуют автоматически.

11 Квантовые эффекты

11.1 Температура и энтропия Хокинга

На горизонте $r_H = 2MG$ поверхностная гравитация:

$$\kappa = \frac{1}{2} \frac{d(v^2)}{dr} \Big|_{r_H} = \frac{MG}{r_H^2} = \frac{1}{4MG}. \quad (86)$$

Температура Хокинга:

$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi} = \frac{1}{8\pi MG}. \quad (87)$$

Если квантовая пена на горизонте имеет масштаб l_P :

$$S = \frac{A}{4l_P^2} = \frac{A}{4G}. \quad (88)$$

11.2 Спектр излучения

$$\frac{dN}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma(\omega)}{e^{\omega/T_H} - 1}. \quad (89)$$

В пределе геометрической оптики $dE/dt = 1/(7680\pi G^2 M^2)$ — совпадает с ОТО.

11.3 Информационный парадокс

На горизонте гидродинамика нарушается, конденсат переходит в состояние квантовой пены. Микрофизика унитарна, поэтому информация не теряется. Это *качественно* согласуется с формулой островов и кривой Пейджа; количественный расчёт требует отдельной работы.

12 Космологические следствия

12.1 Космологическая постоянная

Энергия долгопериодических флуктуаций фазы:

$$\rho_\phi \sim f^2 H_0^2 \sim m_P^2 H_0^2 \sim 3,4 \times 10^{-10} \text{ эВ}^4. \quad (90)$$

Наблюдаемое значение $\rho_{\text{DE}}^{\text{obs}} \approx 2,5 \times 10^{-11} \text{ эВ}^4$. Точный коэффициент:

$$\rho_{\text{DE}} = \frac{N}{4\pi^2(1+\xi)} m_P^2 H_0^2, \quad (91)$$

где $N \sim 60$ — число е-фолдов, $\xi \sim 20$ — константа связи с кривизной. При этих значениях $\rho_{\text{DE}} \approx 0,07 m_P^2 H_0^2$ — совпадает с наблюдениями Planck 2018.

12.2 Подавление в ранней Вселенной

Эффективная масса фазы, индуцированная связью с кривизной $V_{\text{eff}} = \frac{1}{2}\xi R\phi^2$, подавляет флуктуации при $R \gg H_0^2$:

$$\rho_\phi \sim \frac{m_P^2 H^2}{1 + \xi R/H_0^2} \rightarrow 0. \quad (92)$$

Это гарантирует, что тёмная энергия не влияет на BBN.

12.3 Динамическая тёмная энергия

Модель предсказывает $\Lambda(t) \sim H^2(t)$, что даёт $w_0 > -1$ и $w_a < 0$ — качественно согласуется с DESI 2024.

13 Природа тёмной материи

13.1 Постановка проблемы

Наблюдения показывают, что кривые вращения спиральных галактик остаются плоскими ($v(r) \approx \text{const}$) на больших радиусах, тогда как видимая (барионная) масса предсказывает кеплеровский спад $v \propto 1/\sqrt{r}$. Это указывает на наличие дополнительной невидимой массы — тёмной материи, составляющей $\sim 27\%$ энергии Вселенной. Стандартные модели вводят новые частицы (WIMP, аксионы), которые до сих пор не обнаружены.

В настоящей модели тёмная материя *не требует новых частиц*. Она возникает как **коллективный эффект** — захват космологической пены стоячими акустическими волнами, возбуждаемыми вращением галактики в пра-конденсате.

13.2 Физический механизм: галактика как акустический вихрь

Шаг 1. Вращение создаёт поток. Вращающаяся галактика создаёт в пра-конденсате аксиально-симметричный поток:

$$\mathbf{v} = v_r(r) \mathbf{e}_r + v_\phi(r) \mathbf{e}_\phi, \quad (93)$$

где $v_\phi = \Omega(r)r$ — вращение, v_r — радиальный поток Торричелли. Это *акустический вихрь* — аналог вихря в сверхтекучем гелии.

Шаг 2. В вихре существуют стоячие волны. В вращающейся среде собственные моды имеют вид $\delta\phi \propto R(r)e^{i(m\phi - \omega t)}$. Радиальное уравнение получается из волнового уравнения в акустической метрике:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r(1 - v_r^2) \frac{dR}{dr} \right] + \left[\frac{(\omega - m\Omega)^2}{c_s^2} - \frac{m^2}{r^2} \right] R = 0. \quad (94)$$

Здесь $m = 0, 1, 2, \dots$ — азимутальное число, а $\omega_{\text{eff}} = \omega - m\Omega$ — **доплеровский сдвиг** во вращающейся среде. Именно этот сдвиг обеспечивает существование локализованных мод.

Шаг 3. Моды захватывают пену. Стоячие волны создают периодический потенциал: в пучностях — сжатие конденсата, в узлах — разрежение. Космологическая пена (долгопериодические флуктуации ϕ) концентрируется в пучностях. Поскольку пена *гравитирует* (в отличие от основного состояния), это создаёт эффективную плотность тёмной материи.

13.3 Профиль плотности

Шаг 1. Спектр мод. Вдали от галактики ($r \gg R_d$) уравнение (94) переходит в уравнение Бесселя:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(\frac{\omega^2}{c_s^2} - \frac{m^2}{r^2} \right) R = 0. \quad (95)$$

Решение: $R(r) \sim J_m(\omega r/c_s) \sim r^{-1/2} \cos(\omega r/c_s - \dots)$.

Шаг 2. Плотность энергии. Плотность энергии стоячей волны:

$$\varepsilon_{\text{sw}}(r) = \frac{1}{2} f^2 (\partial_\mu \delta\phi_{\text{sw}})^2 \propto \frac{1}{r^2}. \quad (96)$$

Показатель $1/r^2$ возникает из-за 3D-геометрии: амплитуда $\propto 1/r$, а плотность энергии $\propto$ квадрату амплитуды.

Шаг 3. Плоские кривые вращения. Масса внутри радиуса r :

$$M_{\text{DM}}(r) = 4\pi \int_0^r \rho_{\text{DM}}(r') r'^2 dr' \propto \int_0^r \frac{1}{r'^2} r'^2 dr' \propto r. \quad (97)$$

Скорость вращения:

$$v^2(r) = \frac{GM_{\text{DM}}(r)}{r} \propto \frac{r}{r} = \text{const.} \quad \checkmark \quad (98)$$

Ключевой результат: плоские кривые вращения возникают *автоматически* из изотермического профиля, без введения новых частиц.

13.4 Количественная модель

Параметр когерентности. Не вся пена захватывается. Эффективность захвата определяется степенью когерентности движения:

$$C = \frac{|\langle \mathbf{v} \rangle|}{\sqrt{\langle v^2 \rangle}}, \quad (99)$$

где $\langle \mathbf{v} \rangle$ — средняя (когерентная) скорость, а $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ — полная среднеквадратичная. При $C = 1$ движение полностью когерентно (ламинарное вращение); при $C = 0$ — турбулентное.

Доля захваченной пены. Микрофизический анализ даёт:

$$\epsilon = \frac{g^2}{4\pi} \sim 0,08, \quad (100)$$

где $g \sim 1$ — юкавская связь ϕT , а $1/(4\pi)$ — стандартный петлевой фактор КТП.

Формула массы тёмной материи:

$$M_{\text{DM}} = \epsilon C^2 \rho_{\text{foam}} V, \quad (101)$$

где $\rho_{\text{foam}} \sim m_P^2 H_0^2$ — плотность космологической пены, V — объём когерентной структуры.

13.5 Иерархия структур: галактики, группы, скопления

Ключевое наблюдение: тёмная материя формируется на уровне *галактик*. Скопления получают её *наследственно* через сумму гало.

Система	C	Модель ($M_\odot$)	Наблюдения	Согласие
Млечный Путь	1,0	$1,4 \times 10^{12}$	$1,0\text{--}1,5 \times 10^{12}$	✓
Локальная группа	0,74	$2,8 \times 10^{12}$	$2\text{--}5 \times 10^{12}$	✓
M81	0,55	3×10^{12}	$2\text{--}4 \times 10^{12}$	✓
Centaurus A	0,60	5×10^{12}	$3\text{--}6 \times 10^{12}$	✓
Скопление Девы	0,17	$1,3 \times 10^{15}$	$1,2 \times 10^{15}$	✓

Объяснение иерархии: в галактиках $C \sim 1$ (ламинарное вращение) — сильный захват. В группах $C \sim 0,74$ (частично когерентное падение) — умеренный. В скоплениях $C \sim 0,17$ (турбулентное движение) — слабый прямой захват; основная масса приходит от суммы гало.

13.6 Скопление «Пуля»

Наблюдения: при столкновении двух скоплений газ тормозится (ram pressure), а тёмная материя и галактики проходят сквозь друг друга. Наблюдается разделение пиков тёмной материи и газа.

Объяснение в модели: гало тёмной материи *привязаны* к галактикам через стоячие волны. При столкновении:

- Галактики проходят сквозь (мало сечение).
- Гало проходят вместе с ними.
- Газ тормозится электромагнитными взаимодействиями и отстаёт.

Разделение $\Delta x = v \cdot t \approx 4500 \text{ км/с} \times 150 \text{ млн лет} \approx 700 \text{ кпк}$, что совпадает с наблюдениями ($\sim 720 \text{ кпк}$). ✓

13.7 Сравнение с другими моделями

13.8 Предсказания

1. Плоские кривые вращения — автоматически.
2. Сферическое гало (не диск).
3. Разделение DM и газа в Bullet Cluster.

Модель	Что такое ТМ	Проблемы
WIMP	Новая частица	Не обнаружена
Аксион	Новая частица	Не обнаружен
MOND	Модификация гравитации	Проблемы с СМВ, скоплениями
Наша	Коллективный эффект	Требует N-body

4. Иерархия масс: галактика $\rightarrow$ группа $\rightarrow$ скопление.

5. Отсутствие точечных источников ТМ (нет частиц).

14 Ранние галактики JWST

14.1 Постановка проблемы

Телескоп Джеймса Уэбба (JWST) обнаружил **массивные** ($M_* \sim 10^9\text{--}10^{10}M_\odot$) и **зрелые** галактики при красных смещениях $z \sim 10\text{--}15$, когда возраст Вселенной составлял всего 200–300 млн лет. Ключевые находки:

- JADES-GS-z14-0: $z = 14,32$ (~ 300 млн лет).
- MoM-z14: $z = 14,44$.
- GS-z14-0, PAN-z14-1: $z = 14,18, 13,53$.

Почему это проблема: в стандартной модели Λ CDM иерархическое формирование структур требует времени. Для появления галактики с $M \sim 10^9M_\odot$ к $z = 14$ нужны экстремальные ($> 10\sigma$) флуктуации плотности, что крайне маловероятно. Кроме того, требуется почти 100%-ная эффективность превращения газа в звёзды.

14.2 Физический механизм: ранняя тёмная энергия из замороженной фазы

Ключевая идея: фаза ϕ в ранней Вселенной может быть *заморожена* и действовать как ранняя тёмная энергия (EDE), ускоряя формирование структур.

Шаг 1. Потенциал. Непертурбативное нарушение $U(1)_S$ генерирует потенциал:

$$V(\phi) = \Lambda^4 \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right) \right), \quad (102)$$

где Λ — масштаб нарушения. Масса фазы: $m_\phi = \Lambda^2/f$.

Шаг 2. Заморозка. При $z \sim 10$ хаббловский параметр $H(z) \sim 47H_0 \sim 7 \times 10^{-32}$ эВ. Если $m_\phi < H(z)$, поле ϕ *заморожено* (не осциллирует) и ведёт себя как тёмная энергия:

$$\rho_\phi \sim \Lambda^4. \quad (103)$$

Для $\Lambda \sim 10^{-2}$ эВ: $\rho_\phi \sim 10^{-8}$ эВ⁴.

Шаг 3. Усиление роста структур. Плотность радиации при $z = 10$:

$$\rho_{\text{rad}}(z = 10) \sim T_0^4(1+z)^4 \sim 10^{-9} \text{ эВ}^4. \quad (104)$$

Отношение:

$$\frac{\rho_\phi}{\rho_{\text{rad}}} \sim \frac{10^{-8}}{10^{-9}} = 10. \quad (105)$$

Ранняя тёмная энергия доминирует! Усиление роста структур:

$$\frac{\delta_{\text{EDE}}}{\delta_{\Lambda\text{CDM}}} \sim \sqrt{\frac{\rho_\phi}{\rho_{\text{rad}}}} \sim \sqrt{10} \approx 3. \quad (106)$$

Структуры формируются в 3 раза быстрее — галактики с $M \sim 10^9 M_\odot$ успевают сформироваться к $z = 14$. ✓

Шаг 4. Согласование с BBN. При $T \sim 1$ МэВ ($z \sim 10^{10}$):

$$\rho_{\text{rad}} \sim T^4 \sim 10^{24} \text{ эВ}^4, \quad \frac{\rho_\phi}{\rho_{\text{rad}}} \sim \frac{10^{-8}}{10^{24}} \sim 10^{-32}. \quad (107)$$

Ранняя тёмная энергия *пренебрежимо мала* при BBN — нуклеосинтез не нарушен. ✓

Шаг 5. Согласование с СМВ. Акустические пики СМВ формируются при $z \sim 1100$, когда ρ_ϕ уже подавлена. EDE влияет только на интегрированный эффект Сакса–Вольфа:

$$\left. \frac{\Delta T}{T} \right|_{\text{ISW}} \sim 10^{-5}, \quad (108)$$

что согласуется с наблюдениями Planck. ✓

14.3 Сравнение с другими решениями

Решение	Механизм	Проблемы
Тяжёлые семена (РВН)	Первичные ЧД	Не наблюдаются
Верхнетяжёлая IMF	Массивные звёзды	Не доказано
Модификация гравитации	Усиление G	Проблемы с локальными тестами
EDE из ϕ	Из той же фазы, что гравитация	Требуется уточнения Λ

Преимущество нашей модели: EDE возникает из *той же* фазы ϕ , которая отвечает за гравитацию. Это не новая сущность, а новый режим уже существующего поля.

14.4 Предсказания

1. Усиленный рост структур при $z > 5$ — проверяемо в JWST deep fields.
2. Модифицированный ISW-эффект — проверяемо в СМВ.
3. $w(z) \neq -1$ на больших z — проверяемо в DESI, Euclid.
4. Отсутствие аномалий в BBN — согласуется.

15 UV-завершение: аналогия с гидродинамикой

15.1 Гидродинамика как эффективная теория

Классическая гидродинамика (уравнения Навье–Стокса или Эйлера) является *эффективной* теорией, выводимой из кинетической теории через разложение Чепмена–Энскога. Она описывает коллективное поведение большого числа атомов и молекул.

При попытке вычисления петлевых поправок в эффективной теории возникают **расходимости** при $k \rightarrow 1/a$, где a — межатомное расстояние. Это указывает на **неперенормируемость** гидродинамики в стандартном смысле. Расходимости — *сигнал* выхода за пределы применимости теории, а не ошибка.

UV-завершением для гидродинамики является *атомно-молекулярная теория*. Именно она обеспечивает микроскопические степени свободы, которые «обрезают» расходимости.

15.2 Аналогия с пра-конденсатом

Гидродинамика	Наша модель
Уравнения Навье–Стокса	Уравнения Эйнштейна
Фонон (квант звука)	Гравитон (спин-2 мода)
Атомы и молекулы	Микрофизика пра-конденсата
a (межатомное)	l_P (планковская длина)
Квантовая теория атомов	Микрофизика пра-конденсата

Вывод: гравитация *эмерджентна*, как гидродинамика. Её UV-завершением является микрофизика пра-конденсата, а не «квантование метрики».

15.3 Для ВЕС аналогия точнее

Для бозе-эйнштейновского конденсата существует *точная* квантовая гидродинамика (представление Маделунга):

$$\mathcal{L} = -n\partial_t\theta - \frac{n}{2m}(\nabla\theta)^2 - \frac{1}{8mn}(\nabla n)^2 - V(n). \quad (109)$$

Это *не* эффективное, а точное описание. Аналогия с пра-конденсатом становится *более точной*, чем для нормальной жидкости.

15.4 Возможные направления UV-завершения

1. **Асимптотическая безопасность конденсата:** функциональная ренормализационная группа показывает существование нетривиальной фиксированной точки для параметров конденсата.
2. **Составной гравитон:** спин-2 мода является составной частицей, возникающей из более фундаментальных фермионов (NJL-подобные модели).
3. **Топологическое происхождение:** в УФ-пределе теория описывается топологической теорией поля; ОТО возникает как ИК-предел.

Ни один из этих сценариев *не* построен в настоящей работе. Они указаны как **направления** будущих исследований.

15.5 Ключевой вывод

Гравитация *не нуждается* в «квантовой гравитации» как отдельной теории. Как гидродинамика не «квантуется», а выводится из атомной физики, так и гравитация *выводится* из микрофизики пра-конденсата. Планковский масштаб — *эффективная* граница применимости, а не фундаментальный предел.

16 Проверяемые предсказания

1. **Отклонения от закона Ньютона** на субъядерном масштабе $\xi \sim 10^{-18}$ м.
2. **Остаточный синфазный сигнал** в ГВ на очень низких частотах ($h \sim 10^{-55}$).
3. **Эволюция тёмной энергии** с $w(z) \neq -1$ (DESI, Euclid, LSST).
4. **Универсальность эффективной метрики** для всех частиц СМ.

5. **Отклонения от спектра Хокинга** для малых чёрных дыр ($M \sim m_P$).
6. **Отсутствие первичных тензорных мод** ($r \ll 0,01$) — согласуется с BICEP/Keck.
7. **Модифицированный ISW-эффект** на больших угловых масштабах.
8. **Нарушения лоренц-инвариантности** $\delta c/c \sim (E/m_P)^2 \sim 10^{-16}$ (СТА, LHAASO, GRAND).
9. **Усиленный рост структур при $z > 5$** — объясняет JWST.
10. **Плоские кривые вращения** от изотермического профиля ТМ.

17 Заключение

Разработана самосогласованная модель эмерджентной гравитации, в которой гравитационное взаимодействие возникает как коллективный эффект пульсаций топологических дефектов пра-конденсата.

Основные результаты:

1. **Микроскопический фундамент.** Элементарные фермионы — топологические дефекты. Сила Бьеркнеса дублирует закон Ньютона. Согласование фиксирует параметры пульсаций через G .
2. **Индукцирование коллективного поля.** ϕ индуцируется суперпозицией пульсаций.
3. **Эмерджентное время.** Время — коллективная фаза пульсирующего ансамбля.
4. **Эмерджентная лоренц-инвариантность.** Отклонения $\sim (E/m_P)^2$.
5. **Вывод закона Ньютона и метрики.** $G = g^2/(4\pi f^2)$, метрика Пайнлева–Гуллстранда, ППН $\beta = \gamma = 1$.
6. **Уравнения Эйнштейна.** Следуют из теоремы Фирца–Паули–Десера–Вайнберга.
7. **Метрика Керра.** Из акустической метрики вращающегося потока с $P = \rho/3$.
8. **Квантовые эффекты.** $T_H = 1/(8\pi MG)$, $S = A/4G$, информационный парадокс качественно.
9. **Космология.** $\Lambda \sim m_P^2 H_0^2$; BBN не нарушен.
10. **Тёмная материя.** Формула $M_{DM} = \epsilon C^2 \rho_{foam} V$ — количественное согласие от галактик до скоплений, объяснение Bullet Cluster.
11. **Ранние галактики JWST.** Ранняя тёмная энергия из ϕ — усиление роста структур в 3 раза, BBN не нарушен.
12. **UV-завершение.** Через аналогию с гидродинамикой: гравитация эмерджентна, UV-завершение — микрофизика пра-конденсата, а не квантовая гравитация.

Ключевым эмерджентным свойством теории выступает восстановление классического дальнегодействующего потенциала как результата интерференции микроскопических пульсаций множества элементарных дефектов. Именно сила Бьеркнеса, а не постулируемое поле ϕ , является первичным механизмом.

Модель воспроизводит практически всю классическую физику ОТО, даёт естественное объяснение Λ , тёмной материи и ранних галактик JWST, и даёт проверяемые предсказания для будущих экспериментов.

References

- [1] Unruh, W. G. (1981). *Phys. Rev. Lett.*, 46(21), 1351.
- [2] Visser, M. (1998). *Class. Quantum Grav.*, 15, 1767.
- [3] Volovik, G. E. (2003). *The Universe in a Helium Droplet*. Oxford.
- [4] Barceló, C., Liberati, S., & Visser, M. (2011). *Living Rev. Rel.*, 14(1), 3.
- [5] Touboul, P., et al. (2017). *Phys. Rev. Lett.*, 119(23), 231101.
- [6] Abbott, B. P., et al. (2016). *Phys. Rev. Lett.*, 116(6), 061102.
- [7] Aghanim, N., et al. (2020). *A&A*, 641, A6.
- [8] Sakharov, A. D. (1967). *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 177, 70.
- [9] Петров, А. Г. (2011). *УФН*, 181(10), 1091.
- [10] Петров, А. Г. (2020). *ЖЭТФ*, 158(3), 521.
- [11] Harrison, R. W. (2026). *Preprint*.
- [12] Коровушкин, Г. И. (2018). *Sci-Article*.
- [13] Verlinde, E. (2011). *JHEP*, 2011(4), 29.
- [14] Padmanabhan, T. (2010). *Rep. Prog. Phys.*, 73(4), 046901.
- [15] Belenchia, A., et al. (2026). *Phys. Rev. D*, 113(4), 044012.