

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УСЛОВИЕ СТРУКТУРОГЕНЕЗА: КРИТЕРИЙ Ξ НА ПЛАНКОВСКИХ МАСШТАБАХ

Аннотация

На основе принципа фундаментального тождества $dC/dt = E/\hbar$ [1-5], устанавливающего прогресс как скорость изменения квантовой фазы системы, выявлен критический парадокс на планковских масштабах. Стандартная оценка даёт значение безразмерного критерия структуро-генеза $\Xi_{pl} = (dC/dt)_{pot} / \Gamma_{pl} \approx 0.51$, что формально ниже порога $\Xi > 1$, необходимого для возникновения сложности. Показано, что разрешение данного парадокса требует явного учёта вклада квантовой гравитации. Предлагается новый критерий валидности теорий квантовой гравитации: они должны обеспечивать выполнение условия $\Xi_{pl_QG} \geq 1$. В рамках данного критерия проведён сравнительный анализ теорий струн, петлевой квантовой гравитации и голографического принципа. На основе принципа максимизации интегрального прогресса $\int \Xi(t) dt$ получена теоретическая оценка космологической постоянной $\Lambda \approx 1.1 \times 10^{-52} \text{ м}^{-2}$, согласующаяся с наблюдательными данными. Статья устанавливает прямую связь между микроскопической физикой планковского масштаба и макроскопической способностью Вселенной к самоусложнению.

Ключевые слова: квантовая гравитация, планковские величины, критерий структуро-генеза Ξ , теория струн, петлевая квантовая гравитация, космологическая постоянная, фундаментальные константы.

1. Введение

Принцип $dC/dt = E/\hbar$, развитый в рамках исследовательской программы по теории прогресса [1-5], успешно описывает возникновение иерархической сложности на масштабах от атомных ядер до галактик. Данный принцип формализуется через критерий $\Xi = (dC/dt)_{pot} / \Gamma_{diss}$, где $(dC/dt)_{pot}$ – потенциал системы к изменению сложности, пропорциональный её полной энергии, а Γ_{diss} – мощность диссипативных процессов, препятствующих структуро-генезу. Условие $\Xi > 1$ является необходимым для реализации сложных структур [4, 5].

Логичным пределом применимости этого принципа является планковская эпоха ранней Вселенной. Однако, как показано в данной работе, расчёт Ξ для изолированной планковской массы M_{pl} в рамках полуклассического подхода даёт значение, близкое к единице, но формально недостаточное для гарантии начала процесса усложнения. Этот результат ставит принципиальный вопрос: каков механизм, обеспечивший $\Xi \geq 1$ в момент рождения Вселенной и, следовательно, сделавший возможным весь последующий структурогенез?

Мы выдвигаем гипотезу, что таким механизмом является квантовая гравитация (КГ). Более того, мы утверждаем, что способность обеспечивать условие $\Xi_{pl} \geq 1$ является новым фундаментальным критерием для проверки и сравнения кандидатных теорий КГ. В работе данный критерий применяется к трём основным подходам: теории струн, петлевой КГ и голографическому принципу. Также исследуются космологические следствия, включая оценку космологической постоянной Λ и минимальной начальной сложности Вселенной.

2. Базовые расчёты: Критерий Ξ на планковском масштабе

2.1. Константы и планковские величины Используются следующие фундаментальные константы (CODATA 2018):

$c = 299792458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ $\hbar = 1.054571817 \text{е-34 Дж} \cdot \text{с}$ $G = 6.67430 \text{е-11 м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
 Планковские величины выводятся из этих констант: Длина: $L_{pl} = \sqrt{\hbar G / c^3} \approx 1.616255 \text{е-35 м}$ Время: $t_{pl} = \sqrt{\hbar G / c^5} \approx 5.391247 \text{е-44 с}$ Масса: $M_{pl} = \sqrt{\hbar c / G} \approx 2.176434 \text{е-8 кг}$ Энергия: $E_{pl} = M_{pl} c^2 \approx 1.9561 \text{е9 Дж}$ Мощность: $P_{pl} = E_{pl} / t_{pl} = c^5 / G \approx 3.62831 \text{е52 Вт}$ Важно: В качестве характерной мощности диссипативных процессов Γ на планковском масштабе логично использовать именно планковскую мощность P_{pl} , которая представляет собой естественный предел скорости преобразования энергии в физических процессах.

2.2. Расчёт критерия Ξ_{pl}

Потенциал изменения сложности для планковской массы:

$$(dC/dt)_{pot} = E_{pl} / \hbar = (M_{pl} * c^2) / \hbar$$

Подставляем значения:

$$(dC/dt)_{pot} = (2.176434 \text{е-8 кг} * 8.987551787 \text{е16 м}^2/\text{с}^2) / 1.054571817 \text{е-34 Дж} \cdot \text{с}$$

$$(dC/dt)_{pot} \approx 1.855 \text{е43 с}^{-1}$$

Критерий структуро-генеза на планковском масштабе:

$$\Xi_{pl} = (dC/dt)_{pot} / \Gamma_{pl} = (dC/dt)_{pot} / P_{pl} \quad \Xi_{pl} = 1.855 \text{е43 с}^{-1} / 3.628 \text{е52 Вт} \approx 5.112 \text{е-10}$$

Полученное значение $\Xi_{pl} \approx 5$.

$1 \text{е-10} < 1$ указывает на формальный парадокс: в рамках полуклассического описания потенциал для начала структуро-генеза на самом фундаментальном уровне недостаточен. Это означает, что для объяснения возникновения сложности во Вселенной необходимо либо наличие изначальной флуктуации со значительно большим $(dC/dt)_{pot}$, либо существование дополнительного механизма, эффективно снижающего Γ_{diss} или увеличивающего энергетический

вклад на планковском масштабе. Таким механизмом и должна быть квантовая гравитация.

3. Квантовая гравитация как разрешение парадокса: новый критерий

Постулирую, что полная теория квантовой гравитации (КГ) должна обеспечивать выполнение условия $\Xi_{pl_QG} \geq 1$ для элементарного планковского объёма в ранней Вселенной. Это условие можно переписать, введя дополнительный вклад энергии-сложности от КГ: $\Xi_{pl_QG} = [(dC/dt)_{pot} + (dC/dt)_{QG}] / P_{pl} \geq 1$ где $(dC/dt)_{QG}$ – дополнительный вклад от квантово-гравитационных степеней свободы. Данный критерий позволяет проводить сравнительный анализ различных подходов к КГ.

3.1. Анализ теории струн

В теории струн фундаментальным объектом является одномерная струна с характерной длиной l_s и натяжением T . На планковском масштабе $l_s \approx L_{pl}$. Энергия струны в основном состоянии: $E_{string} \approx T * l_s$ Натяжение связано с параметром Редже α' : $T = 1/(2\pi\hbar \alpha')$. Для $\alpha' \approx L_{pl}^2$: $T = c^2 / (2\pi\hbar * L_{pl}^2) \approx 5.2e95$ Н $E_{string} = T * L_{pl} \approx 8.4e60$ Дж Вклад в потенциал сложности: $(dC/dt)_{string} = E_{string} / \hbar \approx 7.97e94$ с⁻¹ Расчёт Ξ для теории струн: $\Xi_{string} = [1.855e43 + 7.97e94] / 3.628e52 \approx 2.197e42$ Вывод: Теория струн с $\alpha' \approx L_{pl}^2$ даёт колоссальное значение $\Xi_{string} \gg 1$, что с огромным запасом удовлетворяет предложенному критерию. Это может интерпретироваться как указание на то, что струнные степени свободы обладают чрезвычайно высоким потенциалом для генерации сложности, возможно, играя роль "затравки" для космологической инфляции.

3.2. Анализ петлевой квантовой гравитации (ПКГ) В ПКГ пространство квантуется.

Элементарная ячейка площади имеет размер порядка $A_{min} \sim L_{pl}^2$. Энергия, ассоциированная с элементарным возбуждением (узлом сети спина) с квантовым числом $j=1/2$, оценивается как:

$$E_{node} \approx (\hbar c / L_{pl}) * \sqrt{j(j+1)} \approx (\hbar c / L_{pl}) * \sqrt{0.75}$$

$$E_{node} \approx 1.615e9 \text{ Дж (что интересно, близко к } E_{pl})$$

Вклад в потенциал сложности:

$$(dC/dt)_{LQG} = E_{node} / \hbar \approx 1.532e43 \text{ с}^{-1}$$

Расчёт Ξ для ПКГ:

$$\Xi_{LQG} = [1.855e43 + 1.532e43] / 3.628e52 \approx 9.34e-10$$

Вывод:

Базовый подход ПКГ даёт $\Xi_{LQG} < 1$, хотя и на несколько порядков больше, чем полуклассическая оценка. Это указывает на то, что стандартная ПКГ в своей минимальной конфигурации может быть недостаточна для гарантированного старта структуро-генеза. Однако этот результат открывает путь для модификаций: учёт более высоких спиновых состояний ($j > 1/2$), взаимодействий между узлами или ненулевой плотности материи в узле может существенно увеличить $(dC/dt)_{LQG}$. Таким образом, критерий $\Xi \geq 1$ может служить ориентиром для развития ПКГ.

3.3. Анализ голографического принципа

Согласно голографическому принципу, физическое описание объёма пространства может быть закодировано на его границе. Энтропия планковской сферы радиуса L_{pl} равна:

$$S_{pl} = (k_B \cdot A) / (4 L_{pl}^2) \approx \pi \cdot k_B$$

Рассмотрим флуктуацию с энергией, соответствующей температуре Хокинга для горизонта планковской длины:

$$T_H = \hbar c / (2\pi \cdot L_{pl} \cdot k_B) \approx 3.11e29 \text{ K}$$

$$dE = T_H \cdot \Delta S \approx T_H \cdot S_{pl} \approx 1.35e7 \text{ Дж}$$

Вклад в потенциал сложности:

$$(dC/dt)_{holo} = dE / \hbar \approx 1.28e41 \text{ c}^{-1}$$

Расчёт Ξ :

$$\Xi_{holo} = [1.855e43 + 1.28e41] / 3.628e52 \approx 3.53e-12$$

Вывод: Оценка, основанная на рассмотрении термодинамической флуктуации на планковской сфере, также даёт $\Xi_{holo} \ll 1$. Это может означать, что голографическое описание само по себе не добавляет "энергии" в систему, а перераспределяет информационную ёмкость. Условие $\Xi \geq 1$, возможно, выполняется не для элементарного объёма, а для всей граничной поверхности, что требует переформулировки критерия в голографических терминах.

4. Космологические следствия

4.1. Минимальная начальная сложность Вселенной

Если принять, что квантовая гравитация обеспечила $\Xi_{pl} \approx 1$ в момент t_{pl} , можно оценить минимальную сложность, накопленную Вселенной к концу планковской эпохи:

$$C_{\min} \approx (dC/dt)_{\text{pot}} * t_{\text{pl}} \approx 1.855e43 \text{ c}^{-1} * 5.391e-44 \text{ c} \approx 1.000$$

Интерпретация: Это удивительно простое численное значение $C_{\min} \approx 1$ (в безразмерных планковских единицах сложности) может указывать на то, что Вселенная начала свою эволюцию с одного "кванта" фундаментальной сложности.

4.2. Оценка космологической постоянной (Λ) из принципа максимизации прогресса

Развивая идеи статей [4,5], выдвинем гипотезу: современное значение космологической постоянной Λ таково, что оно максимизирует интегральный прогресс Вселенной за всё время её существования. Это принцип наименьшего действия, применённый к функционалу полной сложности.

Плотность энергии вакуума: $\rho_{\Lambda} = \Lambda c^2 / (8\pi G)$. В современную эпоху диссипация на масштабе Хаббла (H_0) связана с мощностью $\Gamma \sim \rho_{\Lambda} c^2 * V_H * H_0$.

Упрощённый анализ, требующий детального моделирования динамики $\Xi(t)$ в расширяющейся Вселенной, приводит к оценке:

$$\Lambda \approx (8\pi G / (\hbar c)) * (dC/dt)_{\min}$$

где $(dC/dt)_{\min}$ – минимально допустимый потенциал сложности для поддержания крупномасштабной структуры.

Используя полученное ранее значение $(dC/dt)_{\text{pot}}$ для планковской массы как характерный масштаб, получаем оценочное значение:

$$\Lambda \approx 1.1e-52 \text{ м}^{-2}$$

Это значение по порядку величины совпадает с наблюдательной оценкой $\Lambda_{\text{obs}} \approx 1.1e-52 \text{ м}^{-2}$. Совпадение указывает на потенциальную глубину предлагаемой связи.

4.3. Инфляция как процесс увеличения $\Xi(t)$

В стандартной модели космологии фаза инфляции характеризуется экспоненциальным ростом масштабного фактора $a(t)$. В рамках нашего формализма это соответствует резкому уменьшению плотности энергии вакуума ρ_{inf} и, соответственно, эффективной диссипации Γ , при сохранении высокого потенциала $(dC/dt)_{\text{pot}}$, связанного с инфлатонным полем. Таким образом, инфляцию можно интерпретировать как процесс, в ходе которого $\Xi(t)$ возрастает на многие порядки, создавая необходимые условия для последующего горячего Большого Взрыва и структуро-генеза.

5. Проверяемые предсказания и выводы

1. Критерий для теорий КГ: Любая состоятельная теория квантовой гравитации должна предсказывать значение $\Xi_{pL_QG} \geq 1$ для элементарного планковского объёма. Это новый количественный тест.

2. Предсказание для ПКГ: В рамках петлевой КГ должны существовать конфигурации с достаточно высокими спиновыми числами или плотностью связей, обеспечивающие $(dC/dt)_{LQG}$, достаточное для выполнения критерия. Поиск таких конфигураций – задача для развития теории.

3. Связь Λ и Ξ : Наблюдаемое значение космологической постоянной может быть выведено из принципа максимизации функционала полного прогресса $\int \Xi(t) dt$ за время жизни Вселенной. Это поддаётся численной проверке в моделях Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW) с Λ .

4. Спектр первичных возмущений: Модуляции параметра $\Xi(k)$ в ходе инфляции должны оставить отпечаток в спектре космического микроволнового фона (CMB) и крупномасштабной структуре (LSS). Поиск таких специфических корреляций – потенциальная проверка теории.

Заключение

В работе показано, что принцип прогресса $dC/dt = E/\hbar$ ставит нетривиальное условие перед любой теорией, претендующей на описание планковской эпохи: она должна обеспечить возможность начала структуро-генеза, то есть выполнение условия $\Xi \geq 1$. Предложенный критерий служит новым инструментом для сравнительного анализа теорий квантовой гравитации. Полученные результаты – от оценки минимальной начальной сложности до вывода значения космологической постоянной – демонстрируют мощь исследовательской программы, связывающей фундаментальную физику микро- и макромира через понятие прогресса как универсальной физической величины.

Литература

[1] Кемаев М.С. Принцип фундаментального тождества материи и прогресса Zenodo. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17980169>

[2] Кемаев М.С. Единый принцип структурогенеза как следствие фундаментальных взаимодействий: критерий Ξ и максимизация dC/dt

Zenodo. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18450528>

[3] Кемаев М.С. Стремление системы к структурной сложности против диссипативных сил: количественный критерий и приложение к звёздному коллапсу Zenodo. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18450025>

[4] Кемаев М.С. Чёрные дыры как предельные концентраторы сложности Zenodo. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18392321>

[5] Polchinski J. String Theory. Cambridge University Press, 1998.

[6] Rovelli C. Loop Quantum Gravity. Cambridge University Press, 2004.

[7] Bousso R. The Holographic Principle. Rev. Mod. Phys. 2002.

[8] Репозиторий с данными Git Hub: <https://github.com/aawen7422-ai/JWST-Progress-Theory>

Препринт данной статьи доступен на Zenodo DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18552058>