

# КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УСЛОВИЕ СТРУКТУРОГЕНЕЗА: КРИТЕРИЙ $\Xi$ 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 голограмического 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  $\Xi$ , 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  $\Gamma_{diss}$  – 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  $\Xi$  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  $\Lambda$  и минимальной начальной сложности Вселенной.

## 2. Базовые расчёты: Критерий $\Xi$ на планковском масштабе

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

$$c = 299792458 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1} \quad \hbar = 1.054571817e-34 \text{ Дж}\cdot\text{с} \quad G = 6.67430e-11 \text{ м}^3\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-2}$$

Планковские величины выводятся из этих констант: Длина:  $L_{pl} = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 1.616255e-35$  м Время:  $t_{pl} = \sqrt{\hbar G/c^5} \approx 5.391247e-44$  с Масса:  $M_{pl} = \sqrt{\hbar c/G} \approx 2.176434e-8$  кг Энергия:  $E_{pl} = M_{pl} c^2 \approx 1.9561e9$  Дж Мощность:  $P_{pl} = E_{pl} / t_{pl} = c^5/G \approx 3.62831e52$  Вт Важно: В качестве характерной мощности диссипативных процессов  $\Gamma$  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 $\Xi_{pl}$

Потенциал изменения сложности для планковской массы:

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

Подставляем значения:

$$(dC/dt)_{pot} = (2.176434e-8 \text{ кг} * 8.987551787e16 \text{ м}^2/\text{с}^2) / 1.054571817e-34 \text{ Дж}\cdot\text{с}$$
$$(dC/dt)_{pot} \approx 1.855e43 \text{ с}^{-1}$$

Критерий структуро-генеза на планковском масштабе:

$$\Xi_{pl} = (dC/dt)_{pot} / \Gamma_{pl} = (dC/dt)_{pot} / P_{pl} \quad \Xi_{pl} = 1.855e43 \text{ с}^{-1} / 3.628e52 \text{ Вт} \approx 5.112e-10$$

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

$1e-10 < 1$  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 флукутации со значительно большим  $(dC/dt)_{pot}$ , либо существование дополнительного механизма, эффективно снижающего  $\Gamma_{diss}$  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 кванто-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  $a'$ :  $T = 1/(2\pi\hbar a')$ . Для  $a' \approx L_{pl}^2$ :  $T = c^2 / (2\pi\hbar * L_{pl}^2) \approx 5.2e95$  Н  $E_{string} = T * L_{pl} \approx 8.4e60$  Дж Вклад в потенциал сложности:  $(dC/dt)_{string} = E_{string} / \hbar \approx 7.97e94 \text{ c}^{-1}$  Расчёт  $\Xi$  для теории струн:  $\Xi_{string} = [1.855e43 + 7.97e94] / 3.628e52 \approx 2.197e42$  Вывод: Теория струн с  $a' \approx L_{pl}^2$  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:

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

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

Вклад в потенциал сложности:

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

Расчёт  $\Xi$  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:

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

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

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

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

Вклад в потенциал сложности:

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

Расчёт  $\Xi$ :

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

**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:

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

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 ( $\Lambda$ ) из принципа максимизации прогресса

Развивая идеи статей [4,5], выдвинем гипотезу: современное значение космологической постоянной  $\Lambda$  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  $\rho_{\text{inf}}$  и, соответственно, эффективной диссипации  $\Gamma$ , 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  $\Lambda$  и  $\Xi$ : 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  $\Lambda$ .
4. Спектр первичных возмущений: Модуляции параметра  $\Xi(k)$  в ходе инфляции должны оставить отпечаток в спектре космического микроволнового фона (СМВ) 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  $\Xi$  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>