

Квантовая гравитация: Дискретная Структура Пространства-Времени

Автор: Мельниченко Юрий Евстафиевич

Индивидуальный исследователь

Аннотация

В работе предложена модель квантовой гравитации, основанная на гипотезе о дискретной структуре пространства-времени на планковском масштабе. В отличие от альтернативных подходов (петлевой квантовой гравитации, теории струн), модель не требует введения дополнительных измерений и сохраняет ковариантность уравнений общей теории относительности (ОТО). Ключевой элемент - квантовая поправка к тензору Эйнштейна, зависящая от натурального ряда целых чисел. Модель предсказывает наблюдаемые эффекты: отклонения от закона Ньютона на субмиллиметровых расстояниях, квантовые осцилляции гравитационного поля и аномалии в спектрах компактных астрофизических объектов.

Ключевые слова: квантовая гравитация, планковские единицы, дискретное пространство-время, гравитон, тензор Эйнштейна.

1. Введение

Квантовая гравитация остаётся одной из ключевых нерешённых проблем фундаментальной физики. Её суть — в **несогласованности** двух парадигм:

- **ОТО** (А. Эйнштейн) описывает гравитацию как искривление гладкого, непрерывного пространства-времени;
- **квантовая механика** (М. Планк, П. Дирак, Н. Бор) оперирует дискретными величинами и вероятностными процессами.

Основные противоречия:

1. **Сингулярности в ОТО** - точки, где физические величины стремятся к бесконечности (например, в центре чёрной дыры), что несовместимо с квантовым описанием.
2. **Отсутствие квантования гравитации** в Стандартную модель физики элементарных частиц.
3. **Планковский масштаб** - энергии, необходимые для прямого исследования квантовой гравитации ($E_p \sim 10^{19}$ ГэВ), недостижимы в современных экспериментах.

Существующие подходы

- **Петлевая квантовая гравитация** - пространство-время состоит из «спиновых сетей» на планковском масштабе.
- **Теория струн/М-теория** - элементарные частицы представлены колебаниями струн в многомерном пространстве.
- **Асимптотическая безопасность** - поиск фиксированной точки в пространстве параметров теории.
- **Причинная динамическая триангуляция** - моделирование пространства-времени как набора дискретных симплексов.

Цель данной работы - предложить альтернативную модель, сохраняющую математическую строгость ОТО и допускающую экспериментальную проверку на доступных энергетических масштабах.

2. Фундаментальные основы

2.1. Планковские единицы как кванты массы, пространства-времени

Макс Планк вывел фундаментальные единицы длины, времени и массы через фундаментальные константы:

$$\mu = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \quad \lambda = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \quad \tau = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$$

где:

- \hbar - постоянная Планка,
- G - гравитационная постоянная,
- c - скорость света.

Эти величины **инвариантны**, соответственно и результаты расчётов, полученных с использованием этих констант, не могут не быть инвариантными и должны интерпретироваться как минимальные кванты пространства, времени и массы.

2.2. Квантование гравитационного потенциала

Рассмотрим постоянную Планка в интерпретации Дирака, записанную в виде квантовых сумм:

$$\hbar = \frac{\mu}{n} \cdot \frac{(n\lambda)^2}{n\tau} \quad n = 1, 2, 3 \dots N$$

Преобразуем это выражение в волновую функцию гравитационного поля:

$$\Psi_{gn} = \hbar \cdot \frac{1}{n\tau} = \mu c^2 \cdot \frac{1}{n} \quad n = 1, 2, 3 \dots N$$

Дифференциал функции:

$$\Delta\Psi_{gn} = \mu c^2 \frac{1}{n(n+1)}$$

После простейших преобразований получаем:

$$\Delta\Psi_{gn} = \frac{\mu c^2}{n(n+1)} \cdot \frac{2\lambda}{2\lambda} \rightarrow \left\{ 2\lambda \frac{n(n+1)}{2} = 2\lambda \sum_{k=1}^n k = r_n \right\} \rightarrow \frac{\mu c^2 \lambda}{r} = \left(\frac{\mu \lambda^3}{\tau^2} \right) \cdot \frac{1}{r}$$

Приводя это выражение метрическим единицам, приходим к **гравитационному потенциалу Ньютона**:

$$\frac{\lambda^3}{\tau^2 \mu} \cdot \frac{m}{r} = G \frac{m}{r}$$

Вывод: гравитационный потенциал квантуется через натуральный ряд **N**, что задаёт дискретную структуру поля.

2.3. Максимальная плотность энергии

Инвариантность планковских величин влечёт существование **максимально допустимой плотности энергии**:

$$\rho_{max} = \frac{\mu c^2}{\lambda^3}$$

Это устраняет сингулярности ОТО и предполагает существование **квази-чёрных дыр** с горизонтом событий, определяемым модифицированным уравнением Шварцшильда.

3. Формализм

3.1. Постулат о дискретной структуре

Гравитация рассматривается как **материальное поле** в пространстве Минковского, представленное в виде слегка деформированной «кристаллической» решётки. Каждый узел решётки описывается волновой функцией, зависящей от целого числа **N**.

3.2. Модифицированное уравнение Эйнштейна

Предложим квантовую поправку к тензору Эйнштейна:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu} + \Lambda_{\mu\nu(n)})$$

где:

- $G_{\mu\nu}$ - геометрическая часть тензора;
- $T_{\mu\nu}$ - тензор энергии импульса материи;
- $\Lambda_{\mu\nu(n)}$ - квантовая поправка, зависящая от номера энергетического уровня «**N**».

$$\Lambda_{\mu\nu(n)} = \lambda_k \sum_{k=1}^n k f_{\mu\nu(k)}$$

где:

- k - номера изучаемых уровней;
- $f_{\mu\nu(k)}$ - тензоры, описывающий локальные деформации решётки пространства-времени на уровне k

Свойства поправки:

1. Сохраняет ковариантность уравнений.
2. Обеспечивает переход к ОТО при $n \rightarrow N \sim \infty$.
3. Вводит квантование через натуральный ряд.

4. Физическая интерпретация

4.1. Гравитон как квант поля

Гравитон возникает при взаимодействии частиц как **суперпозиция встречных волн**. Его волновая функция:

$$\Psi_{g(rt)} = \hbar \frac{1}{\sqrt{2}} \{ e^{i(kr-\omega t)} + e^{-i(kr-\omega t)} \}$$

где:

- $k = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ - волновое число гравитона,
- $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda_g}$ - циклическая частота,
- $\lambda_g = \alpha r$ - длина волны гравитона ($\alpha \approx 1$),
- r - расстояние между источниками гравитационного поля,
- t - координатное время (пт).

Характеристики гравитона:

- Собственная энергия равна нулю - признак бозона.
- Энергия гравитона $\varepsilon_g = \hbar\omega = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda_g} \approx \frac{2\pi\hbar c}{r_n}$
- При $r = \lambda n(n + 1)$ (расстояние кратно планковской длине): $\varepsilon_g = \frac{\mu c^2}{n(n+1)}$.
- Энергия убывает с расстоянием — гравитон «исчезает» на больших масштабах.

Волновая функция гравитона входит в тензорную поправку $\Lambda_{\mu\nu(n)}$ через соотношение:

$$\Lambda_{\mu\nu(n)} \sim |\Psi_g|^2 T_{\mu\nu}$$

что обеспечивает:

- ковариантность поправки;
- обращение в ноль при стремлении n к N эквиваленту ∞ (переход к ОТО);
- дискретные осцилляции поля при малых n .

5. Динамика частиц в дискретной структуре пространства-времени

5.1. Квант времени и координатное время

Квант времени уже введён в разделе «Фундаментальные основы». Теперь введём понятие «**координатное время t** » (переменная), связанная с планковским временем через натуральное число n :

$$t = n\tau \quad n = 1, 2, 3, \dots, N$$

Физический смысл n :

- n - номер энергетического уровня узла решётки, в котором находится частица;
- при переходе между узлами n изменяется на ± 1 ;
- координатное время t растёт ступенчато: каждый «шаг» соответствует одному кванту τ .

Примечание. В отличие от собственного времени в ОТО (скаляр Лоренца), здесь время выступает как **параметр эволюции** дискретной системы — метка последовательности квантовых состояний решётки.

5.2. Уравнение движения

Уравнение движения записывается через производные по координатному времени t :

$$F_{kb(n)}^\mu = \frac{d^2 x^\mu}{dt^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{dt} \frac{dx^\beta}{dt}$$

Обозначения:

- $x_{(t)}^\mu$ - координаты частицы как функции координатного времени;
- $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ - символы Кристоффеля (описывают искривление пространства-времени);
- $F_{kb(n)}^\mu$ - квантовая сила, зависящая от номера уровня n .

5.3. Квантовая сила

Квантовая сила возникает из-за взаимодействия частицы с дискретной структурой решётки:

$$F_{kb(n)}^\mu = k \cdot \nabla^\mu \Lambda_{\alpha\beta(n)},$$

где:

- k - константа связи (определяется из размерностного анализа);

- ∇^μ - ковариантная производная;
- $\Lambda_{\alpha\beta(n)}$ - тензорная функция, описывающая локальную деформацию решётки на уровне n .

Свойства квантовой силы:

1. **Дискретность:** сила меняется скачкообразно при переходе между узлами решётки.
2. **Обращение в ноль при $n \rightarrow \infty$:** в макроскопическом пределе квантовые эффекты исчезают.
3. **Ковариантность:** поскольку $\Lambda_{\alpha\beta(n)}$ - тензор, сила также является тензором.

5.4. Размерностный анализ

Для согласования размерностей константа k должна иметь размерность $\frac{M^4}{сек^2}$.

5.5. Предельный переход к ОТО

При $n \rightarrow \infty$:

- шаг решётки становится пренебрежимо малым;
- координатное время t переходит в непрерывное собственное время ОТО;
- квантовая сила становится равной 0;
- уравнение движения сводится к геодезическому:

$$F_{kb(n)}^\mu = \frac{d^2 x^\mu}{dt^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{dt} \frac{dx^\beta}{dt} = 0$$

6. Экспериментальные предсказания

6.1. Отклонения от закона Ньютона

На расстояниях близких к одному кванту ожидаются поправки к гравитационному потенциалу:

$$V_{(r)} = -G \frac{m}{r} \left(1 + \alpha e^{-\frac{r}{r_0}} \right)$$

Где α и r_0 - параметры, связанные с квантовой структурой решётки.

Ожидаемый масштаб эффектов:

- При $r \sim 10^{-6}$ м отклонения могут достигать от 10^{-10} от ньютоновского значения.
- Для детектирования подходят атомные интерферометры или микромеханические осцилляторы.

6.2. Квантовые осцилляции гравитационного поля

При переходе частицы между энергетическими уровнями должно возникать излучение гравитонов с частотой:

$$\nu_{(n)} = \frac{c^2}{\lambda} \cdot \frac{1}{n(n+1)}$$

Характеристики сигнала:

- Частота: ориентировочно 1030–1040 Гц (в зависимости от n).
- Амплитуда: порядка 10^{20} - 10^{30} (относительное изменение метрики).
- Детектирование: возможно через корреляцию сигналов гравитационно-волновых обсерваторий (LIGO, Virgo) с астрофизическими событиями.

6.3. Аномалии в спектрах космических объектов

Вблизи нейтронных звёзд и чёрных дыр ожидаются:

- сдвиг линий поглощения/излучения на $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 10^{-8} \dots 10^{10}$;
- появление «запрещённых» переходов, связанных с квантованием гравитационного потенциала.

Методы наблюдения:

- Спектроскопия рентгеновских двойных систем.
- Анализ данных телескопов типа Chandra, XMM-Newton.

7. Обсуждение

7.1. Преимущества модели

1. **Устранение сингулярностей** - дискретность пространства-времени предотвращает бесконечные плотности.
2. **Единство с ОТО** - при $n \rightarrow N \approx \infty$ модель переходит в классическую теорию Эйнштейна.
3. **Физическая интерпретация планковских единиц** - λ , τ , μ выступают как реальные кванты.
4. **Экспериментальная проверяемость** - предсказания доступны для тестирования на современных установках.

7.2. Открытые вопросы

1. **Вычисление коэффициентов λ_k** требуется вывод из первых принципов.
2. **Взаимодействие с другими полями** - как объединить гравитационную решётку с электромагнитным и ядерными взаимодействиями?
3. **Динамика решётки** - каков закон эволюции $f_{\mu\nu(k)}$ во времени?
4. **Квантование времени** — как согласовать дискретное τ с непрерывностью уравнений движения?
5. **Роль константы k** — её значение требует независимого обоснования.

8. Заключение

Предложенная модель квантовой гравитации:

- сохраняет математическую строгость ОТО;
- вводит дискретную структуру пространства-времени на планковском масштабе;
- обеспечивает квантование гравитационного потенциала через натуральный ряд n ;
- предсказывает наблюдаемые эффекты на субмиллиметровых расстояниях и в астрофизических системах;
- содержит в себе решение проблемы тёмных материи и энергии

8.1. Ограничения модели

1. **Аппроксимационный характер** - квантовая поправка $\Lambda_{\mu\nu(n)}$ введена феноменологически, без вывода из первых принципов.
2. **Неполнота динамического описания** - закон эволюции тензорных функций $f_{\mu\nu(k)}$ требует дополнительного обоснования.
3. **Отсутствие унификации:** - модель не включает другие виды взаимодействия.
4. **Проблема времени** — дискретное координатное время $t=n\tau$ формально отличается от собственного времени ОТО.

5. **Неопределённость параметров** – значения α, r_0, k требуют независимой калибровки.

9. Перспективы развития

9.1. Теоретические направления

1. Вывод квантовой поправки

- Попытка получить поправку из вариационного принципа.

2. Динамика решётки

- Формулировка уравнений эволюции поля.
- Анализ устойчивости квазикристаллической структуры пространства-времени.

3. Объединение взаимодействий

- Включение электромагнитного поля через обобщение тензора энергии импульса.
- Поиск аналогов калибровочных симметрий в дискретной геометрии.

4. Квантовая космология

- Применение модели к раннему этапу эволюции Вселенной.
- Исследование возможности ухода от сингулярности Большого взрыва.

9.2. Экспериментальные проверки

1. Лабораторные тесты

- Измерение отклонений от закона Ньютона на расстояниях 10^{-6} – 10^{-3} метра.
- Использование атомных интерферометров и микромеханических осцилляторов.

2. Астрофизические наблюдения

- Поиск аномалий в спектрах нейтронных звёзд и чёрных дыр.
- Анализ данных рентгеновских обсерваторий (Chandra, XMM-Newton).

3. Гравитационно-волновые детекторы

- Корреляция сигналов LIGO/Virgo с предсказаниями о квантовых осцилляциях.
- Поиск высокочастотных гравитационных волн $\nu \sim 10^{30}$ – 10^{40} герц.

4. Космологические тесты

- Проверка предсказаний предложенной теории об отскоке и ранней Вселенной через данные реликтового излучения.
- Анализ крупномасштабной структуры Вселенной на предмет существования большого количества квази-чёрных дыр и их связи с тёмной материей.

9.3. Междисциплинарные приложения

1. Квантовые вычисления

- Моделирование дискретного пространства-времени как квантового регистра.
- Разработка алгоритмов для симуляции квантовой гравитации.

2. Информационные технологии

- Квантование пространства-времени как основа для новых протоколов фрования.
 - Связь с теорией квантовой запутанности в гравитационном поле.
-

10. Выводы

Предложенная модель:

- Предлагает **альтернативный подход** к квантовой гравитации без введения дополнительных измерений;
- Сохраняет **математическую строгость** ОТО в макроскопическом пределе;
- Вводит **физически осмысленные кванты** пространства (λ), времени (τ) и массы (μ);
- Даёт **конкретные предсказания** для экспериментальной проверки;
- Открывает **новые направления** для теоретических и прикладных исследований.

Основной тезис: дискретность пространства-времени – не математическая абстракция, а физическая реальность, доступная для наблюдения при современных технологиях. Дальнейшая разработка модели потребует синтеза теоретических усилий и экспериментальных данных, что приблизит окончательное решение одной из ключевых проблем фундаментальной физики.

Литература

1. Эйнштейн А. *Собрание научных трудов*. - М.: Наука, 1965.
2. Уилер Дж. *Геометродинамика*. - М.: Мир, 1962.
3. Пенроуз Р. *Путь к реальности*. - Ижевск: ИКИ, 2007.
4. Смолин Л. *Неприятности с физикой*. - М.: Эксмо, 2007.
5. Rovelli C. *Quantum Gravity*. - Cambridge: CUP, 2004.
6. Green M., Schwarz J., Witten E. *Superstring Theory*. - Cambridge: CUP, 1987.
7. Ashtekar A., Lewandowski J. *Background independent quantum gravity: A status report*// *Class. Quantum Grav.* - 2004. - Vol. 21. - R53–R152.
8. Amelino-Camelia G. *Quantum Gravity Phenomenology*// *Living Rev Relativ.* - 2008. - Vol. 16. - 5.
9. Planck M. *Über irreversible Strahlungsvorgänge*// *Ann. Phys.* - 1900.— Vol. 306. - S. 69–122.
10. Dirac P.A.M. *Principles of Quantum Mechanics*. - Oxford: Clarendon Press, 1958.