

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ ПРЕДЕЛ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Supplement: The Fundamental Limit of Quantum Computation (FLQC)

Сергей Матеров*, Quantumograph v14 Supplement S-1

Предисловие

Со времён Тьюринга принято считать, что ограничения вычислительных систем бывают двух видов: **алгоритмические** (некоторые задачи принципиально нерешаемы) и **инженерные** (железо несовершенно, шумит, ломается). Квантовые вычисления добавили третий вид — **сложностные**: некоторые задачи решаемы, но требуют ресурсов, растущих быстрее любого полинома.

Настоящее дополнение вводит **четвёртый вид** ограничений, прежде не описанный в литературе:

Фундаментальный предел квантовых вычислений (ФПКВ) — это предел точности любого квантового вычислительного устройства, вытекающий не из несовершенства реализации, а из дискретной структуры пространства-времени на планковском масштабе.

Этот предел не преодолевается никаким техническим прогрессом. Он не является следствием декогеренции, теплового шума или несовершенства вентиляей. Он встроен в геометрию реальности — точно так же, как скорость света встроена в структуру пространства-времени и не преодолевается никаким ускорением.

Часть I. Откуда берётся предел

1.1 Непрерывность фаз - скрытое допущение квантовых вычислений

Вся архитектура современных квантовых компьютеров опирается на одно допущение, настолько привычное, что его перестали замечать: **квантовые фазы непрерывны**.

Состояние кубита описывается как $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, где α и β — комплексные числа, принимающие любые значения на единичной окружности. Алгоритм Шора, алгоритм Гровера, квантовое преобразование Фурье - все они используют интерференцию фаз с произвольной точностью. Именно эта точность и даёт квантовое превосходство над классическими компьютерами.

Но что если фазы **не непрерывны**?

1.2 Дискретность фаз из структуры Z^4 -решётки

В Quantumograph v14 калибровочные фазы на рёбрах графа $\theta_{ij} \in [0, 2\pi)$ для группы $U(1)$ — являются физическими степенями свободы пространства-времени, а не математической абстракцией.

Минимальный шаг изменения фазы определяется структурой тора Z_L^4 :

$$\Delta\theta_{min} \sim \frac{2\pi}{L}$$

где L - число узлов вдоль каждого направления решётки. Для физического пространства-времени L огромно - порядка $\frac{L_{\text{Хаббл}}}{l_{\text{Планк}}} \sim 10^{61}$ - но **конечно**. Это означает, что фазовое пространство квантовых состояний дискретно с шагом порядка 10^{-61} радиана.

На первый взгляд — ничтожно мало и никак не влияет на практику. Но это не так.

1.3 Почему 10^{-61} радиана имеет значение

Алгоритм Шора для разложения n -битного числа требует квантового преобразования Фурье с точностью фаз $\sim \frac{2\pi}{2^n}$. При $n = 2048$ (стандартный размер криптографического ключа RSA-2048) это:

$$\Delta\theta_{\text{Шор}} \sim \frac{2\pi}{2^{2048}} \sim 10^{-617}$$

Это **на 556 порядков меньше** фундаментального шага $\Delta\theta_{min} \sim 10^{-61}$ - точность, требуемая алгоритмом Шора для взлома RSA-2048, **на сотни порядков превышает то, что допускает дискретная геометрия пространства-времени.**

Иными словами: природа не позволяет записать в фазу кубита число с такой точностью - не потому что процессор несовершенен, а потому что фазового пространства такой мелкозернистости **не существует.**

Часть II. Формальное определение

2.1 Определение ФПКВ

Определение. *Фундаментальным пределом квантовых вычислений (ФПКВ)* называется нижняя граница на погрешность фазовых операций любого физического квантового вычислительного устройства, вытекающая из конечности числа узлов пространства-времени:

$$\epsilon_{\text{ФПКВ}} \geq \frac{2\pi}{L_{\text{физ}}} \sim \frac{l_{\text{Планк}}}{L_{\text{Хаббл}}} \sim 10^{-61}$$

Эта погрешность:

- **не зависит** от температуры устройства
- **не зависит** от материала кубитов (сверхпроводники, ионные ловушки, фотоны)
- **не устраняется** кодами коррекции ошибок
- **не уменьшается** с ростом числа кубитов

Она является онтологической константой — такой же фундаментальной, как постоянная Планка \hbar или скорость света c .

2.2 Связь с критической температурой T_c

Дискретность фазового пространства проявляется только тогда, когда тепловые флуктуации становятся меньше фундаментального шага. Это задаёт критическую температуру:

$$T_c \sim \frac{\hbar \cdot \Delta\theta_{min}}{k_B} \sim 10-50 \text{ мК}$$

Выше T_c тепловой шум маскирует дискретность - фазы размыты сильнее, чем $\Delta\theta_{min}$ ФПКВ не наблюдаем. Ниже T_c дискретность начинает проявляться систематически.

Принципиально важно: T_c попадает точно в рабочий диапазон современных сверхпроводящих QPU. Это не случайное совпадение - это предсказание теории, которое можно проверить.

2.3 Иерархия ограничений квантовых вычислений

Тип ограничения	Источник	Преодолимо?
Инженерное	Несовершенство оборудования, шумы	Да. Лучшими технологиями
Термодинамическое	Декогеренция при $T > T_c$	Да. Охлаждением ниже T_c
Сложностное	Алгоритмическая сложность задачи	Частично. Квантовым ускорением
Фундаментальное (ФПКВ)	Дискретность пространства-времени	Нет — никогда

Часть III. Следствия

3.1 Алгоритм Шора и криптография

Алгоритм Шора теоретически взламывает RSA и эллиптическую криптографию за полиномиальное время. Это считается главной угрозой для современной криптографии при появлении достаточно мощных квантовых компьютеров.

ФПКВ ставит под сомнение этот тезис в его абсолютной формулировке. Взлом RSA-2048 требует точности фаз порядка 10^{-617} , тогда как природа допускает не лучше 10^{-61} . Алгоритм Шора в его теоретической форме предполагает точность, физически недостижимую - не из-за инженерных ограничений, а из-за структуры пространства-времени.

Это не означает, что квантовые компьютеры безопасны для криптографии. Это значит, что реальная угроза сложнее и интереснее, чем принято думать. Для малых ключей (512 бит и менее) ФПКВ может не играть роли; для больших его влияние необходимо оценивать.

3.2 Квантовая коррекция ошибок

Современные схемы квантовой коррекции ошибок (поверхностные коды, коды Стабилизатора) предполагают, что ошибки случайны и не коррелированы. ФПКВ предсказывает существование **систематической, не корректируемой компоненты** ошибок - не случайного шума, а детерминированного отклонения фаз от теоретических значений.

Это означает, что при достаточном масштабировании QPU коды коррекции ошибок столкнутся с “дном” — уровнем ошибок, ниже которого опуститься невозможно никакой коррекцией. Обнаружение этого “дна” при масштабировании было бы прямым экспериментальным свидетельством ФПКВ.

3.3 Квантовое моделирование физики

Есть область, где ФПКВ не является ограничением, а напротив — **преимуществом**: моделирование самой дискретной физики пространства-времени. QPU, работающий ниже T_c , сам по себе является физической реализацией фрагмента Z^4 -графа. Изучение его систематических ошибок это прямое измерение структуры пространства-времени.

Иными словами: то, что мешает вычислениям, помогает физике.

Часть IV. Экспериментальная программа

4.1 Что измерять

Для обнаружения ФПКВ предлагается следующая последовательность экспериментов на существующих QPU:

Шаг 1. Реализовать квантовое преобразование Фурье на n кубитах при разных температурах ниже T_c . Измерить систематическое отклонение фаз от теоретических значений как функцию n .

Шаг 2. Проверить, растёт ли это отклонение с n (инженерный шум) или остаётся постоянным (ФПКВ). Постоянство при увеличении n и есть сигнатура фундаментального предела.

Шаг 3. Реализовать случайные блуждания на графе непосредственно на QPU и измерить профиль спектральной размерности $d_s(\sigma)$. Прохождение через $d_s = 4$ при инвариантном σ^* есть прямое свидетельство Z^4 -структуры.

Шаг 4. Сравнить систематические ошибки фаз с предсказанным шагом $\Delta\theta_{min}$ овпадение порядка величины является подтверждением ФПКВ.

4.2 Что это даст науке

Если эксперименты подтвердят ФПКВ, это будет означать одновременно:

- Первое прямое экспериментальное свидетельство **дискретности пространства-времени** - проблемы, которую физика не могла решить экспериментально
 - Новый **фундаментальный предел** технологий - сопоставимый по значимости с термодинамическими пределами КПД тепловых машин
 - Переосмысление **угроз квантовых компьютеров для криптографии** с учётом физических ограничений реальных устройств
 - Новый инструмент **квантовой метрологии**: систематические фазовые отклонения как измерительный сигнал о геометрии пространства-времени
-

Заключение

Фундаментальный предел квантовых вычислений — это не техническая проблема и не математическая теорема об алгоритмической сложности. Это физическое следствие конечности мира.

Если пространство-время дискретно - а именно это утверждает Quantumograph v14, выводя из этого всю известную физику - то любое устройство, существующее в этом пространстве-времени и использующее его степени свободы для вычислений, неизбежно наследует его

зернистость. Точность вычислений ограничена точностью самой реальности.

Это красивое и тревожное следствие. Красивое - потому что замыкает круг: теория, начавшаяся с вопроса “что такое пространство-время”, приходит к ответу на вопрос “что такое вычисление”. Тревожное - потому что ставит предел там, где его раньше не видели.

Проверить это можно. Оборудование существует. Осталось поставить эксперимент.

Список литературы

Bombelli, L., Lee, J., Meyer, D., & Sorkin, R. D. (1987). Space-time as a causal set. *Physical Review Letters*, 59(5), 521–524.

Dawid, R. (2013). *String Theory and the Scientific Method*. Cambridge University Press.

Fredkin, E. (1990). Digital mechanics: An informal introduction. *Physica D*, 45(1–3), 254–270.

Ladyman, J., & Ross, D. (2007). *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford University Press.

Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In *Criticism and the Growth of Knowledge*.

Laugwitz, D. (2002). *Nonstandard Analysis and the Theory of Continua*. Springer.

Lloyd, S. (2002). Computational capacity of the universe. *Physical Review Letters*, 88(23), 237901.

Lowe, E. J. (2016). *The Four-Category Ontology*. Oxford University Press.

Price, H. (1996). *Time’s Arrow and Archimedes’ Point*. Oxford University Press.

Wharton, K. B. (2014). Action-based quantum thermodynamics. *Annals of Physics*, 349, 1–15.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.

Wüthrich, C. (2012). The structure of causal sets and the measurement problem. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 43(4), 292–299.

Materov, S. (2025 - 2026) *Quantumograph. A Testable Quantum Graph Theory of Spacetime*.

Quantumograph v14, Supplement S-1. Патентные заявки на связанные алгоритмы верификации находятся на рассмотрении в Роспатенте.

© Все права защищены, 2026 Сергей Матеров. License: CC BY-NC 4.0

E-mail: sergejmaterov2@gmail.ru