

Фундаментальный предел квантовых вычислений

Supplement: The Fundamental Limit of Quantum Computation (FLQC)

(c)2026 Сергей Матеров*, *Quantumograph v14 Supplement FLQC*

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 вентиляторов. 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 :

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

*Independent Researcher E-mail: sergejmaterov2@gmail.com

где L — число узлов вдоль каждого направления решётки. Для физического пространства-времени L огромно — порядка $N^{1/4} = (10^{120})^{1/4} \approx 10^{30} = \Theta$ (**конечно**). Это означает, что фазовое пространство квантовых состояний дискретно с шагом порядка 10^{-30} радиана.

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

1.3 Почему 10^{-30} радиана имеет значение

Алгоритм Шора для разложения n -битного числа требует квантового преобразования Фурье с точностью фаз $\sim 2\pi/2^n$. 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 587 порядков меньше** фундаментального шага $\Delta\theta_{\text{min}} \sim 10^{-30}$ 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 (топологическим) пределом квантовых вычислений* (ФПКВ) называется нижняя граница на погрешность фазовых операций любого физического квантового вычислительного устройства, вытекающая из конечности числа узлов пространства-времени:

$$\varepsilon_{\text{ФПКВ}} \geq \frac{2\pi}{L_{\text{физ}}} \sim \frac{2\pi}{N^{1/4}} \sim \frac{2\pi}{10^{30}} \sim 10^{-30}$$

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:

$$T_c \sim \frac{\hbar \cdot \Delta\theta_{\text{min}}}{k_B} \sim 30\text{--}50 \text{ мК}$$

Выше T_c тепловой шум маскирует дискретность и фазы размыты сильнее, чем $\Delta\theta_{\text{min}}$ и 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, а 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^{-30} . 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 означает, что реальная угроза сложнее и интереснее, чем принято думать. Для малых ключей (512 бит и менее) ФПКВ может не играть роли; для больших - это влияние необходимо оценивать.

3.2 Квантовая коррекция ошибок

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

Это означает, что при достаточном масштабировании QPU коды коррекции ошибок столкнутся с “полом” — уровнем ошибок, ниже которого опуститься невозможно никакой коррекцией. Обнаружение этого пола 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 может служить как 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 является сигнатурой 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^* будет прямым свидетельством Z^4 -структуры.

Шаг 4. Сравнить систематические ошибки фаз с предсказанным шагом $\Delta\theta_{min}$ оваление порядка величины и есть подтверждение 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 с момента появления интерпретаций квантовой гравитации
- 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 тревожащее следствие. Красивое - потому что замыкает круг: теория, начавшаяся с вопроса “что такое пространство-время”, приходит к ответу на вопрос “что такое

вычисление”. Тревожащее - потому что ставит предел там, где его раньше не видели.

Проверить это можно. Оборудование существует. Осталось поставить эксперимент.

Список литературы

- Shor, P. W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer / P. W. Shor // *SIAM Journal on Computing*. - 1997. - Vol. 26, no. 5. - P. 1484–1509.
- Grover, L. K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack / L. K. Grover // *Physical Review Letters*. - 1997. - Vol. 78, no. 2. - P. 325–328.
- 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 FLQC. Патентные заявки на связанные алгоритмы верификации находятся на рассмотрении в Роспатенте.

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

E-mail: sergejmaterov2@gmail.com