

Квантовые компьютеры на сверхпроводящих фазовых кубитах.

Понятия запутанности и суперпозиции введенные квантовой механикой дают возможность разрабатывать новую вычислительную архитектуру, называемую квантовым компьютером, который может экспоненциально превзойти любые возможные классические компьютеры. Такое повышение производительности сделает неразрешимые в настоящее время вычислительные задачи в достаточной степени разрешимыми. Такие проблемы включают в себя оптимизацию задачи коммивояжера, факторизацию и квантовые симуляторы, например, для медицинских исследований. Один из подходов к реализации квантового компьютера реализуется на основе сверхпроводящих фазовых джозефсоновских кубитов. Эксперименты показывают нарушение неравенства Белла при использовании этих кубитов (квантовых битов), т. е. показывают, что пара таких кубитов может быть помещена в состояние, которое показывает более сильные корреляции, чем это возможно для классической пары битов. Эти эксперименты являются значительной вехой для сверхпроводящих кубитов, поскольку они обеспечивают убедительные доказательства того, что архитектура квантовых компьютеров действительно сможет превзойти классическую систему. Кроме того, эти эксперименты демонстрируют первые нарушения неравенства Белла в системах в твердом состоянии и макроскопических квантовых системах. Поэтому они добавляют ценные свидетельства того, что новые идеи, предложенные квантовой механикой, действительно во всевозможных квантовых системах и не могут быть объяснены детерминистическими альтернативными теориями.

Квантовые вычисления

Мотивация

Информационное общество

В 20-м веке информатизация труда выросла на порядок [Graham T.T. Molitor, 1982]. Это стало возможным с появлением персональных компьютеров и все более широким распространением и доступностью систем хранения и обмена информацией, таких как магнитные жесткие диски и Интернет. Экспоненциальный рост производительности труда и снижение цен на устройства сбора и создания информации привел к информационному потоку, что, по прогнозам, приведет к удвоению информационной базы в мире каждые несколько часов [Coles et al., 2006]. Чтобы справиться с этим

потоком информации достаточно резко увеличить скорость обработки информации.

Закон Мура

За последние 40 лет производительность вычислительных устройств удваивалась, примерно, каждые 18 месяцев. Эту тенденцию обычно называют законом Мура из-за статьи, написанной в 1965 году соучредителем Intel Гордоном Муром [Moore,1965]. Несмотря на то, что закон Мура, как ожидается, будет действовать, по крайней мере, еще десятилетия, важно подготовиться в более долгосрочной перспективе к будущему, когда транзисторы на основе кремния будут вытеснены.

Тезис Черча-Тьюринга

Тезис Черча-Тьюринга делает это еще более насущным. Тезис Черча — Тьюринга — фундаментальное **эвристическое** утверждение, существенное для многих областей науки, в том числе, для **математической логики теории доказательств, информатики, кибернетики**, дающее интуитивное понятие о **вычислимости**. Это утверждение было высказано **Алонзо Черчем** и **Аланом Тьюрингом** в середине **1930-х годов**. В терминах **теории рекурсии**, это утверждение формулируется как совпадение классов вычислимых и частично рекурсивных функций. В этой формулировке часто упоминается как просто тезис Черча. В терминах вычислимости по Тьюрингу, тезис гласит, что для любой интуитивно вычислимой функции существует вычисляющая её значения **машина Тьюринга**. Иногда в такой формулировке тезис Черча — Тьюринга фигурирует как тезис Тьюринга. В виду того, что классы **частично вычислимых по Тьюрингу** и **частично рекурсивных функций** совпадают, утверждение объединяют в единый тезис Черча — Тьюринга. Тезис Черча — Тьюринга невозможно строго доказать или опровергнуть, поскольку он устанавливает эквивалентность между строго формализованным понятием частично вычислимой функции и неформальным понятием вычислимости. Позднее были сформулированы другие практические варианты утверждения: физический тезис Черча — Тьюринга: любая функция, которая может быть вычислена физическим устройством, может быть вычислена машиной Тьюринга [[wikipedia](#)]. Проблемы, которые являются неразрешимыми, не разрешимы за полиномиальное время на современных компьютерах и останутся неразрешимыми на всех будущих классических компьютерах. К примерам таких проблем относятся факторизация, оптимизация путешествия коммивояжера, задача о скрытых подгруппах и т.д.

Алгоритм Deutsch-Josza

В 1992г. D. Deutsch и R. Jozsa предложили гипотетическую проблему, а также алгоритм ее решения, который показывает, что компьютер, который использует квантовые состояния для вычислений мог бы не подчиняться ограничению, наложенному тезисом Черча-Тьюринга [Deutsch и Jozsa, 1992]. Проблема – определение природы неизвестной функции вопросами оракулу, который оценивает функцию для данного входа. Функция действует на число n - битное и, как известно, результат или постоянный, то есть 0 (или 1) для всех возможных входов, или уравновешенный, то есть возвращается 0 для точно половины всех возможных входов и 1 для всех других. Классический компьютер, в худшем случае, должен был бы оценить функцию 2^n в степени $(n-1) + 1$ раз, в то время как квантовый компьютер должен будет оценить функцию только однажды, чтобы определить с уверенностью результат будет уравновешен или постоянен. Это сделано одной оценкой значения функции, если состояние на входе представляет собой суперпозицию всех возможных 2^n в степени n состояний, получаемых применением оператора Адамара. Если на выходе результат показывает амплитуды и для 0, и для 1, то функция уравновешена (сбалансирована), в противном случае - постоянна. Этот алгоритм подразумевает, что квантовый компьютер мог бы быть бесконечно быстрее, чем любой возможный классический компьютер для определенных классов проблем, которые слишком тяжелы для классических компьютеров.

Литература

- J. Altepeter, E. Jeffrey, and P. Kwiat. Phase-compensated ultra-bright source of entangled photons. *Opt. Express*, 13(22):8951-8959, October 2005.
- B. Apolloni, C. Carvalho, and D. De Falco. Quantum stochastic optimization. *Stochastic Processes and their Applications*, 33:233-244, 1989.
- Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gerard Roger. Experimental tests of realistic local theories via bell's theorem. *Phys. Rev. Lett.*, 47(7):460-463, Aug 1981.
- Adriano Barenco, Charles H. Bennett, Richard Cleve, David P. DiVincenzo, Norman Margolus, Peter Shor, Tycho Sleator, John A. Smolin, and Harald Weinfurter. Elementary gates for quantum computation. *Phys. Rev. A*, 52(5): 3457-3467, Nov 1995.
- J.S. Bell. On the einstein podolsky rosen paradox. *Physics*, 1:195-200, 1964.
- Jan Benhelm, Gerhard Kirchmair, Christian F. Roos, and Rainer Blatt. Towards fault-tolerant quantum computing with trapped ions. *Nat Phys*, 4(6):463-466, June 2008. ISSN 1745-2473.
- Radoslaw C. Bialczak, R. McDermott, M. Ansmann, M. Hofheinz, N. Katz, Erik Lucero, Matthew Neeley, A. D. O'Connell, H. Wang, A. N. Cleland, and John M. Martinis. $1/f$ flux noise in josephson phase qubits. *Physical Review Letters*, 99(18):187006, 2007.

John Clarke and Frank K. Wilhelm. Superconducting quantum bits. *Nature*, 453 (7198):1031-1042, June 2008. ISSN 0028-0836.

John F. Clauser and Michael A. Horne. Experimental consequences of objective local theories. *Phys. Rev. D*, 10(2):526{535, Jul 1974.

John F. Clauser, Michael A. Horne, Abner Shimony, and Richard A. Holt. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.*, 23 (15):880-884, Oct 1969.

P. Coles, T. Cox, C. Mackey, and S. Richardson. The toxic terabyte - how data-dumping threatens business efficiency. *IBM Global Technical Services*, July 2006.

K. B. Cooper, Matthias Steffen, R. McDermott, R. W. Simmonds, Seongshik Oh, D. A. Hite, D. P. Pappas, and John M. Martinis. Observation of quantum oscillations between a josephson phase qubit and a microscopic resonator using fast readout. *Phys. Rev. Lett.*, 93(18):180401, Oct 2004.

D. Deutsch. Quantum theory, the church-turing principle and the universal quantum computer. In *Proceedings of the Royal Society of London*, volume A, pages 97-117, 1985.

D. Deutsch and R. Jozsa. Rapid solutions of problems by quantum computation. In *Proceedings of the Royal Society of London*, volume 439 of A, page 553, 1992.

David P. DiVincenzo. The physical implementation of quantum computation. arXiv:quant-ph/0002077v3, 2000.

R. C. Eberhart and J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. In *Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science, Nagoya, Japan*, pages 39-43, 1995.

A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.*, 47(10):777-780, May 1935.

Albert Einstein, Max Born, and Hedwig Born. *The Born-Einstein Letters: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*, chapter Letter to Max Born on 4 December 1926. London, Macmillan, 1971.

John C. Gallop. *SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics*. CRC Press, 1990.

Scott Hill and William K. Wootters. Entanglement of a pair of quantum bits. *Phys. Rev. Lett.*, 78(26):5022-5025, Jun 1997.

Max Hofheinz, E. M. Weig, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, Erik Lucero, M. Neeley, A. D. O'Connell, H. Wang, John M. Martinis, and A. N. Cleland. Generation of fock states in a superconducting quantum circuit. *Nature*, 454 (7202):310-314, July 2008. ISSN 0028-0836.

Max Hofheinz, H. Wang, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, Erik Lucero, M. Neeley, A. D. O'Connell, D. Sank, J. Wenner, John M. Martinis, and A. N. Cleland. Synthesizing arbitrary quantum states in a superconducting resonator. *Nature*, 459(7246):546{549, May 2009. ISSN 0028-0836.

B. D. Josephson. Possible new effects in superconductive tunnelling. *Physics Letters*, 1(7):251 - 253, 1962. ISSN 0031-9163.

A. G. Kofman and A. N. Korotkov. Bell-inequality violation versus entanglement

in the presence of local decoherence. *Physical Review A (Atomic, Molecular, and Optical Physics)*, 77(5):052329, 2008a.

Abraham G. Kofman and Alexander N. Korotkov. Analysis of bell inequality violation in superconducting phase qubits. *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, 77(10):104502, 2008b.

Abraham G. Kofman, Qin Zhang, John M. Martinis, and Alexander N. Korotkov. Theoretical analysis of measurement crosstalk for coupled josephson phase qubits. *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, 75(1):014524, 2007.

Karl Kraus. *States, effects, and operations : fundamental notions of quantum theory : lectures in mathematical physics at the University of Texas at Austin*. Springer-Verlag, 1983.

A. K. Lenstra and H. W. Lenstra, Jr. *The development of the number field sieve*, volume 1554. Springer Berlin / Heidelberg, 1993.

Erik Lucero, M. Hofheinz, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, N. Katz, Matthew Neeley, A. D. O'Connell, H. Wang, A. N. Cleland, and John M. Martinis. High-fidelity gates in a single josephson qubit. *Physical Review Letters*, 100(24):247001, 2008.

A. Lupascu, C. J. M. Verwijs, R. N. Schouten, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij. Nondestructive readout for a superconducting flux qubit. *Phys. Rev. Lett.*, 93(17):177006, Oct 2004.

J. Majer, J. M. Chow, J. M. Gambetta, Jens Koch, B. R. Johnson, J. A. Schreier, L. Frunzio, D. I. Schuster, A. A. Houck, A. Wallraf, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Coupling superconducting qubits via a cavity bus. *Nature*, 449(7161):443-447, September 2007. ISSN 0028-0836.

J. B. Majer, F. G. Paauw, A. C. J. ter Haar, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij. Spectroscopy on two coupled superconducting flux qubits. *Physical Review Letters*, 94(9):090501, 2005.

John M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, and C. Urbina. Rabi oscillations in a large josephson-junction qubit. *Phys. Rev. Lett.*, 89(11):117901, Aug 2002.

John M. Martinis, K. B. Cooper, R. McDermott, Matthias Steen, Markus Ansmann, K. D. Osborn, K. Cicak, Seongshik Oh, D. P. Pappas, R. W. Simmonds, and Clare C. Yu. Decoherence in josephson qubits from dielectric loss. *Phys. Rev. Lett.*, 95(21):210503, Nov 2005.

R. McDermott, R. W. Simmonds, Matthias Steen, K. B. Cooper, K. Cicak, K. D. Osborn, Seongshik Oh, D. P. Pappas, and John M. Martinis. Simultaneous state measurement of coupled josephson phase qubits. *Science*, 307(5713):1299-1302, 2005.

D. L. Moehring, M. J. Madsen, B. B. Blinov, and C. Monroe. Experimental bell inequality violation with an atom and a photon. *Phys. Rev. Lett.*, 93(9):090410, Aug 2004.

Graham T.T. Molitor. *Communications tomorrow: the coming of the information society: selections from The futurist*, chapter The Information Society: The Path to Post-Industrial Growth. Bethesda, Md.: World Future Society, 1982.

Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Elec-*

tronics, 38(8), April 19 1965.

Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-cooper-pair box. *Nature*, 398(6730):786{788, April 1999. ISSN 0028-0836.

Matthew Neeley, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, M. Hofheinz, N. Katz, Erik Lucero, A. O'Connell, H. Wang, A. N. Cleland, and John M. Martinis. Process tomography of quantum memory in a josephson-phase qubit coupled to a two-level state. *Nat Phys*, 4(7):523{526, July 2008a. ISSN 1745-2473.

Matthew Neeley, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, M. Hofheinz, N. Katz, Erik Lucero, A. O'Connell, H. Wang, A. N. Cleland, and John M. Martinis. Transformed dissipation in superconducting quantum circuits. *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, 77(18):180508, 2008b.

J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4):308{313, January 1965.

T. P. Orlando, J. E. Mooij, Lin Tian, Caspar H. van der Wal, L. S. Levitov, Seth Lloyd, and J. J. Mazo. Superconducting persistent-current qubit. *Phys. Rev. B*, 60(22):15398-15413, Dec 1999.

Philip M. Pearle. Hidden-variable example based upon data rejection. *Phys. Rev. D*, 2(8):1418-1425, Oct 1970.

C. F. Roos, G. P. T. Lancaster, M. Riebe, H. Häfner, W. Hansel, S. Gulde, C. Becher, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, and R. Blatt. Bell states of atoms with ultralong lifetimes and their tomographic state analysis. *Phys. Rev. Lett.*, 92(22):220402, Jun 2004.

M. A. Rowe, D. Kielpinski, V. Meyer, C. A. Sackett, W. M. Itano, C. Monroe, and D. J. Wineland. Experimental violation of a bell's inequality with efficient detection. *Nature*, 409(6822):791-794, February 2001. ISSN 0028-0836.

http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81_%D0%A7%D1%91%D1%80%D1%87%D0%B0_%E2%80%94%D0%A2%D1%8C%D1%8E%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0

E. Schrodinger. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Phys. Rev.*, 28(6):1049{1070, Dec 1926.

S. Sendelbach, D. Hover, A. Kittel, M. Mück, John M. Martinis, and R. McDermott. Magnetism in squids at millikelvin temperatures. *Physical Review Letters*, 100(22):227006, 2008.

Peter W. Shor. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory. *Phys. Rev. A*, 52(4):R2493-R2496, Oct 1995.

Peter W. Shor. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26:1484-1509, 1997.

R. W. Simmonds, K. M. Lang, D. A. Hite, S. Nam, D. P. Pappas, and John M. Martinis. Decoherence in josephson phase qubits from junction resonators. *Phys. Rev. Lett.*, 93(7):077003, Aug 2004.

Matthias Steen, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, N. Katz, Erik Lucero, R. McDermott, Matthew Neeley, E. M. Weig, A. N. Cleland, and John M. Martinis. Measurement of the entanglement of two superconducting qubits via

state tomography. *Science*, 313(5792):1423{1425, 2006.

A. M. Turing. On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem. a correction. *Proc. London Math. Soc.*, s2-43(6):544{546, 1938.

Lieven M. K. Vandersypen, Matthias Steen, Gregory Breyta, Costantino S. Yannoni, Mark H. Sherwood, and Isaac L. Chuang. Experimental realization of shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance. *Nature*, 414(6866):883{887, December 2001. ISSN 0028-0836.

A. Wallra, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, J. Majer, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Approaching unit visibility for control of a superconducting qubit with dispersive readout. *Physical Review Letters*, 95(6):060501, 2005.

Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger. Violation of bell's inequality under strict einstein locality conditions. *Phys. Rev. Lett.*, 81(23):5039{5043, Dec 1998.

Qin Zhang, Abraham G. Kofman, John M. Martinis, and Alexander N. Korotkov. Analysis of measurement errors for a superconducting phase qubit. *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, 74(21):214518, 2006.