

Квантовый компьютер — Википедия

Скопировать источник: [Квантовый компьютер — Википедия](#)

Квантовый компьютер

[\[править\]](#) | [\[править код\]](#)

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

[Перейти к навигации](#) [Перейти к поиску](#).

Квантовый компьютер — [вычислительное устройство](#), которое использует явления [квантовой механики](#) ([квантовая суперпозиция](#), [квантовая запутанность](#)) для передачи и обработки данных. Квантовый компьютер (в отличие от обычного) оперирует не битами (способными принимать значение либо 0, либо 1), а [кубитами](#), имеющими значения одновременно и 0, и 1. Теоретически, это позволяет обрабатывать все возможные состояния одновременно, достигая существенного превосходства над обычными компьютерами в ряде алгоритмов^[1].

Полноценный универсальный квантовый компьютер является пока [гипотетическим](#) устройством, сама возможность построения которого связана с серьёзным развитием квантовой теории в области многих частиц и сложных экспериментов; разработки в данной области связаны с новейшими открытиями и достижениями [современной физики](#). На конец 2010-х годов практически были реализованы лишь единичные экспериментальные системы, исполняющие фиксированные алгоритмы небольшой сложности.

Первым практическим [высокоуровневым языком программирования](#) для такого вида компьютеров считается язык [Quipper^{\[en\]}](#), основанный на [Haskell^{\[2\]}](#) (см. [Квантовое программирование](#)).

Введение[\[править\]](#) | [\[править код\]](#)

Основная статья: [Хронология квантовых вычислений](#)

n

составляющих их реальных частиц, что делает невозможным моделирование их поведения на классических компьютерах уже для

$$n = 10$$

. Поэтому Визнер и Фейнман высказали идею построения квантового компьютера.

Квантовый компьютер использует для вычисления не обычные (классические) алгоритмы, а процессы квантовой природы, так называемые [квантовые алгоритмы](#), использующие [квантовомеханические](#) эффекты, — такие как [квантовый параллелизм](#) и [квантовая запутанность](#).

Если классический процессор в каждый момент может находиться ровно в одном из состояний

$$|0\rangle, |1\rangle, \dots, |N-1\rangle$$

([обозначения Дирака](#)), то квантовый процессор в каждый момент находится одновременно во всех этих базисных состояниях, при этом в каждом состоянии

$$|j\rangle$$

— со своей [комплексной амплитудой](#)

$$\lambda_j$$

. Это квантовое состояние называется «[квантовой суперпозицией](#)» данных классических состояний и обозначается как

$$|\Psi\rangle = \sum_{j=0}^{N-1} \lambda_j |j\rangle.$$

Базисные состояния могут иметь и более сложный вид. Тогда [квантовую суперпозицию](#) можно проиллюстрировать, например, так: «Вообразите атом, который мог бы подвергнуться радиоактивному распаду в определённый промежуток времени. Или не подвергнуться. Мы можем ожидать, что у этого атома есть только два возможных состояния: «распад» и «нераспад» < > но в

$|j\rangle$

есть пространственные положения группы [электронов](#) в [квантовых точках](#), управляемых внешним полем

V

, то унитарная операция есть решение [уравнения Шрёдингера](#) для этого потенциала.

Измерение есть случайная величина, принимающая значения

$|j\rangle, j = 0, 1, \dots, N - 1$

с вероятностями

$|\lambda_j|^2$

соответственно. В этом состоит квантовомеханическое [правило Борна](#). Измерение есть единственная возможность получения информации о квантовом состоянии, так как значения

λ_j

нам непосредственно недоступны. Измерение квантового состояния не может быть сведено к унитарной шрёдингеровской эволюции, так как, в отличие от последней, оно необратимо. При измерении происходит так называемый [коллапс волновой функции](#)

$|\Psi\rangle$

, физическая природа которого до конца не ясна. Спонтанные вредоносные измерения состояния в ходе вычисления ведут к декогерентности, то есть отклонению от унитарной эволюции, что является главным препятствием при построении квантового компьютера (см. [физические реализации квантовых компьютеров](#)).

Квантовое вычисление есть контролируемая классическим управляющим компьютером последовательность унитарных операций простого вида (над одним, двумя или тремя [кубитами](#)). В

Кубит [[правильно](#) | [правильно код](#)]

Основная статья: [Кубит](#)

Идея квантовых вычислений состоит в том, что квантовая система из L двухуровневых квантовых элементов (квантовых битов, [кубитов](#)) имеет 2^L линейно независимых состояний, а значит, вследствие принципа [квантовой суперпозиции](#), пространство состояний такого квантового регистра является 2^L -мерным [гильбертовым пространством](#). Операция в квантовых вычислениях соответствует повороту вектора состояния регистра в этом пространстве. Таким образом, квантовое вычислительное устройство размером L кубитов фактически задействует одновременно 2^L классических состояний.

Физическими системами, реализующими кубиты, могут быть любые объекты, имеющие два квантовых состояния: поляризационные состояния [фотонов](#), электронные состояния изолированных [атомов](#) или [ионов](#), [спиновые](#) состояния ядер атомов, и т. д.

Один классический бит может находиться в одном и только в одном из состояний

$|0\rangle$

или

$|1\rangle$

. Квантовый бит, называемый кубитом, находится в состоянии

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

, так что $|a|^2$ и $|b|^2$ — вероятности получить 0 или 1 соответственно при измерении этого состояния;

$$a, b \in \mathbb{C}$$

; $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Сразу после измерения кубит переходит в базовое квантовое состояние, соответствующее классическому результату.

В данном случае при измерении мы получили 0 с вероятностью 0,64.
В результате измерения кубит переходит в новое квантовое состояние

$|0\rangle$

, то есть при следующем измерении этого кубита мы получим 0 с единичной вероятностью (предполагается, что по умолчанию унитарная операция тождественна; в реальных системах это не всегда так).

Приведём для объяснения два примера из квантовой механики: 1) фотон находится в состоянии

$|\psi\rangle$

суперпозиции двух поляризаций. Это состояние есть вектор в двумерной плоскости, систему координат в которой можно представлять как две перпендикулярные оси, так что

a

и

b

есть проекции

$|\psi\rangle$

на эти оси; измерение раз и навсегда коллапсирует состояние фотона в одно из состояний

$|0\rangle$

или

$|1\rangle$

, причём вероятность коллапса равна квадрату соответствующей проекции. Полная вероятность получается по [теореме Пифагора](#).

Перейдём к системе из двух кубитов. Измерение каждого из них может дать 0 или 1. Поэтому у системы есть 4 классических состояния: 00, 01, 10 и 11. Аналогичные им базовые квантовые

, у нас получится:

В первом случае измерение даст состояние

$$|\Psi_0\rangle = |0\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{|a|^2 + |b|^2}} (a|0\rangle + b|1\rangle)$$

, во втором — состояние

$$|\Psi_1\rangle = |1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{|c|^2 + |d|^2}} (c|0\rangle + d|1\rangle)$$

Мы снова видим, что результат такого измерения невозможно записать как вектор в [гильбертовом пространстве](#) состояний. Такое состояние, в котором участвует наше незнание о том, какой же результат получится на первом кубите, называют [смешанным состоянием](#). В нашем случае такое смешанное состояние называют проекцией исходного состояния

$$|\Psi\rangle$$

на второй кубит и записывают в виде [матрицы плотности](#) вида

$$\rho_2 = p_0 \rho_{\Psi_0} + p_1 \rho_{\Psi_1}$$

, где матрица плотности состояния

$$|\psi\rangle$$

определяется как

$$|\psi\rangle\langle\psi|$$

В общем случае у системы из L кубитов существует 2^L классических состояний (0000... (L нулей), ...

измеряется значение, и это результат работы компьютера. Роль проводов классического [компьютера](#) играют [кубиты](#), а роль логических блоков классического компьютера играют [унитарные преобразования](#). Такая концепция квантового процессора и квантовых логических вентилей была предложена в 1989 году [Дэвидом Дойчем](#). Также Дэвид Дойч в 1995 году нашёл универсальный логический блок, с помощью которого можно выполнять любые квантовые вычисления.

Оказывается, что для построения любого вычисления достаточно двух базовых операций. Квантовая система даёт результат, только с некоторой вероятностью являющийся правильным. Но за счёт небольшого увеличения операций в алгоритме можно сколь угодно приблизить вероятность получения правильного результата к единице.

С помощью базовых квантовых операций можно симулировать работу обычных логических элементов, из которых сделаны обычные компьютеры. Поэтому любую задачу, которая решена сейчас, любой квантовый компьютер решит, и почти за такое же время^[10].

Большая часть современных ЭВМ работают по такой же схеме: n битов памяти хранят состояние и каждый такт времени изменяются процессором. В квантовом случае система из n кубитов находится в состоянии, являющемся суперпозицией всех базовых состояний, поэтому изменение системы касается *всех* 2^n базовых состояний одновременно. Теоретически новая схема может работать намного (в экспоненциальное число раз) быстрее классической. Практически, например, квантовый [алгоритм Гровера](#) поиска в базе данных показывает квадратичный прирост мощности против классических алгоритмов

Алгоритмы [[править](#) | [править код](#)]

Основная статья: [Квантовый алгоритм](#)

- [Алгоритм Шора](#) позволяет разложить натуральное число n на простые множители за [полиномиальное](#) от $\log n$ время.
- [Алгоритм Залки — Визнера](#) позволяет моделировать унитарную эволюцию квантовой системы

возможность получения квантового ускорения для произвольного классического алгоритма является большой редкостью^[11].

Пример реализации операции CNOT на зарядовых состояниях электрона в квантовых точках [[править](#) | [править код](#)]

Любая квантовая операция может быть реализована при помощи [логического вентиля](#) «контролируемое отрицание» (CNOT) и поворота состояния одного кубита^{[12][13]}.

Один кубит можно представить в виде электрона в двухъямном потенциале, так что

$|0\rangle$

означает нахождение его в левой яме, а

$|1\rangle$

— в правой. Это называется кубит на зарядовых состояниях. Общий вид квантового состояния такого электрона:

$$|\Psi\rangle = \lambda_0|0\rangle + \lambda_1|1\rangle$$

. Зависимость его от времени есть зависимость от времени амплитуд

λ_0, λ_1

; она задаётся [уравнением Шрёдингера](#) вида

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi$$

, где [гамильтониан](#)

H

основное состояние), а

$$|\tilde{1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

— собственный вектор со значением

2a

(первое возбуждённое состояние). Никаких других собственных состояний (с определённым значением энергии) здесь нет, так как наша задача двумерная.

Поскольку каждое состояние

$$|\Psi\rangle$$

переходит за время

t

в состояние

$$\lambda_0 \exp(0t)|\tilde{0}\rangle + \lambda_1 \exp(-2at/\hbar)|\tilde{1}\rangle$$

, то для реализации операции NOT (перехода

$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$

и наоборот достаточно просто подождать время

$$t = \pi\hbar/(2a)$$

. То есть операция [NOT](#) реализуется просто естественной квантовой эволюцией кубита при условии, что внешний потенциал задаёт двухъямную структуру; это делается с помощью технологии квантовых точек.

Для реализации [CNOT](#) надо расположить два кубита (то есть две пары ям) перпендикулярно друг

Квантовая телепортация [[править](#) | [править код](#)]

Основная статья: [Квантовая телепортация](#)

Алгоритм телепортации реализует точный перенос состояния одного кубита (или системы) на другой. В простейшей схеме используются 3 кубита: телепортируемый кубит и [запутанная пара](#), один кубит которой находится на другой стороне. Отметим, что в результате работы алгоритма первоначальное состояние источника разрушится — это пример действия общего [принципа невозможности клонирования](#) — невозможно создать точную копию квантового состояния, не разрушив оригинал. Не получится скопировать *произвольное* состояние, и телепортация — замена этой операции.

Телепортация позволяет передавать квантовое состояние системы с помощью обычных классических каналов связи. Таким образом можно, в частности, получить связанное состояние системы, состоящей из подсистем, удалённых на большое расстояние.

Возможные применения [[править](#) | [править код](#)]

Приложения к криптографии [[править](#) | [править код](#)]

Благодаря огромной скорости разложения на простые множители квантовый компьютер позволит расшифровывать сообщения, зашифрованные широко применяемым криптографическим алгоритмом [RSA](#). До сих пор этот алгоритм считается сравнительно надёжным, так как эффективный способ разложения чисел на простые множители для классического компьютера в настоящее время неизвестен. Для того, например, чтобы получить доступ к кредитной карте ^{[[прояснить](#)]}, нужно разложить на два простых множителя число длиной в сотни цифр (даже для [суперкомпьютеров](#) выполнение этой задачи заняло бы в сотни раз больше времени, чем [возраст Вселенной](#)). Благодаря квантовому [алгоритму Шора](#) эта задача становится вполне осуществимой, если квантовый компьютер будет построен.

[Volkswagen](#) ведёт исследования в сфере применения квантовых компьютеров для разработки [беспилотного автомобиля](#) и новых типов аккумуляторных батарей (используя квантовые компьютеры Google и [D-Wave](#)). В ноябре 2018 года концерн объявил о разработке системы управления дорожным движением (с интеграцией в неё беспилотных машин), работающей с использованием квантовых компьютеров [D-Wave](#).^[17]

Молекулярное моделирование [[править](#) | [править код](#)]

Предполагается, что с помощью квантовых компьютеров станет возможно точное моделирование молекулярных взаимодействий и химических реакций. Химические реакции являются квантовыми по своей природе. Для классических компьютеров доступен подсчёт поведения только относительно простых молекул.^[18] По прогнозам экспертов, моделирование на квантовых компьютерах открывает новые перспективы для развития химической отрасли, в частности, при создании лекарств.^[19]

Физические реализации квантовых компьютеров [[править](#) | [править код](#)]

Построение квантового компьютера в виде реального физического прибора является фундаментальной задачей физики XXI века. По состоянию на начало 2018 года построены только ограниченные варианты квантового компьютера (самые большие сконструированные квантовые регистры имеют несколько десятков связанных кубитов^{[20][21][22]}). Существуют скептические мнения о ряде перспектив квантовых вычислений:

Практическое осуществление квантового компьютера основано на манипулировании на микроскопическом уровне и с грандиозной точностью многоэлементной физической системой с непрерывными степенями свободы. Очевидно, что для достаточно большой системы, квантовой

Главные технологии для квантового компьютера:

1. Твердотельные [квантовые точки](#) на [полупроводниках](#): в качестве логических кубитов используются либо зарядовые состояния (нахождение или отсутствие [электрона](#) в определённой точке), либо направление электронного и/или ядерного [спина](#) в данной квантовой точке. Управление через [внешние потенциалы](#) или [лазерным](#) импульсом.
2. [Сверхпроводящие](#) элементы ([джозефсоновские переходы](#), [СКВИДы](#) и др.). В качестве логических кубитов используются присутствие/отсутствие [куперовской пары](#) в определённой пространственной области. Управление: внешний потенциал/магнитный поток.
3. [Ионы](#) в вакуумных [ловушках Пауля](#)^[en] (или атомы в [оптических ловушках](#)). В качестве логических кубитов используются основное/возбуждённое состояния внешнего электрона в ионе. Управление: классические лазерные импульсы вдоль оси ловушки или направленные на индивидуальные ионы + колебательные моды ионного ансамбля. Эту схему предложили в 1994 году [Петер Цоллер](#) и [Хуан Игнасио Сирак](#)^{[13][24]}.
4. Смешанные технологии: использование заранее приготовленных запутанных состояний [фотонов](#) для управления атомными ансамблями или как элементы управления классическими вычислительными сетями.
5. Оптические технологии: использование генерации квантовых состояний света, быстрого и перенастраиваемого управления этими состояниями и их детектирование.^{[25][26]}

Основные проблемы, связанные с созданием и применением квантовых компьютеров:

- необходимо обеспечить высокую точность измерений;
- внешние воздействия (включая передачу полученных результатов) могут разрушить квантовую систему или внести в неё искажения.

Чем больше кубитов находятся в связанном состоянии, тем менее стабильной является система. Для достижения «квантового превосходства» требуется компьютер со многими десятками связанных кубитов, работающими стабильно и с малым числом ошибок. Вопрос о том, до какой степени возможно масштабирование такого устройства (так называемая «проблема масштабирования»), является предметом новой интенсивно развивающейся области — *многочастичной квантовой механики*. Центральным здесь является вопрос о природе [декогерентности](#) (точнее, о [коллапсе волновой функции](#)), который пока остаётся открытым. Различные трактовки этого процесса можно

сомножители числа 15^[30].

В [2005 году](#) группой Ю. Пашкина (кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории сверхпроводимости г. Москвы) при помощи японских специалистов был построен двухкубитный квантовый процессор на сверхпроводящих элементах^[31].

В ноябре 2009 года физикам из [Национального института стандартов и технологий](#) в [США](#) впервые удалось собрать программируемый квантовый компьютер, состоящий из двух кубитов^[32].

В феврале 2012 года компания [IBM](#) сообщила о достижении значительного прогресса в физической реализации квантовых вычислений с использованием сверхпроводящих кубитов, соединённых с кремниевыми микросхемами, что, по мнению компании, позволит начать работы по созданию квантового компьютера^[33].

В апреле 2012 года группе исследователей из [Южно-Калифорнийского университета](#), [Технологического университета Дельфты](#), [университета штата Айова](#), и [Калифорнийского университета, Санта-Барбара](#), удалось построить двухкубитный квантовый компьютер на кристалле [алмаза](#) с примесями. Компьютер функционирует при комнатной температуре и теоретически является масштабируемым. В качестве двух логических кубитов использовались направления спина электрона и ядра [азота](#) соответственно. Для обеспечения защиты от влияния декогерентности была разработана целая система, которая формировала импульс микроволнового излучения определённой длительности и формы. При помощи этого компьютера реализован [алгоритм Гровера](#) для четырёх вариантов перебора, что позволило получить правильный ответ с первой попытки в 95 % случаев^{[34][35]}.

В июле 2017 года группа физиков под руководством [Михаила Лукина](#), сооснователя Российского квантового центра и профессора Гарвардского университета, создала программируемый 51-кубитный квантовый симулятор^[36]. Это самая сложная подобная система из существующих на тот момент. Авторы проверили работоспособность симулятора моделированием сложной системы из множества частиц — это позволило физикам предсказать некоторые ранее неизвестные эффекты^[37]. Примерно в это же время другая группа ученых из [университета Мэриленд](#) под

«спиновыми кубитами»^{[44][45]}

В марте 2018 года компания [Google](#) объявила, что ей удалось построить 72-кубитный квантовый процессор Bristlecone, имеющий низкую вероятность ошибок в вычислениях. Компания не раскрыла подробных характеристик устройства, однако утверждает, что оно позволяет достичь «квантового превосходства». Согласно специалистам Google, для того чтобы квантовый компьютер мог решать задачи, недоступные для «обычных» компьютеров, требуется соблюдение следующих условий: в его состав должно входить не менее 49 кубитов, «глубина» ([англ.](#) circuit depth) должна превышать 40 кубитов, а вероятность ошибки в двухкубитном логическом элементе должна быть не выше 0,5%. Представители компании выразили надежду, что в будущем они смогут достигнуть этих показателей.^{[46][47]}

В декабре 2018 года сообщено о разработке оптического микрочипа, который в будущем запланировано использовать составной частью квантового компьютера.^{[25][26]}

В октябре 2019 года компания [Google](#) объявила, что ей удалось построить 53-кубитный квантовый процессор [Sycamore](#) и продемонстрировать «квантовое превосходство» над обычными компьютерами^{[48][49][50]}.

Адиабатические компьютеры D-Wave [[править](#) | [править код](#)]

Основная статья: [D-Wave Systems](#)

Канадская компания [D-Wave Systems](#) с [2007 года](#) заявляла о создании различных вариантов квантового компьютера: от 16-кубитного до 2000-кубитного. Компьютеры D-Wave пригодны для решения лишь узкого класса задач. Некоторые исследователи высказывали сомнения, что в компьютерах компании действительно достигается существенное «квантовое ускорение», однако компьютеры D-Wave (предлагаемые по ценам 10—15 млн [USD](#)) покупались компаниями [Google](#), [Lockheed Martin](#) и [Temporal Defense Systems](#), а также агентством [NASA](#) и [Лос-Аламосской](#).

1. [↑ Александр Ершов. Квантовое превосходство // Популярная механика.](#) — 2018. — № 5. — С. 54—59.
2. [↑ New language helps quantum coders build killer apps. *New Scientist*](#) (5 июля 2014). Дата обращения 20 июля 2014.
3. [↑ Ю. И. Манин.](#) Вычислимое и невычислимое. — М.: Сов. радио, 1980. — С. 15.
4. [↑ Feynman, R.P.](#) Simulating physics with computers // *International Journal of Theoretical Physics.* — 1982. — V. 21. — Number 6. — P. 467—488. [doi:10.1007/BF02650179](#) Статья представляет собой текст доклада на конференции в MIT 1981 года.
5. [↑ P. Benioff.](#) Quantum mechanical hamiltonian models of turing machines (англ.) // [Journal of Statistical Physics](#) (англ.)русск. : journal. — 1982. — Vol. 29, no. 3. — P. 515—546. — [doi:10.1007/BF01342185](#). — [Bibcode: 1982JSP...29..515B](#).
6. [↑ S. Weisner](#) (англ.)русск. Conjugate coding (неопр.) // [Association for Computing Machinery, Special Interest Group in Algorithms and Computation Theory.](#) — 1983. — Т. 15. — С. 78—88.
7. [↑ A. Zeilinger, *Dance of the Photons: From Einstein to Quantum Teleportation*, Farrar, Straus & Giroux, New York, 2010, pp. 189, 192, ISBN 0-374-23966-5](#)
8. [↑ Leah Henderson and Vlatko Vedral, *Quantum entanglement* Архивная копия](#) от 15 июня 2018 на [Wayback Machine](#) // Centre for Quantum Information and Foundations, Cambridge.
9. [↑ Холево, А.](#) Квантовая информатика: прошлое, настоящее, будущее // [В мире науки. — июль 2008. — № 7](#)
10. [↑ ¹ ² Google создаст искусственный интеллект на квантовом компьютере.](#)
11. [↑ Ozhigov Y. *Quantum Computers Speed Up Classical with Probability Zero* // *Chaos Solitons and Fractals*, 10 \(1999\) 1707—1714.](#)
12. [↑ Tycho Sleator, Harald Weinfurter. *Realizable Universal Quantum Logic Gates* // *Physical Review Letters.* — 1995-05-15. — Т. 74, вып. 20. — С. 4087—4090. — \[doi:10.1103/PhysRevLett.74.4087\]\(#\).](#)
13. [↑ ¹ ² J. I. Cirac, P. Zoller. *Quantum Computations with Cold Trapped Ions* // *Physical Review Letters.* — 1995-05-15. — Т. 74, вып. 20. — С. 4091—4094. — \[doi:10.1103/PhysRevLett.74.4091\]\(#\).](#)
14. [↑ Валиев, К. А.](#) Квантовая информатика: компьютеры, связь и криптография // *Вестник российской академии наук.* — 2000. — Том 70. — № 8. — С. 688—695.
15. [↑ Созданы прототипы квантовых компьютеров](#) // [lenta.ru](#).
16. [↑ Первостепенная задача квантовых компьютеров — усиление искусственного интеллекта, \[geektimes.ru\]\(#\), 4 марта 2018 года.](#)

25. ↑ [1 2 Достигнут прогресс в создании оптического квантового компьютера](#)
26. ↑ [1 2](#) DECEMBER 10, 2018 [New optical device brings quantum computing a step closer](#)
27. ↑ [Р. Пенроуз. Путь к Реальности.](#)
28. ↑ [Х. Бройер, Ф. Петруччионе. Теория открытых квантовых систем. Архивная копия](#) от 15 декабря 2013 на [Wayback Machine](#)
29. ↑ [Ю. И. Ожигов. Конструктивная физика. Архивная копия](#) от 2 сентября 2013 на [Wayback Machine](#) // rcd.ru.
30. ↑ [Biggest quantum computer to date](#) (англ.). Geek.com (24 December 2001). Дата обращения 28 июня 2015.
31. ↑ http://dml.riken.jp/pub/nori/pdf/PhysicaC_426_1552_Coherent_manipulations.pdf Архивная копия от 8 марта 2013 на [Wayback Machine](#).
32. ↑ [First universal programmable quantum computer unveiled.](#)
33. ↑ [IBM сообщает об успехах в создании квантового компьютера](#) // oszone.net.
34. ↑ [Дефекты кристаллической решетки алмаза позволили создать «блистающий» квантовый компьютер.](#)
35. ↑ [Quantum computer built inside diamond — article with reference to the original work in Nature.](#)
36. ↑ [Hannes Bernien, Sylvain Schwartz, Alexander Keesling, Harry Levine, Ahmed Omran. Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator](#) (En) // Nature. — 2017/11. — Т. 551, вып. 7682. — С. 579—584. — ISSN 1476-4687. — doi:10.1038/nature24622. — arXiv:1707.04344.
37. ↑ [Владимир Королев. Российско-американские физики создали рекордно сложный 51-кубитный квантовый компьютер.](#) nplus1.ru. Дата обращения 15 июля 2017.
38. ↑ [1 2 J. Zhang, G. Pagano, P. W. Hess, A. Kyprianidis, P. Becker. Observation of a many-body dynamical phase transition with a 53-qubit quantum simulator](#) (англ.) // Nature. — 2017/11. — Vol. 551, iss. 7682. — P. 601—604. — ISSN 1476-4687. — doi:10.1038/nature24654. — arXiv:1708.01044.
39. ↑ [Владимир Королев. Физики создали рекордно сложный 53-кубитный квантовый вычислитель.](#) nplus1.ru. Дата обращения 14 января 2018.
40. ↑ [Quantum simulator with 51 qubits is largest ever](#) (англ.), *New Scientist*. Дата обращения 21 июля 2017.
41. ↑ [The future is quantum.](#) IBM Blog Research.
42. ↑ [IBM Raises the Bar with a 50-Qubit Quantum Computer.](#) MIT Technology Review.
43. ↑ [IBM](#)

Quantum Computing Theory, Google AI Quantum

50. [↑ Meduza](#) 20:05, 24 октября 2019 *Александр Ершов* [Ура, физики из Google достигли квантового превосходства! А может, и не достигли! Мы не знаем, они не знают, никто не знает — на то оно и квантовое...](#)
51. [↑ D-Wave Sells Quantum Computer to Lockheed Martin.](#)
52. [↑ Customers](#), сайт D-Wave.
53. [↑ 3Q: Scott Aaronson on Google's new quantum-computing paper](#), 11 декабря 2015.

Литература[[править](#) | [править код](#)]

[↑ Показывать компактно](#)

Статьи

- Опенев Л. А. Спиновые логические вентили на основе квантовых точек // [Соросовский образовательный журнал](#), 2000, т. 6, № 3, с. 93-98;
- *G. Brassard, I. Chuang, S. Lloyd, C. Monroe. Quantum computing* // [PNAS](#). — 1998. — Vol. 95. — P. 11032—11033.
- [Килин С. Я. Квантовая информация](#) // [УФН](#). — 1999. — Т. 169. — С. 507—527.
- [Валиев К. А. Квантовые компьютеры: можно ли их сделать «большими»? // \[УФН\]\(#\). — 1999. — Т. 169. — С. 691—694.](#)
- *A. M. Steane, E. G. Rieffel. Beyond Bits: The Future of Quantum Information Processing* // [IEEE Computer](#). — January 2000. — P. 38—45.
- *Kilin S.Ya. Quanta and information* // [Progress in optics](#). — 2001. — Vol. 42. — P. 1-90.
- [Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // \[УФН\]\(#\). — 2005. — Т. 175. — С. 3—39.](#)
- *T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, J. L. O'Brien. Quantum Computing* // [Nature](#). — 2010. — Vol. 464. — P. 45—53.
- Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Глав. ред. В. А. Садовничий, Ижевск: ИЖТ, 1999. — 288с.

Книги

- [Квантовые вычисления за и против](#) / Под ред. Садовничего В. А.
- [Квантовый компьютер и квантовые вычисления](#) / Под ред. Садовничего В. А.

- [Прескилл Дж.](#) Квантовая информация и квантовые вычисления. — Ижевск: РХД, 2008—2011. — 464+312 с.
- [Скотт Ааронсон.](#) Квантовые вычисления со времен Демокрита = Scott Aaronson. Quantum Computing since Democritus. — М.: Альпина Нон-фикшн, 2017. — 494 p. — [ISBN 978-5-91671-751-8](#).

Ссылки [[править](#) | [править код](#)]

[\[показать\]](#)

Классы компьютеров

[\[показать\]](#)

См. также категорию [информация](#)