

УДК 539.184 539.186

## ПРОГРЕСС И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

© И. И. Бетеров<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

<sup>4</sup>Институт лазерной физики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б  
E-mail: [beterov@isp.nsc.ru](mailto:beterov@isp.nsc.ru)

В статье представлен краткий обзор современных достижений в квантовой информатике, проблем и перспектив развития квантовых вычислений. Обсуждаются элементарная математическая модель квантовых вычислений и понятие квантового превосходства. Рассматривается применение ультрахолодных атомов для реализации квантовых процессоров.

*Ключевые слова:* квантовая информатика, кубиты, одиночные атомы, оптические ловушки.

DOI: 10.15372/AUT20240104

EDN: MOVXWY

**Введение.** Квантовое превосходство — ключевое достижение последних лет в области квантовых вычислений [1]. До момента его достижения компанией Google в 2019 г. можно было промоделировать любой квантовый компьютер с помощью классического компьютера, поэтому практическое применение существующих квантовых компьютеров было изначально невозможным. После того как с помощью квантового процессора удалось продемонстрировать решение абстрактной математической задачи, появились потенциальные возможности для развития квантовых вычислений. Поскольку крупнейшие мировые IT-компании интенсивно развивают направление квантовых вычислений, это приводит к увеличению интереса к квантовым вычислениям среди множества технологических компаний во всём мире.

В 2023 г. в Москве состоялся Форум будущих технологий [2], на котором в дискуссии о будущем квантовых технологий приняли участие представители технологических компаний как специализирующихся в сфере информационных технологий, так и использующих передовые информационные технологии и развивающих их на своей базе. Кроме того, со стороны разработчиков квантовых технологий в дискуссии участвовали представители университетской и академической среды.

В ходе дискуссии стало ясно, что квалифицированные эксперты хорошо представляют состояние дел в сфере квантовых вычислений (быстрый технический прогресс в последние годы, большое количество нерешённых проблем, как технологических в сфере экспериментальной реализации прототипа квантового компьютера и создания на его базе реальных коммерческих систем, так и проблем разработки практически ценных алгоритмов). Количество квантовых алгоритмов, представляющих интерес для практического применения, остаётся исключительно небольшим.

Представители индустрии сформулировали своё видение будущего области — появление перспективных новых технологических рынков, возникновение острой востребованности в новых специалистах на этих рынках. В целом они видят параллели между бумом в области машинного обучения и больших данных в настоящее время и ожидаемым бумом в области квантовых вычислений. Довольно большое внимание уделялось тому, какие бизнес-модели будут использоваться в области квантовых технологий, какова роль сервисов облачного доступа.

Представители академического сектора были более осторожны, обращая внимание на большое количество нерешённых научно-технических проблем, препятствующих созданию практически применимого квантового процессора. В то же время они отметили бурный прогресс в последние несколько лет — увеличение масштаба квантового регистра и повышение точности квантовых операций, что в конечном счёте и позволило заявить о достижении квантового превосходства. Отдельно отмечены трудности в создании квантового процессора на полностью отечественной элементной базе. Особенности конкретной задачи, использованной для демонстрации квантового превосходства, а также убедительность этой демонстрации в ходе дискуссии практически не обсуждались.

Задача создания квантового компьютера объективно относится к переднему краю современной экспериментальной физики, поскольку управление квантовыми состояниями многочастичных квантовых систем — сложнейшая задача, требующая предельно точного контроля множества параметров современных физических установок и знания особенностей различных физических систем. В то же время концепция квантовых вычислений привела к тому, что эту задачу стали рассматривать не как физический эксперимент, а как основу для перспективных коммерческих приложений. Большую роль в этом сыграло активное участие IT-гигантов (Google, IBM, Microsoft). В действительности пока нет достаточных оснований ожидать, что развитие квантовых вычислений приведёт к революции в области информационных технологий, сравнимой с технологиями машинного обучения или развитием методов работы с большими данными. Эти неоправданные ожидания в конечном счёте могут привести к утрате интереса со стороны общества, бизнеса и государства к развитию данного научного направления. Сейчас эту проблему научное сообщество пытается решить путём интенсивного поиска приложений для уже существующих квантовых процессоров. Квантовое превосходство открыло дорогу для такого поиска, поскольку теперь уже невозможно промоделировать любой квантовый процессор с помощью классического компьютера. Но пока решение этой задачи не найдено. Вполне возможно, что практически полезные приложения появятся только при кардинальном увеличении масштаба квантового процессора. При этом эти приложения, скорее всего, будут иметь узкоспециализированный характер.

Вопрос, состоится ли вторая квантовая революция, когда состояния индивидуальных квантовых систем станут основой широко используемых технологий, на сегодняшний день остаётся открытым. Усилия исследователей как в академическом, так и в коммерческом секторах нацелены на то, чтобы она состоялась. Вместе с тем перенос на область квантовой физики представлений о революции в сфере информационных технологий, которая привела к широкому распространению новых технологических решений и вовлечению широких масс людей в создание новых продуктов, выглядит преждевременным. В этом плане развитие квантовых технологий больше похоже на космические исследовательские программы — сложные, не обещающие мгновенного экономического эффекта, вовлекающие достаточно узкий круг профессионалов. Отличие от космических программ заключается в том, что благодаря облачному доступу к квантовым процессорам квантовые вычисления становятся общедоступными для всех, интересующихся квантовой физикой. Они также оказывают значительное влияние на развитие смежных технологий — лазеров, микроэлектроники и многого другого.

Реалистичная оценка перспектив, связанных с достижением квантового превосходства, должна учитывать то, что развитие квантовых вычислений на сегодняшний день задаётся и определяется в первую очередь объективной логикой науки. Активное участие IT-компаний привело к тому, что в этой области вырос темп исследований, но характер этих исследований определяется самой природой и является революционным. В ближайшие годы станет ясно, позволят ли несовершенные квантовые процессоры решать какие-либо специализированные практические задачи, но вряд ли само по себе их решение будет революционным для информатики. В то же время нет сомнений в том, что это будет таковым для экспериментальной квантовой физики. Таким образом, вопреки заявлениям, бизнес уже сейчас поддерживает исследования, ориентированные на долгосрочную, а не краткосрочную перспективу. Полноценное участие индустрии в поддержке научных исследований переднего края ценно само по себе.

В целом в сфере квантовых технологий научные исследования сейчас значительно опережают существующие в экономике потребности в результатах этих исследований. Квантовая физика выступает в большей степени в роли потребителя высоких технологий, требуя создания высококлассного научного оборудования — лазеров, электронных устройств, криогенной и вакуумной техники. Такая ситуация может стать устойчивой, если это оборудование будет находить применение и в других сферах деятельности. Таким образом, для развития квантовых технологий большое значение имеют разнообразие приложений, практическое применение побочных продуктов исследовательской деятельности. Это подобно тому, как от исключительно исследовательских космических программ произошёл переход к многочисленным коммерческим приложениям и широкому распространению многих разработанных для космоса технологий. Аналогичная ситуация наблюдается и для исследований в области физики высоких энергий (коллайдеры), но это направление рассматривается всё же как сугубо исследовательское, нацеленное на познание природы, а не приложений. Квантовые технологии идеологически ближе к оптике или физике конденсированного состояния, для которых приложения всегда находятся рядом. В то же время ситуация в этой области существенно отличается от, например, биомедицинского сектора, развитие которого задаётся в первую очередь потребностями общества. Это создаёт другие мотивации для деятельности, хотя и там есть место любопытству исследователя.

Основные проблемы сферы квантовых технологий связаны не с организацией деятельности, а с отсутствием конкретных технологических приложений, которые могли бы быть востребованы в экономике. Эти приложения могут быть довольно неожиданными. На заре лазерной эры трудно было предсказать, что лазеры приведут в первую очередь не к новым версиям гиперболоида инженера Гарина, а к буму в оптоволоконных телекоммуникациях. Так и сегодня трудно идентифицировать наиболее перспективные приложения индивидуальных квантовых систем. Поэтому нужно стремиться к их наибольшему разнообразию.

В последние годы технический прогресс наиболее активно происходит в виртуальной области, тесно связанной с коммуникациями, межличностным общением, удобством для потребителя и пользователя. Сфера квантовых технологий опирается на сложный физический эксперимент, поэтому она ближе к индустриальному подходу, чем к современному виртуально-цифровому. Расширение этой сферы должно сопровождаться её радикальной трансформацией. Как на заре персональных компьютеров было трудно представить, зачем обычному человеку необходимо сложное вычислительное устройство, так и сейчас трудно представить, зачем ему нужна квантовая физика. Тем не менее растущее число пользователей квантовой платформы IBM, уже достигающее сотен тысяч, показывает, что такая потребность действительно существует. От нашей способности понять природу этой потребности во многом зависит будущее квантовых технологий.

Цель представленной работы — кратко рассмотреть современное состояние дел в области квантовых вычислений и перспективы различных физических платформ для создания квантового компьютера.

**Принципы квантовых вычислений.** Идея квантового компьютера была сформулирована Ю. Маниным в работе [3], а популярность приобрела после того, как Р. Фейнман выступил с лекциями, посвящёнными моделированию физики на компьютерах и квантово-механическим компьютерам [4]. Этому предшествовало рассмотрение задачи о количестве информации в квантовых состояниях двухуровневой системы А. Холево [5]. Именно этих трёх исследователей можно считать основоположниками квантовых вычислений.

В 1994 г. П. Шор предложил алгоритм факторизации больших чисел [6], который стал рассматриваться как наиболее важное практическое применение квантового компьютера. Это связано с тем, что невозможность эффективной факторизации больших чисел используется в современных алгоритмах шифрования с открытым ключом. Другие возможные приложения квантовых компьютеров включают моделирование сложных физических систем, решение задач квантовой химии, поиск глобальных минимумов в оптимизационных задачах, а также реализацию новых методов машинного обучения. Математически действие квантового компьютера характеризуется как унитарное преобразование вектора, описывающего состояние многочастичной квантовой системы [7].

Основой квантового компьютера является квантовый регистр, состоящий из квантовых битов (кубитов) — двухуровневых квантовых систем [7]. Два ортонормированных базисных состояния кубита рассматриваются в качестве логического нуля и единицы. Как правило, в качестве таких состояний выбираются хорошо различимые состояния физической системы, например, соответствующие различным значениям энергии. Для удобства обозначим их как  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ . Используется также векторная система обозначений

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

В отличие от классического бита квантовый бит может находиться в суперпозиции состояний  $a|0\rangle + b|1\rangle$ , где  $a$  и  $b$  — комплексные коэффициенты. Следовательно, квантовый регистр, состоящий из  $n$  кубитов, может находиться в суперпозиции  $2^n$  ортонормированных базисных состояний. Этим обусловлено преимущество квантового компьютера, связанное с квантовым параллелизмом, — возможностью проводить преобразования над всеми состояниями регистра одновременно.

С учётом того, что волновая функция определена с точностью до глобальной фазы, состояние одного кубита можно представить в следующем виде:  $\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin(\theta/2)|1\rangle$ , где параметры  $\theta$  и  $\varphi$  принимают значения в диапазонах  $\theta \in [0, \pi]$  и  $\varphi \in [0, 2\pi]$ . Тогда состояние кубита можно представить вектором на единичной сфере, которая называется сферой Блоха (рис. 1).

Преобразования состояний кубитов называются квантовыми вентилями. Как правило, рассматриваются преобразования состояния одного (однокубитовый вентиль) или двух кубитов (двухкубитовый вентиль). На рис. 1 приведены схемы и результат действия наиболее распространённых однокубитовых вентилях. Горизонтальная линия обозначает состояние кубита. Действие вентиля  $X$  описывается матрицей Паули  $\sigma_X$ , умноженной на вектор состояния кубита. Таким образом, вентиль  $X$  описывает преобразование  $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ ,  $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$ , что эквивалентно классическому вентилю «Не». Преобразование произвольной квантовой суперпозиции выглядит следующим образом:  $a|0\rangle + b|1\rangle \rightarrow a|1\rangle + b|0\rangle$ . Это соответствует вращению вектора Блоха на сфере, как показано на рис. 1, *a*.

Вентиль Адамара  $H$  не имеет классического аналога. Этот вентиль создаёт квантовые суперпозиции в соответствии с правилами  $|0\rangle \rightarrow (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$  и  $|1\rangle \rightarrow (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ . Его действие может быть описано матрицей Адамара

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

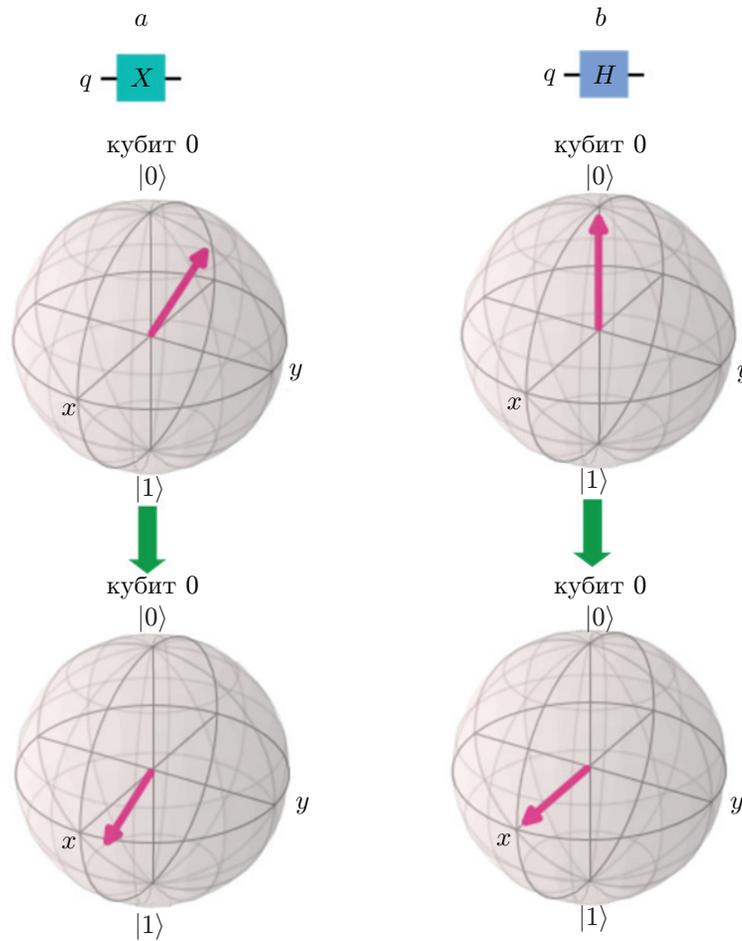


Рис. 1. Преобразование состояний кубита при выполнении: вентиля  $X$  (а), вентиля  $H$  (б)

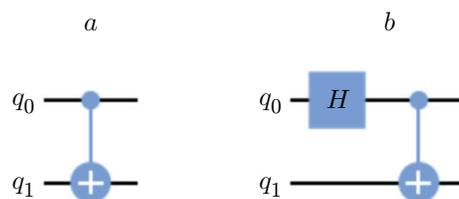


Рис. 2. Применение двухкубитовых вентилях: схема двухкубитового вентиля CNOT (а), схема генерации перепутанных состояний Белла (б)

В результате, если изначально вектор Блоха был ориентирован в направлении одного из полюсов, то после выполнения вентиля Адамара он окажется на экваторе (рис. 1, б).

Для реализации произвольного квантового алгоритма необходимо помимо однокубитовых вентилях уметь выполнять и двухкубитовые, например, CNOT (рис. 2, а). Этот вентиль аналогичен операции «Исключающее ИЛИ». При его выполнении состояние контролируемого кубита  $|t\rangle$  инвертируется в том случае, если контролирующий кубит  $|c\rangle$  находился в состоянии  $|1\rangle$ . Контроль показан закрашенным кругом на рис. 2, а, а переречёркнутая окружность обозначает контролируемую инверсию состояния. Состояние системы из двух кубитов преобразуется по правилам  $|00\rangle \rightarrow |00\rangle$ ,  $|01\rangle \rightarrow |01\rangle$ ,  $|10\rangle \rightarrow |11\rangle$ ,  $|11\rangle \rightarrow |10\rangle$  и описывается эволюцией четырёхмерных векторов состояний системы из двух кубитов.

Интересная особенность вентиля CNOT заключается в том, что с его помощью можно создать перепутанные состояния системы из двух кубитов. Схема их генерации приведена на рис. 2, *b*. Первоначально система из двух кубитов находится в состоянии  $|00\rangle$ . После выполнения вентиля Адамара и вентиля CNOT конечное состояние системы описывается выражением  $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ . Такое состояние невозможно представить в виде произведения состояний отдельных кубитов, поэтому оно называется перепутанным, или ЭПР-состоянием, по имени впервые рассмотревших его Эйнштейна, Подольского и Розена [8].

В настоящее время разработан целый ряд квантовых алгоритмов, основанных на квантовом преобразовании Фурье, которое является аналогом классического дискретного преобразования Фурье [7]. В частности, к ним относится решение задачи факторизации (алгоритм Шора) и алгоритм поиска собственного значения унитарного оператора, что важно для задач квантовой химии. Другой распространённый класс квантовых алгоритмов — это алгоритмы поиска в неупорядоченной базе данных.

**Квантовое превосходство.** Ожидание быстрых практических применений сопровождало всю историю развития квантовой информатики. Ярким примером является подход, который был изначально положен в идеологию компании D-Wave (Канада), впервые заявившей ещё в 2011 г. о создании коммерческого квантового компьютера [9]. Замысел исследователей компании заключался в том, чтобы отказаться от вышеописанной «вентильной» архитектуры квантового компьютера и вместо этого создать достаточно масштабную совокупность кубитов для решения оптимизационных задач. Отказавшись от «вентильной» архитектуры, компания D-Wave смогла радикально увеличить число кубитов в своём квантовом процессоре, но при этом преимущество такого квантового компьютера перестало быть математически обоснованным. В результате возникла довольно длительная научная дискуссия о возможности превосходства квантового процессора D-Wave над обычным компьютером, в рамках которой было опубликовано последовательно несколько статей, опровергающих выводы предыдущих. Упомянем среди них работу [10], в которой подробно обсуждался вопрос — как правильно сравнивать быстродействие классического и квантового компьютеров, и относительно недавнюю работу [11]. Компания D-Wave продолжает придерживаться выбранного ими подхода, тем самым занимая особую нишу в области задач квантовой оптимизации и не ставя задачу реализации универсальных квантовых вычислений.

В 2012 г. Дж. Прескиллом была сформулирована концепция «квантового превосходства» [12], согласно которой ближайшая цель заключается в демонстрации того, что классические компьютеры не могут эффективно промоделировать динамику хорошо контролируемой квантовой системы. Такая демонстрация ещё не сделала бы квантовые компьютеры практически полезными, но была бы абсолютно необходимым шагом на пути к этому. Этот подход был взят на вооружение компанией Google, которая в 2017 г. опубликовала план демонстрации квантового превосходства, выбрав оптимальную для этой цели математическую задачу и сформулировав необходимые для её решения требования к квантовому процессору [13]. Задача заключалась в получении распределения вероятностей результатов измерения состояния квантового процессора после выполнения квантового алгоритма, в котором случайно задаются различные однокубитовые вентили и встречаются двухкубитовые. Успешная демонстрация квантового превосходства, состоявшаяся в 2019 г. [1], как и в случае с D-Wave, вызвала дискуссию о том, насколько убедительны полученные результаты. В частности, китайские исследователи в 2021 г. показали, что существуют эффективные классические методы решения задачи, поставленной Google [14]. Но затем появились экспериментальные работы с более убедительной демонстрацией квантового превосходства за счёт больших вычислительных ресурсов квантового процессора — как сверхпроводящего, так и фотонного [15].

**Физические системы для реализации квантовых вычислений.** Практически любая квантовая система может рассматриваться как платформа для реализации квантовых вычислений. В [16] сформулированы критерии, которым должна удовлетворять физическая система для создания квантового компьютера:

1. Квантовый регистр должен состоять из кубитов. Отдельные кубиты должны быть различимы, и состояние каждого из них должно быть управляемо извне. Это требует индивидуальной адресации к отдельным кубитам. Не должно происходить самопроизвольных переходов на какой-либо другой квантовый уровень. Важно, чтобы количество кубитов можно было сделать достаточно большим (порядка  $10^3$ – $10^6$ ).

2. Перед началом квантовых вычислений нужно провести инициализацию квантового регистра (например, перевести все кубиты регистра в состояние  $|0\rangle$ ). Это означает, что в физических системах, используемых в качестве кубитов, должны быть процессы, «стирающие» исходное состояние системы.

3. Состояния кубитов не должны разрушаться в течение длительного времени, в  $10^4$ – $10^5$  раз превышающего время отдельной квантовой операции, что позволит выполнять квантовую коррекцию ошибок и реализовывать алгоритмы достаточно большой глубины (более 10 000 логических вентиляей). В то же время в исходной работе отмечалось, что при использовании квантовой коррекции ошибок достижим пороговый уровень, когда дальнейшее увеличение глубины квантового алгоритма не будет повышать требования к скорости разрушения состояний кубитов.

4. Необходимо выполнять как однокубитовые, так и двухкубитовые квантовые вентили (например, вентиль CNOT).

5. Необходимо точно измерять состояния квантовой системы. Как правило, после выполнения квантового алгоритма эти состояния принадлежат к вычислительному базису и не являются суперпозицией его состояний, т. е. они допускают получение однозначного ответа в результате единственного измерения.

Наибольший прогресс в настоящее время достигнут при использовании сверхпроводящих кубитов на основе переходов Джозефсона. Наилучшие результаты для точности двухкубитовых вентиляей в сверхпроводящих системах, продемонстрированных компанией Google, составляют 99,66 % [17]. Такие кубиты требуют криогенных температур. Для создания кубитов используются методы современной микроэлектроники (литография и т. д.).

В то же время до сих пор точность квантовых вентиляей на основе сверхпроводящих кубитов остаётся недостаточно высокой. Более того, характеристики различных кубитов и различных пар кубитов в таких процессорах могут существенно отличаться. В связи с этим сохраняется интерес к альтернативным физическим системам. Наибольшая точность двухкубитовых вентиляей (ошибка не превышает  $10^{-3}$ ) достигнута в экспериментах с ультрахолодными ионами [18]. Как правило, эксперименты проводятся с колеблющимися цепочками ионов. Методы захвата и лазерного охлаждения ионов хорошо известны. Заряженные частицы могут удерживаться в ловушках в течение длительного времени (часы или дни). Наиболее существенным ограничением в развитии квантовых процессоров на основе ультрахолодных ионов является их масштабирование. С увеличением размерности цепочки захваченных ионов в ловушке существенно затрудняется контроль за колебательными состояниями цепочки ионов.

К интересным системам для реализации квантовых вычислений относятся также азотные вакансии в алмазах (твердотельная система, не требующая криогенного окружения), квантовые точки, фотоны (линейные оптические квантовые компьютеры) и ультрахолодные нейтральные атомы [19].

**Ультрахолодные атомы для реализации квантовых вычислений.** В 1997 г. Нобелевская премия по физике была присуждена за разработку методов охлаждения и захвата атомов лазерным излучением [20]. Основные физические эффекты, лежащие в основе лазерного охлаждения, были впервые рассмотрены В. Летоховым [21]. В свою очередь, механическое действие света было впервые экспериментально продемонстрировано П. Н. Лебедевым в 1899 г.

Лазерное охлаждение основывается на взаимодействии атомов с резонансным лазерным излучением. Движущийся навстречу световому пучку атом поглощает фотоны и в силу закона сохранения импульса замедляет своё движение. Комбинация световых и магнитных полей позволяет замедлять движение атомов и удерживать их в пространстве так, что образуется облако флуоресцирующих атомов с температурой около 100 мкК.

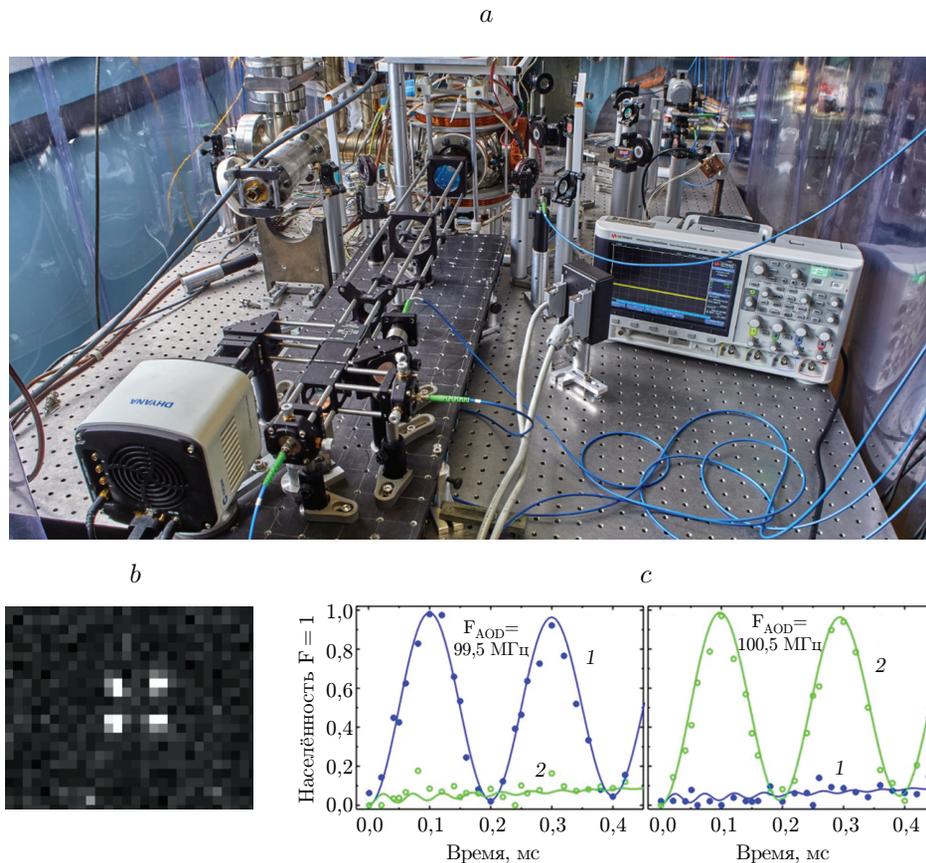
Идея использования ультрахолодных нейтральных атомов для создания квантового компьютера была предложена в [19]. Квантовый регистр представляет собой массив оптических дипольных ловушек или оптических пинцетов [22, 23], в каждом из которых находится по одному атому. Оптический пинцет формируется путём фокусировки интенсивного лазерного излучения. За разработку оптического пинцета для биологических объектов была присуждена Нобелевская премия в 2018 г. (А. Эшкин), но те же самые методы можно использовать и для захвата отдельных атомов.

Атомы сначала охлаждаются и захватываются лазерным излучением, а затем — захватываются в массив фокусов лазерных пучков. Такие массивы, как правило, формируются средствами дифракционной оптики. Для оптической диагностики атомов в дипольных ловушках используется резонансная флуоресценция, индуцированная излучением охлаждающих лазеров. Для получения изображений массивов применяются специализированные высокочувствительные видеокамеры.

На рис. 3, *a* изображена экспериментальная установка в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. На переднем плане видна оптическая система захвата атомов в оптические пинцеты и видеокамера для регистрации флуоресценции одиночных атомов. На заднем плане находится вакуумная камера, в которую фокусируется лазерное излучение. На рис. 3, *b* дано изображение четырёх флуоресцирующих атомов в оптических пинцетах. Число атомов в массиве определяется главным образом интенсивностью лазерного излучения, во многих современных экспериментах превышая 100 [24], и может быть, в принципе, увеличено до  $10^4$ – $10^6$  [25–29]. Отсутствие принципиальных ограничений на масштаб атомного квантового регистра является одним из основных преимуществ атомной платформы.

В качестве логических состояний атомного кубита, как правило, используются долгоживущие сверхтонкие подуровни основного состояния атомов щелочных металлов, чаще всего рубидия или цезия [27–29]. Разработаны методы достаточно точной инициализации регистра методом оптической накачки и диагностики логических состояний атомов. Довольно трудной задачей является диагностика конечного состояния атома методом резонансной флуоресценции. Вследствие оптической накачки во время наблюдения атома его квантовое состояние разрушается. Поэтому, для того чтобы определить, в каком квантовом состоянии оказался атом, перед наблюдением используется «выдавливающий» лазерный импульс, настроенный в резонанс для перехода из одного из логических состояний атома во вспомогательное. Находящийся в исходном состоянии атом будет взаимодействовать с лазерным излучением. На атом будет действовать сила, которая заставит его покинуть ловушку. Таким образом, по наличию или отсутствию атома в ловушке после выдавливающего лазерного импульса можно определить его квантовое состояние.

Управлять переходами между логическими состояниями атомов с индивидуальной адресацией можно, комбинируя лазерные и микроволновые поля. На рис. 3, *c* показаны полученные в нашем эксперименте [30] осцилляции населённостей логических состояний



*Рис. 3.* Эксперимент в ИФП СО РАН: *a* — экспериментальная установка, *b* — массив из четырёх одиночных атомов рубидия, *c* — когерентные осцилляции населённостей сверхтонких подуровней состояний атомов (логические ноль и единица) в двух пространственно разнесённых оптических пинцетах с индивидуальной адресацией (кривая 1 — ловушка 1, кривая 2 — ловушка 2)

двух кубитов под действием микроволнового поля. Освещая по очереди пинцеты дополнительным лазерным пучком, сдвигающим уровни энергии атома, можно добиться индивидуальной адресации к каждому атому, поскольку под действием лазерного излучения атомы будут выводиться из резонанса с микроволновым полем [30].

Наиболее трудная задача — выполнение точных двухкубитовых вентилях с нейтральными атомами [31–33]. Впервые такие вентиля были продемонстрированы в 2010 г. [31] в Висконсинском университете г. Мадисон (США). Для этого использовался эффект дипольной блокады — при возбуждении атома в высоковозбуждённые (так называемые ридберговские) состояния вследствие диполь-дипольного взаимодействия сдвигаются уровни энергии близко расположенных атомов, и их одновременное лазерное возбуждение оказывается невозможным. Типичные расстояния между атомами, на которых наблюдается этот эффект, — 5–10 мкм. В [34] была продемонстрирована точность двухкубитовых вентилях более 99,5 % при их параллельном выполнении для 60 атомов рубидия. Это открывает возможности для создания квантовых регистров с нейтральными атомами, сочетающими большой масштаб и высокую точность. Атомные системы на сегодняшний день уступают сверхпроводящим в плане воспроизводимости результатов и параметров, но при этом могут быть реализованы в условиях небольшой лаборатории.

**Заключение.** В последние годы достигнут значительный прогресс в реализации квантовых компьютеров и экспериментально продемонстрировано квантовое превосходство — возможность использования квантовых процессоров для решения задач, которые не могут быть решены обычными компьютерами. Несмотря на то, что целый ряд научных и технических проблем должен быть решён, прежде чем практическое применение квантовых компьютеров станет возможным, существующие уже сейчас квантовые процессоры позволяют получать важные научные результаты. Самыми перспективными физическими платформами для реализации квантовых вычислений в настоящее время считаются сверхпроводящие кубиты и ультрахолодные ионы. В то же время альтернативные физические системы, включающие ультрахолодные нейтральные атомы, обладают большим потенциалом и демонстрируют быстрый прогресс в последние годы.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-42-00031, <https://rscf.ru/project/23-42-00031/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Arute F., Arya K., Babbush R. et al.** Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // *Nature*. 2019. **574**, Iss. 7779. P. 505–510.
2. **Форум** будущих технологий. Вычисления и связь. Квантовый мир. Фонд Росконгресс. Москва, Россия, 9–14 июля, 2023. URL: <https://roscongress.org/events/forum-tekhnologiy-budushchego-kvantovuyu-mir/about/> (дата обращения: 24.10.2023).
3. **Манин Ю. И.** Вычислимое и невычислимое. М.: Советское радио, 1980. 128 с.
4. **Feynman R. P.** Simulating physics with computers // *Int. J. Theor. Phys.* 1982. **21**, N 6/7. P. 467–488.
5. **Холево А. С.** Границы количества информации, передаваемой по квантовому каналу связи // *Проблемы передачи информации*. 1973. **9**, № 3. С. 177–183.
6. **Shor P. W.** Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring // *Proc. of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. Santa Fe, USA, 20–22 Nov., 1994. P. 124–134.
7. **Нильсен М., Чанг И.** Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир, 2006. 824 с.
8. **Einstein A., Podolsky B., Rosen N.** Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Phys. Rev.* 1935. **47**. P. 777–780.
9. **Quantum-computing** firm opens the box. May 12, 2011. URL: <https://web.archive.org/web/20110515083848/http://physicsworld.com/cws/article/news/45960> (дата обращения: 24.10.2023).
10. **Rönnow T. F., Wang Z., Job J. et al.** Quantum computing. Defining and detecting quantum speedup // *Science*. 2014. **345**, Iss. 6195. P. 420–424.
11. **King A. D., Raymond J., Lanting T. et al.** Scaling advantage over path-integral Monte Carlo in quantum simulation of geometrically frustrated magnets // *Nature Communications*. 2021. **12**. 1113. P. 1–6.
12. **Preskill J.** Quantum computing and the entanglement frontier // *Quantum Phys.* 2012. 1203.5813. URL: <https://arxiv.org/abs/1203.5813> (дата обращения: 24.10.2023).
13. **Neill C., Rouchan P., Kechedzhi K. et al.** A blueprint for demonstrating quantum supremacy with superconducting qubits // *Science*. 2017. **360**, Iss. 6385. P. 195–199.
14. **Pan F., Zhang P.** Simulation of Quantum Circuits Using the Big-Batch Tensor Network Method // *Phys. Rev. Lett.* 2022. **128**, Iss. 3. 030501. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.03074> (дата обращения: 24.10.2023).
15. **China** quantum computers are 1 million times more powerful Google's. TechHQ. URL: <https://techhq.com/2021/10/china-has-quantum-computers-that-are-a-million-times-more-powerful-than-googles/> (дата обращения: 24.10.2023).

16. **DiVincenzo D. P.** Quantum Computation // Science. 1995. **270**, N 5234. P. 255–261.
17. **Barends R., Quintana C. M., Petukhov A. G. et al.** Diabatic Gates for Frequency-Tunable Superconducting Qubits // Phys. Rev. Lett. 2019. **123**, Iss. 21. 210501.
18. **Gaebler J. P., Tan T. R., Lin Y. et al.** High-Fidelity Universal Gate Set for  $^9\text{Be}^+$  Ion Qubits // Phys. Rev. Lett. 2016. **117**, Iss. 6. 060505.
19. **Jaksh D., Cirac J. I., Zoller P. et al.** Fast Quantum Gates for Neutral Atoms // Phys. Rev. Lett. 2000. **85**, Iss. 10. P. 2208–2211.
20. **The Nobel Prize in Physics 1997.** URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/summary/> (дата обращения: 24.10.2023).
21. **Letokhov V. S., Minogin V. G., Pavlik B. D.** Cooling and trapping of atoms and molecules by a resonant laser field // Opt. Commun. 1976. **19**, Iss. 1. P. 72–75.
22. **Chu S., Bjorkholm J. E., Ashkin A., Cable A.** Experimental Observation of Optically Trapped Atoms // Phys. Rev. Lett. 1986. **57**, Iss. 3. P. 314–317.
23. **Grimm R., Weidemüller M., Ovchinnikov Yu. B.** Optical Dipole Traps for Neutral Atoms // Adv. At. Mol. Opt. Phys. 2000. **42**. P. 95–170.
24. **Nogrette F., Labuhn H., Ravets S. et al.** Single-Atom Trapping in Holographic 2D Arrays of Microtraps with Arbitrary Geometries // Phys. Rev. X. 2014. **4**, Iss. 2. 021034.
25. **Schlosser M., Tichelmann S., Kruse J., Birkl G.** Scalable architecture for quantum information processing with atoms in optical micro-structures // Quant. Inform. Process. 2011. **10**, N 6. 907.
26. **Saffman M., Walker T. G., Mølmer K.** Quantum information with Rydberg atoms // Rev. Mod. Phys. 2010. **82**, Iss. 3. 2313.
27. **Saffman M.** Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: Progress and challenges // Journ. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2016. **49**. 202001.
28. **Рябцев И. И., Бетеров И. И., Третьяков Д. Б. и др.** Спектроскопия холодных ридберговских атомов рубидия для применений в квантовой информатике // УФН. 2016. **182**, № 2. С. 206–219.
29. **Бетеров И. И.** Квантовые компьютеры и ультрахолодные атомы // Природа. 2023. **1292**, № 4. С. 3–13.
30. **Бетеров И. И., Якшина Е. А., Третьяков Д. Б. и др.** Реализация однокубитовых квантовых операций с индивидуальной адресацией двух атомов рубидия в двух оптических дипольных ловушках // Квантовая электроника. 2021. **51**, № 6. С. 464–472.
31. **Isenhowe L., Urban E., Zhang X. L. et al.** Demonstration of a Neutral Atom Controlled-NOT Quantum Gate // Phys. Rev. Lett. 2010. **104**, Iss. 1. 010503.
32. **Levine H., Keesling A., Semeghini G. et al.** Parallel Implementation of High-Fidelity Multiqubit Gates with Neutral Atoms // Phys. Rev. Lett. 2019. **123**, Iss. 17. 170503.
33. **Fu Z., Xu P., Sun Y. et al.** High-fidelity entanglement of neutral atoms via a Rydberg-mediated single-modulated-pulse controlled-phase gate // Phys. Rev. A. 2022. **105**, Iss. 4. 042430.
34. **Evered S. J., Bluvstein D., Kalinowski M. et al.** High-fidelity parallel entangling gates on a neutral atom quantum computer // Nature. 2023. **622**, Iss. 7982. P. 268–272.

*Поступила в редакцию 24.10.2023*

*После доработки 15.12.2023*

*Принята к публикации 26.12.2023*