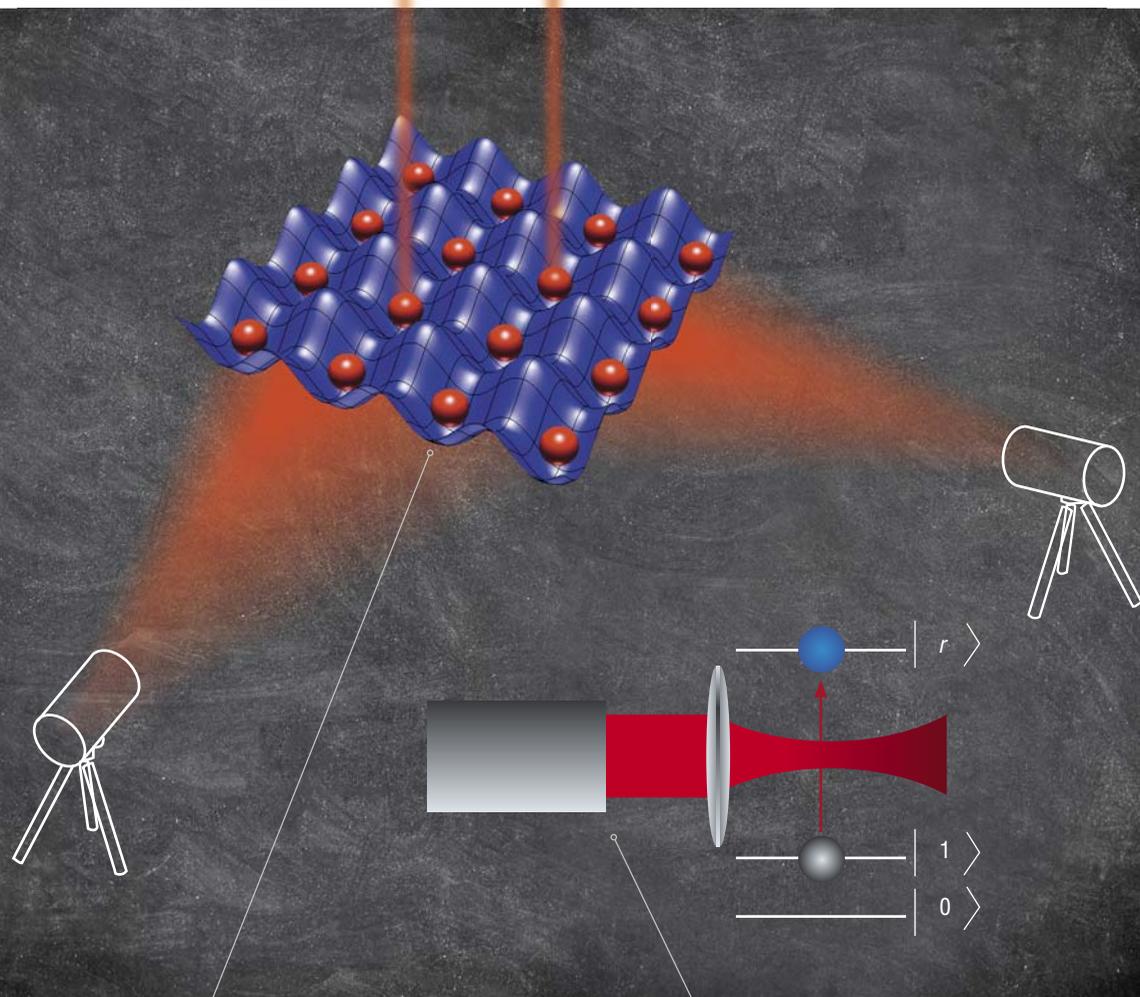


КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

на «ХОЛОДНЫХ АТОМАХ»



Основа квантового компьютера – кубиты, квантовые объекты, каждый из которых может находиться в одном из двух квантовых состояний. Кубиты могут быть изготовлены на основе атомов щелочных металлов, охлажденных до сверхнизких температур и удерживаемых лазерным излучением. Квантовая информация хранится в двух долгоживущих сверхтонких подуровнях основного состояния атома, рассматриваемых как логические нули и единицы. Взаимодействие атомов друг с другом происходит при лазерном возбуждении высоковозбужденных (ридберговских) состояний

Нередко возникает вопрос: есть ли в современной физике задачи, сопоставимые по значимости с созданием атомной бомбы? Такой задачей можно считать создание квантового компьютера. Хотя этим занимается множество физиков, вопрос о том, можно ли создать практически полезный квантовый компьютер, остается открытым. Интерес к реализации квантовых вычислений вызван даже не столько их практической значимостью, сколько тем, что проблема квантового компьютера тесно связана с одним из магистральных направлений современной науки – управлением отдельными квантовыми системами. Работы в этой области в 2012 г. были удостоены Нобелевской премии по физике

До сих пор прогресс в микроэлектронике иллюстрировался эмпирическим законом Мура: каждые два года число транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается. Однако законы квантовой механики ставят предел быстротедействию обычных компьютеров, поскольку дальнейшее уменьшение размеров транзистора невозможно из-за эффекта квантового туннелирования электрона через закрытый затвор транзистора.

В настоящее время созданы технологии фотолитографии с разрешающей способностью 14 нм, а квантовый предел ширины затвора составляет приблизительно 5 нм. И в этом смысле квантовые вычисления – это попытка превратить ограничения в преимущество.

Родом из СССР

Идея квантовых вычислений имеет российское (советское) происхождение. Еще в 1973 г. математик А. С. Холево опубликовал работу, в которой доказал теорему Холево, что n двухуровневых квантовых систем (квантовых битов) могут хранить информации больше, чем n битов. Спустя семь лет идею создания «квантовых автоматов», т.е. квантового компьютера, выдвинул советский математик Ю. И. Манин во введении к своей книге «Вычислимое и невычислимое» (1980). Но популярность к квантовым компьютерам пришла годом позже, после того как на эту проблему обратил внимание выдающийся американский физик, Нобелевский лауреат Р. Фейнман.

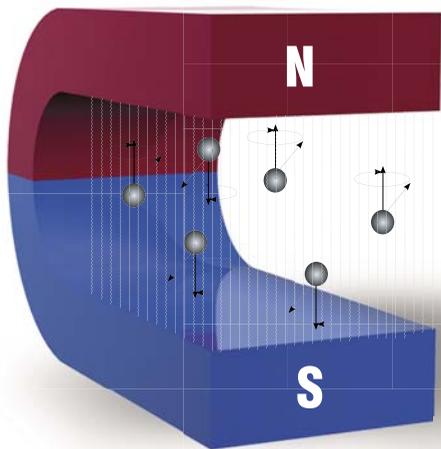
В дальнейшем ученые заинтересовались так называемыми *квантовыми симуляторами* – искусственно созданными квантово-механическими системами, которые могут быть использованы для моделирования физических явлений в более сложных системах. Сами же квантовые компьютеры нужны для решения математических задач, относящихся к категории невычислимых, для которых увеличение массива входных данных ведет к экспоненциальному росту числа операций на классическом компьютере.

Следует отметить, что квантовые компьютеры вовсе не должны заменить обычные компьютеры. Как, например, появление лазеров не привело к исчезновению обычных источников света, – благодаря лазерной технологии появилась возможность решения новых специфических задач. И хотя эффективность квантовых алгоритмов можно демонстрировать на примере таких задач, как факторизация больших чисел, намного более важным может оказаться применение квантовых компьютеров для моделирования физических явлений в сфере нано- и биотехнологий.



БЕТЕРОВ Илья Игоревич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейных резонансных процессов и лазерной диагностики Института физики полупроводников СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 30 научных работ

Ключевые слова: квантовый компьютер, ридберговские атомы.
Key words: quantum informatics, Rydberg atoms



Кубиты могут быть изготовлены на основе ядер атомов, обладающих собственным магнитным моментом – спином. В магнитном поле спин начинает прецессировать вокруг направления поля, но сохраняет ориентацию вверх или вниз. Два возможных направления спина соответствуют двум состояниям, кодирующим двоичную информацию

Как устроен квантовый компьютер?

Основа квантового компьютера – *квантовый регистр*, система, состоящая из N квантовых объектов, каждый из которых может находиться в двух квантовых состояниях. Такие квантовые объекты называются *квантовыми битами* или *кубитами*. Два состояния кубита «0» и «1» соответствуют логическому нулю и единице. В отличие от классического бита, кубит может находиться в квантовой суперпозиции состояний

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Квантовый регистр из N кубитов может находиться в когерентной суперпозиции 2^N состояний. Элементарная операция в квантовых вычислениях производится над всей суперпозицией – в классическом компьютере для этого потребовалось бы 2^N шагов. Таким образом, квантовый параллелизм является важным практическим преимуществом квантовых вычислений.

Для выполнения квантовых вычислений необходимы как однокубитовые логические операции, когда направленно изменяется квантовое состояние отдельного кубита, так и двухкубитовые, при которых преобразуется состояние двух кубитов одновременно. При этом такие пары кубитов могут оказаться в так называемых перепутанных состояниях, которые привлекают внимание физиков с 1935 г., когда была опубликована статья о парадоксе Эйнштейна-Подольского-Розена (А. Einstein, В. Podolsky, N. Rosen, 1935).

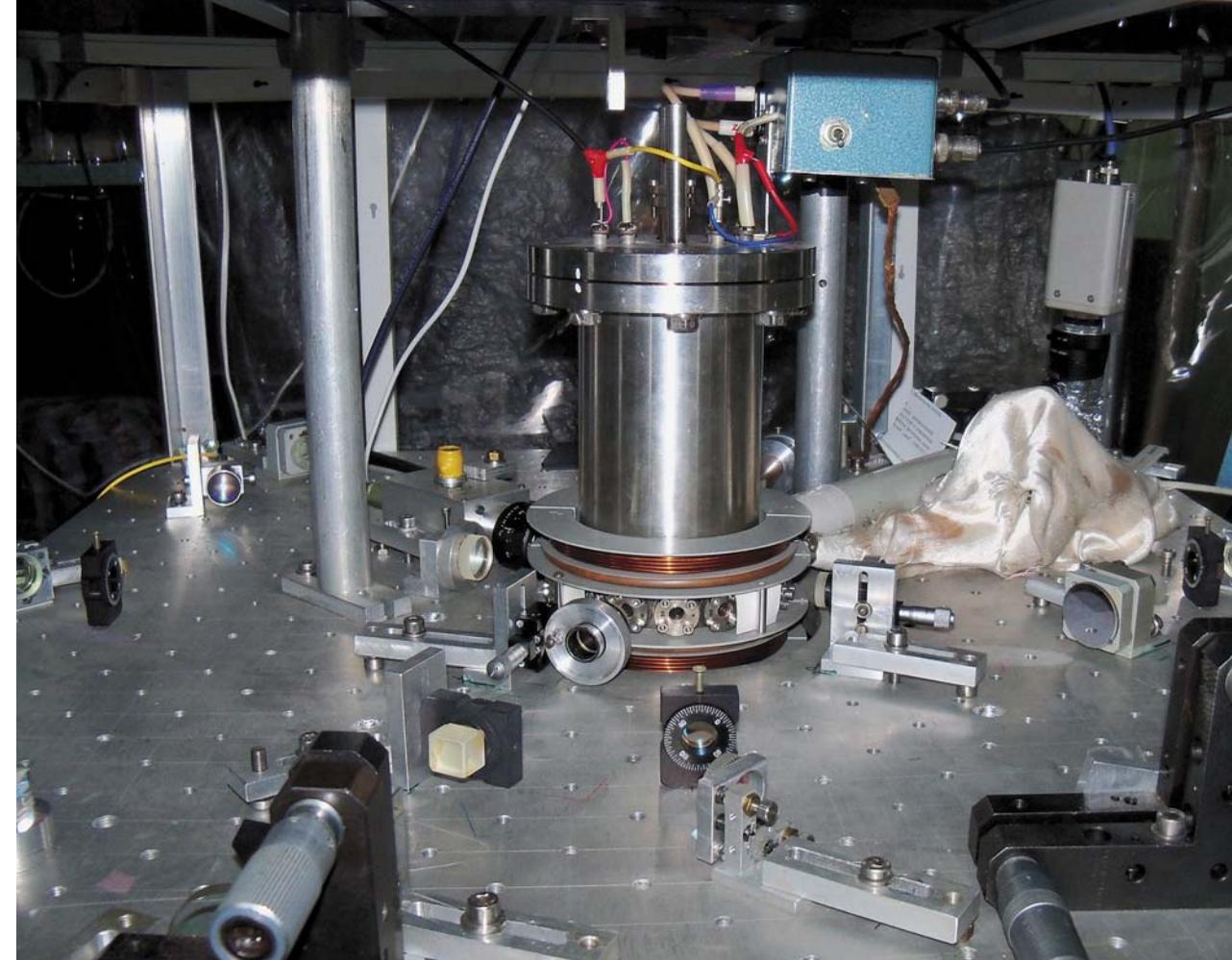
В ИФП СО РАН создана установка для экспериментов с ультрахолодными ридберговскими атомами. Атомы рубидия внутри вакуумной камеры захватываются в магнитооптическую ловушку, образованную тремя парами ортогональных встречных лазерных пучков и двумя катушками, создающими неоднородное магнитное поле. Затем холодные атомы возбуждаются в ридберговские состояния и благодаря огромным величинам дипольных моментов начинают взаимодействовать друг с другом на расстояниях порядка 10 мкм. Для регистрации ридберговских атомов используется метод селективной полевой ионизации, когда атом, находящийся в определенном квантовом состоянии, ионизируется постоянным электрическим полем

В последние десять лет в реализации идеи квантовых компьютеров произошел значительный прогресс. Наиболее важное требование к квантовому компьютеру как физической системе – управление состоянием каждого отдельного кубита и предельная изоляция от внешнего окружения.

В настоящее время рассматриваются различные физические системы, пригодные для реализации квантовых вычислений. Например, в качестве состояний кубита можно рассматривать состояния поляризации фотонов, которые практически не подвержены декогеренции. Основным недостатком подобных схем квантовых вычислений является большая скорость потерь фотонов, сопоставимая со скоростью декогеренции в альтернативных реализациях квантового компьютера.

Квантовую информацию можно кодировать и в сверхтонких состояниях нейтральных атомов, время жизни которых составляет секунды. Дальнодействующие взаимодействия между атомами позволяют выполнять двухкубитовые логические операции. Нейтральные атомы можно захватывать в оптические решетки, образуемые стоячими световыми волнами. Для этого необходимо предварительно охладить атомы до сверхнизких температур силами резонансного светового давления – эти работы также были отмечены Нобелевской премией по физике (1997 г.). В результате удается создать пространственно упорядоченные структуры из нейтральных атомов, захваченных лазерным излучением.

В 2010 г. в университете Висконсин-Мэдисон (США) впервые были продемонстрированы двухкубитовые квантовые логические операции с нейтральными холодными атомами. В настоящее время ведутся работы с 49 кубитами. Близкий подход – применение ионов, охлажденных лазерным излучением за счет сил резонансного светового давления и удерживаемых электрическим полем.



Для практического применения наибольший интерес представляют сверхтонкие технологии. Широко известным и достаточно перспективным методом реализации квантового компьютера является использование сверхпроводников. Преимущество такого подхода – большие времена декогеренции несмотря на мезоскопический масштаб отдельных кубитов, где в коллективном движении участвуют $\sim 10^{10}$ электронов.

Канадская компания *D-Wave Systems* еще в феврале 2007 г. заявила о создании первого образца квантового компьютера с использованием сверхпроводящих кубитов. Эти устройства, тем не менее, не являются полноценными универсальными квантовыми компьютерами, поскольку в них пока не продемонстрировано ускорения вычислений, связанных с квантовым параллелизмом (Cho, 2014).

Ряд направлений, которые могут привести к созданию квантового компьютера на основе сверхпроводников, сегодня развивается в Институте физики полупроводников СО РАН. Они включают в себя исследование квантовых точек, азотных вакансий в алмазе и взаимодействия ультрахолодных ридберговских атомов. В институте создана и успешно работает единственная в России установка для экспериментов с ультрахолодными ридберговскими атомами, на которой исследуется диполь-дипольное взаимодействие отдельных высоковозбужденных атомов, необходимое для реализации квантовых вычислений.

В заключение стоит отметить, что, несмотря на достигнутые успехи и огромный интерес со стороны физиков, к перспективам возможности создания полноценного квантового компьютера пока следует относиться с осторожным оптимизмом.

В центре экспериментальной установки ИФП СО РАН расположена вакуумная камера, в которой атомы рубидия охлаждаются лазерным излучением до температур в сотни микрокельвин и возбуждаются в ридберговские состояния. Фото И. Бетерова

Литература

Валиев К.А., Кокин А.А. *Квантовые компьютеры: надежды и реальность*. Ижевск: РХД, 2001. 352 с.

Манин Ю.И. *Вычислимое и невычислимое*. М.: Сов. радио, 1980. 128 с.

Feynman R.P. *Simulating physics with computers* // *Int. J. Theor. Phys.* 1982. V. 21. P. 467.