

Институт физики полупроводников СО РАН Новосибирский государственный университет

<u>И.И.Рябцев</u>, И.И.Бетеров, Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, Е.А.Якшина, И.Г.Неизвестный, А.В.Латышев, А.Л.Асеев

Реализация квантового компьютера и симулятора с ультрахолодными атомами в оптических ловушках

Варианты кубитов квантового компьютера





cavity QED







D

200nm

quantum dots



superconductors





ion traps (Innsbruck)

КВАНТОВЫЙ ПРОЦЕССОР GOOGLE





72 кубита Google (2018)

Google: квантовый процессор на 72 кубитах (5.3.2018). Цель - продемонстрировать "quantum supremacy". Кубиты квантового компьютера - одиночные нейтральные атомы в оптических ловушках



Уровни кубита сверхтонкая структура нейтрального атома в основном состоянии



<u>Удовлетворяют критериям DiVincenzo для кубитов</u>

квантового компьютера

Оптические дипольные ловушки и решетки



в световом поле: $U_{-}(\mathbf{r}) = \pm \frac{3\pi c^2}{2\pi c^2} \left(\frac{\Gamma}{\Gamma}\right) I(\mathbf{r})$

Потенциал атома





Single-Spin Addressing in an Atomic Mott Insulator

 Christof Weitenberg¹, Manuel Endres¹, Jacob F. Sherson^{1†}, Marc Cheneau¹, Peter Schauß¹, Takeshi Fukuhara¹, Immanuel Bloch^{1,2}, and Stefan Kuhr^{1*}
¹Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany
²Ludwig-Maximilians-Universität, Schellingstr. 4/II, 80799 München, Germany



Single-Spin Addressing in an Atomic Mott Insulator

 Christof Weitenberg¹, Manuel Endres¹, Jacob F. Sherson^{1†}, Marc Cheneau¹, Peter Schauß¹, Takeshi Fukuhara¹, Immanuel Bloch^{1,2}, and Stefan Kuhr^{1*}
¹Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany
²Ludwig-Maximilians-Universität, Schellingstr. 4/II, 80799 München, Germany



Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom

Daniel Barredo*, Vincent Lienhard*, Sylvain de Léséleuc*, Thierry Lahaye, and Antoine Browaeys Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Saclay, F-91127 Palaiseau Cedex, France (Dated: December 8, 2017)





Инициализация состояний кубитов

$\uparrow \uparrow \uparrow$ Оптическая накачка



А. Kastler, Нобелевская премия, 1966 г.

Однокубитовая операция - поворот на заданный угол

$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \mathsf{NOT}$



C.Weitenberg et al., Nature, 2011, v.471, p.319

Однокубитовая операция - поворот на заданный угол

$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \mathsf{NOT}$

Рамановские переходы



Двухкубитовые операции



D. Jaksch et al. PRL <u>85</u> (2000) 2208; M.Lukin et al. PRL <u>87</u> (2001) 037901

Ридберговские атомы

Уровни энергии в атомах Rb



Взаимодействие двух ридберговских атомов



Дипольные моменты

$$d \sim e a_0 n^2$$

Энергия взаимодействия

$$V_{ab} \sim \frac{d_a d_b}{R_{ab}^3} \sim n^4$$

V ~ 10 МГц при *n* = 50, *R* ≈ 5 мкм

Дипольная блокада в мезоскопических ансамблях M. Lukin et al. PRL <u>87</u> (2001) 037901



M.Saffman et al., Rev. Mod. Phys. 82, 2313 (2010)

D.Comparat et al., J. Opt. Soc. Am. B 27, A208 (2010)

Схема двухкубитовой операции - сильное взаимодействие (вариант 1)

Дипольная блокада при лазерном возбуждении ридберговских атомов



M.D.Lukin et al., Phys. Rev. Lett., 2001, v.87, p.037901

Схема двухкубитовой операции - слабое взаимодействие (вариант 2)

Conditional Quantum Phase Gate



 $|ab\rangle \rightarrow exp(i\Phi \delta_{a1}\delta_{b1}) |ab\rangle$

 $\Psi(t) = |SP\rangle \cos(V_{dd}t/\hbar)$ - $i |PS\rangle \sin(V_{dd}t/\hbar)$ $\Phi = \pi$ при $T = \pi\hbar/V_{dd}$ $\langle r \rangle \sim 2500$ при n = 50 $R \approx 5$ мкм $V_{dd}/h \sim 10$ МГЦ $T \sim 50$ нс

I.I.Ryabtsev, D.B.Tretyakov, I.I.Beterov, J. Phys. B, 2005, v.38, p.S421

Резонансное диполь-дипольное взаимодействие



Численное моделирование для Conditional Quantum Phase Gate $|ab\rangle \rightarrow \exp(i \ \pi \delta_{a1} \delta_{b1}) \ |ab\rangle$

> R₀=10 μm T~1 μK

$$\rho_2(t) = \frac{1}{2} \sin^2(\theta_0)$$

$$\theta_0 = \frac{2\sqrt{2}d_1d_2t_0}{4\pi\varepsilon_0\hbar R_0^3}$$



I.I.Ryabtsev et al., Phys. Rev. A 82, 053409 (2010)

Схема экспериментальной установки для демонстрации дипольной блокады и резонансов Фёрстера в одиночной ловушке



Магнитооптическая ловушка



Первое наблюдение резонансного диполь-дипольного взаимодействия двух ридберговских атомов

Резонанс Фёрстера $Rb(37P_{3/2})$ + $Rb(37P_{3/2}) \leftrightarrow$ $Rb(37S_{1/2}) + Rb(38S_{1/2})$

38S

37P_{3/2}

37S

 $S_N =$



I.I.Ryabtsev, D.B.Tretyakov, I.I.Beterov, V.M.Entin, Phys. Rev. Lett. 2010, v.104, p.073003 I.I.Ryabtsev et al., Phys. Rev. A, 2010, v.82, p.053409

Резонанс Фёрстера для двух атомов $Rb(nP_{3/2})$ $Rb(nP_{3/2})$ + $Rb(nP_{3/2})$ -> $Rb(nS_{1/2})$ + $Rb([n+1]S_{1/2})$



Сдвиг энергии состояния nP+nP

$$\delta E_{PP} = \pm \left(\sqrt{\frac{\Delta^2}{4} + 2V_{ab}^2} - \frac{\Delta}{2} \right)$$

Радиочастотные резонансы Фёрстера для уровней Флоке



D.B.Tretyakov et al., Phys. Rev. A 90, 041403(R) (2014)

Наблюдение трехчастичных резонансов Фёрстера



D.B.Tretyakov, I.I.Beterov, E.A.Yakshina, V.M.Entin, I.I.Ryabtsev, P.Cheinet, and P.Pillet, Phys. Rev. Lett. **119**, 173402 (2017)

Универсальные трехкубитовые квантовые операции

Toffoli gate

Fredkin gate

вход			выход			вход			выход		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1

Необходимы для коррекции ошибок и ускорения квантовых вычислений

Схема 3-кубитовой операции Toffoli gate



$$F = Tr \sqrt{\sqrt{\rho_{sim}} \rho_{et} \sqrt{\rho_{sim}}} = 0.983$$

I.I.Beterov, I.N.Ashkarin, E.A.Yakshina, D.B.Tretyakov, V.M.Entin, I.I.Ryabtsev, P.Cheinet, P.Pillet, M.Saffman, Phys. Rev. A **98**, 042704 (2018)

Наблюдение дипольной блокады для мезоскопических ансамблей атомов Rb в малом объеме МОЛ



Для атомов Rb(39P) взаимодействия нет.

Для атомов Rb(81P) и Rb(110P) изменение населенностей коллективных состояний при N=3 составляет 50±5 %.

Е.А.Якшина и др., ЖЭТФ, 2020, т.157, в.1 (в печати)



Экспериментальная установка



Схема экспериментальной установки для захвата атомов Rb в оптическую дипольную ловушку и их визуализации



Для захвата атомов в дипольную ловушку используется либо излучение лазерного диода с длиной волны 830 нм либо излучение титан-сапфирового лазера с длиной волны в диапазоне 820 нм. Экспериментально полученное изображение атомов в оптической дипольной ловушке



В ловушку захвачено в среднем 1,5±0,5 атома, согласно проведенной калибровке видеосигнала sCMOS камеры FLIR Tau CNV



Гистограммы выходных сигналов видеокамеры для центрального пикселя при захвате одиночных атомов Rb



Используется sCMOS-видеокамера FLIR Tau CNV, не предназначенная для счета фотонов. Однако оказалось, что для нее можно подобрать режим регистрации одиночных атомов. Двугорбый характер гистограммы ее сигналов для центрального пикселя являлся свидетельством того, что происходит захват только одного атома: первый пик соответствует шумовому сигналу в отсутствие атома, а второй – в присутствии одиночного атома.

Схема эксперимента для реализации оптической накачки, СВЧ-переходов и однокубитовых операций с одиночными атомами Rb в одиночной ловушке



Добавлены лазер накачки для инициализации кубитов, выталкивающий лазер для регистрации состояний кубитов и генератор СВЧ с рупором для однокубитовых операций

Временная диаграмма эксперимента по демонстрации СВЧпереходов и однокубитовых квантовых операций





Схема переходов для оптической накачки

Зависимость населенности от времени





Схема СВЧпереходов между сверхтонкими подуровнями основного состояния атомов 87Rb и однокубитовых квантовых операций на их основе

Демонстрация наличия СВЧпереходов производится путем записи осцилляций населенностей Раби на этих переходах. Разные фазы соответствуют разным однокубитовым операциям.

Модельный эксперимент по наблюдению СВЧпереходов в газовой ячейке с атомами Rb



СВЧ-спектроскопии перехода $5S_{1/2}(F=2, M_F=0) \rightarrow 5S_{1/2}(F=2, M_F=0)$ в газовой ячейке с атомами Rb и 5 Тор аргона в качестве буферного газа. Измерялось поглощение линейно-поляризованного пробного лазера, настроенного на доплеровский центр перехода (a) $5S_{1/2}(F=1) \rightarrow 5P_{1/2}(F'=1)$ или (b) $5S_{1/2}(F=1) \rightarrow 5P_{1/2}(F'=2)$ на D₁ линии поглощения атомов ⁸⁷Rb при сканировании продольного магнитного поля (сигнал Ханле) в присутствии или отсутствии СВЧ-излучения с частотой вблизи 6,834 ГГц.

Схема эксперимента по захвату атомов Rb в массивы оптических дипольных ловушек и их визуализации



Добавлен пространственный модулятор света (SLM) и оптические элементы

Массив оптических дипольных ловушек на основе пространственного модулятора света



Hamamatsu Spatial Light Modulator

Gerchberg–Saxton algorithm for mask generation

IVS USD2 Digital Video Camera 640x4 e: Camera: Options: Help Agest 🛖 Type (130+17 💽 Bri 🖂	20 (855) - wohaltes apters	
ec Guide Basch		- MARIO 2014 SARROSA DA MARIA MAR
Properties	13 - DPS 18	
Capture		
73.02 4 T Huz 2000 Hel		
Long expenses		
T Long exposure		EGONE VANHOANE WAAR KARAMADA WAARAA KARAMADA AMA KARAMADA KARAMADA KARAMADA KARAMADA KARAMADA KARAMADA KARAMAD
(sed) 0.6 🛫		
Expensive Meter		YARRAN KUNANA MANI KUKANA NA WAYANA WANA MANI KUKANA MANI KUKANA MANI KUKANA
thavid L 💌		
Histogram (disabled)		
Single Dia and		
1000 Jac 21		
Libers Deteroy	(VOM STREAMENG) Croóper	

Захват атомов Rb в различные массивы оптических дипольных ловушек с шагом 15 мкм и их фазовые маски



Эксперимент МГУ – 1 поколение



Захват атомов в голографические массивы МГУ – 2 поколение

Флуоресценция одиночных атомов ⁸⁷Rb, захваченных в массив микроловушек 10х10

Усреднение по 100 кадрам



Single-shot image



PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 230501 (2019)

Rydberg-Mediated Entanglement in a Two-Dimensional Neutral Atom Qubit Array

T. M. Graham, M. Kwon[®], B. Grinkemeyer[®], Z. Marra, X. Jiang, M. T. Lichtman[®], Y. Sun,[†] M. Ebert[®],[‡] and M. Saffman^{®[‡]}

Department of Physics, University of Wisconsin-Madison, 1150 University Avenue, Madison, Wisconsin 53706, USA



Точность двухкубитовх операций для соседних кубитов F=88-89%

PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 170503 (2019)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Parallel Implementation of High-Fidelity Multiqubit Gates with Neutral Atoms

Harry Levine⁽⁵⁾,^{1,*} Alexander Keesling⁽⁶⁾,¹ Giulia Semeghini⁽⁶⁾,¹ Ahmed Omran⁽⁶⁾,¹ Tout T. Wang⁽⁶⁾,^{1,2} Sepehr Ebadi,¹ Hannes Bernien,³ Markus Greiner,¹ Vladan Vuletić,⁴ Hannes Pichler,^{1,5} and Mikhail D. Lukin¹



Точность двухкубитовх операций для соседних кубитов F=97-98%

A Rydberg quantum simulator

Hendrik Weimer^{1*}, Markus Müller², Igor Lesanovsky^{2,3}, Peter Zoller² and Hans Peter Büchler¹

NATURE PHYSICS | VOL 6 | MAY 2010 | 1 382



Quantum simulation of electron–phonon interactions in strongly deformable materials

J P Hague and C MacCormick

Department of Physical Sciences, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes, MK7 6AA, UK E-mail: J.P.Hague@open.ac.uk

New Journal of Physics 14 (2012) 033019 (15pp)



Figure 2. System of cold Rydberg ions/atoms used to simulate a polaron, annotated with Hamiltonian terms.

Observing the space- and time-dependent growth of correlations in dynamically tuned synthetic Ising antiferromagnets

Vincent Lienhard*, Sylvain de Léséleuc*, Daniel Barredo, Thierry Lahaye, and Antoine Browaeys Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Saclay, F-91127 Palaiseau Cedex, France



Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator

Hannes Bernien,¹ Sylvain Schwartz,^{1, 2} Alexander Keesling,¹ Harry Levine,¹ Ahmed Omran,¹ Hannes Pichler,^{3, 1} Soonwon Choi,¹ Alexander S. Zibrov,¹ Manuel Endres,⁴ Markus Greiner,¹ Vladan Vuletić,² and Mikhail D. Lukin¹

> ¹Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA ²Department of Physics and Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

³Institute for Theoretical Atomic, Molecular and Optical Physics,

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA 02138, USA

⁴Division of Physics, Mathematics and Astronomy, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Институт ф изики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН Новосибирск, Россия

http://www.isp.nsc.ru