

2024/03/25-26 KEK 素核研物構研 連携研究会 2024

冷却原子型量子コンピュータの 急速な発展とその展望について

2024年3月版

自然科学研究機構 分子科学研究所 助教

富田 隆文

ここから、新・未来へ



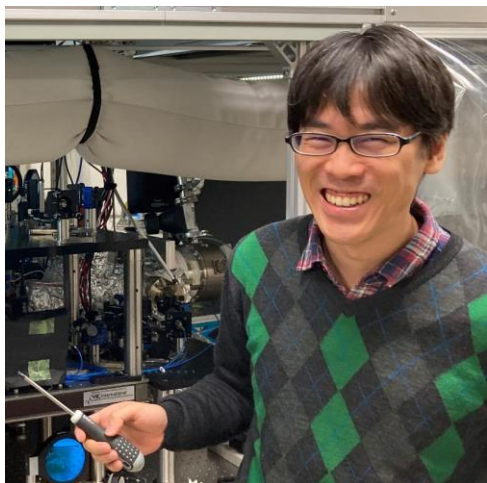
科学技術振興機構



文部科学省
MEXT
MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

自己紹介：富田 隆文（とみた たかふみ）

2



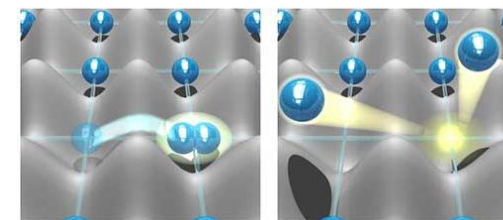
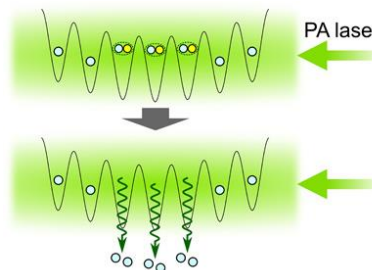
分子科学研究所 助教
(大森賢治グループ)

研究内容：

冷却原子を用いた量子コンピューティング・量子シミュレーション

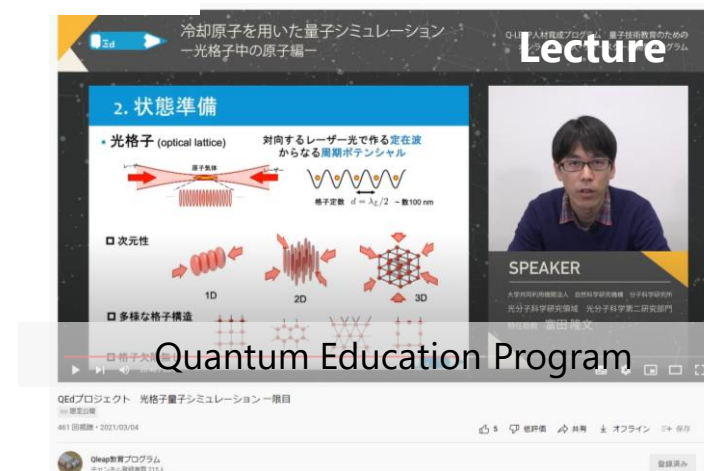
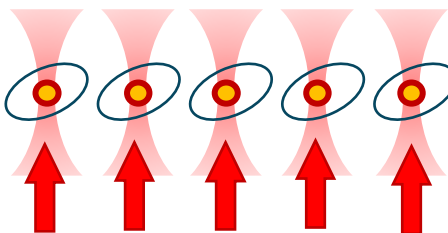
実験

- 2014 – 2019 京大 理物 修士・博士 高橋義朗 研究室
JSPS research fellowship DC 1 (2016-2019)
(冷却原子実験, 開放量子多体系量子シミュレーション)



- 2019 – 2023.6月 分子研 特任助教
- 2023. 6月 – 分子研 助教

Ultrafast Rydberg interaction
[Y. Chew *et al.*, Nature Photonics 16, 724 (2022)]

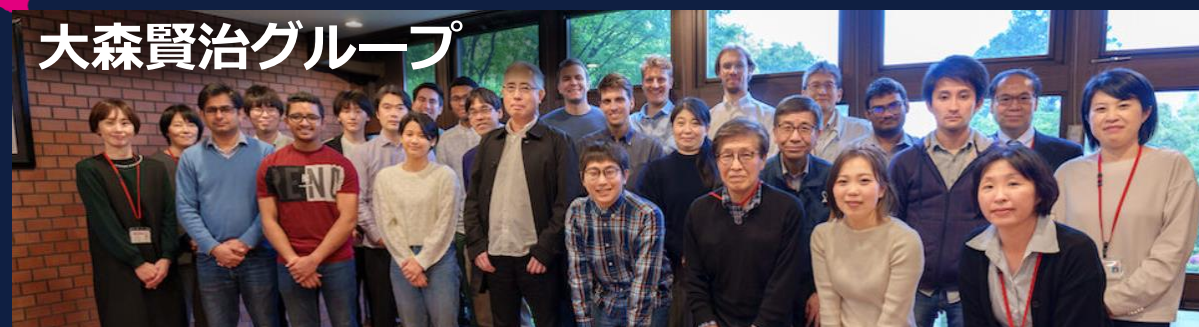


分子研 & 大森グループ

3



分子科学研究所: Institute for Molecular Science
自然科学研究機構: National Institutes of Natural Sciences



大森賢治グループ

冷却原子を用いた
量子コンピューティング・量子シミュレーション実
研究開発

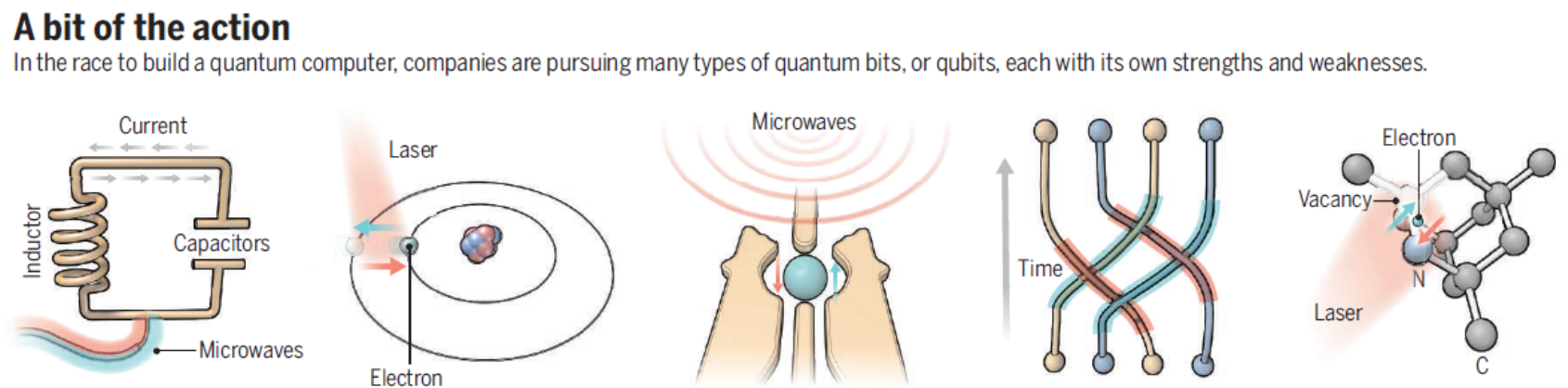


◀Scan the QR code to discover more Aichi

QUEST FOR QUBITS

Science, FEATURES "Quest for qubits"
[G. Popkin, Science **354**, 1090 (2016)]

It's a Sunday afternoon in September and the two co-founders of ionQ, a quantum computing startup, are meeting for a strategy session with their investors.



Superconducting loops	Trapped ions	Silicon quantum dots	Topological qubits	Diamond vacancies
A resistance-free current oscillates back and forth around a circuit loop. An injected microwave signal excites the current into superposition states.	Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and put them in superposition states.	These "artificial atoms" are made by adding an electron to a small piece of pure silicon. Microwaves control the electron's quantum state.	Quasiparticles can be seen in the behavior of electrons channeled through semiconductor structures. Their braided paths can encode quantum information.	A nitrogen atom and a vacancy add an electron to a diamond lattice. Its quantum spin state, along with those of nearby carbon nuclei, can be controlled with light.
Longevity (seconds) 0.00005	>1000	0.03	N/A	10
Logic success rate 99.4%	99.9%	~99%	N/A	99.2%
Number entangled 9	14	2	N/A	6
Company support Google, IBM, Quantum Circuits	ionQ	Intel	Microsoft, Bell Labs	Quantum Diamond Technologies

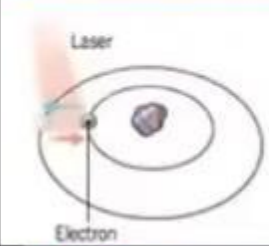
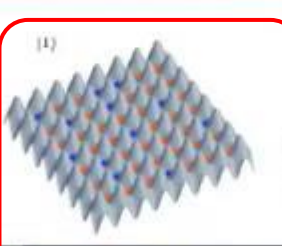

量子コンピュータハードウェア - 2021年 -

5

2021年 talk by Chris Monroe Flagship Forum of Quantum Center, ETH Quantum center (2021. 9/24)

Quantum Computer Technologies

Natural Qubits

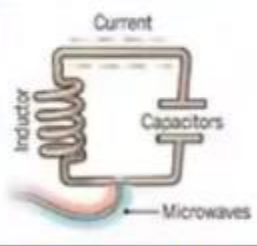

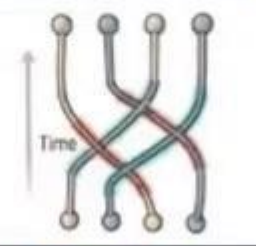
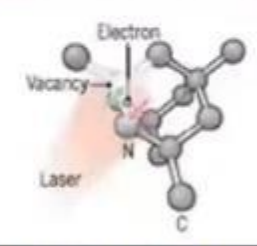
Trapped Ions

Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and out

Neutral Atoms

Neutral atoms, like ions, store qubits within electronic states. Laser activates the electrons to create interaction between qubits.

Synthetic Qubits







Superconducting Loops

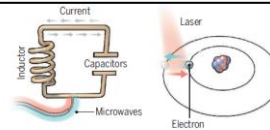
A resistance-free current oscillates back and forth around a circuit loop. An injected microwave signal excites the current into superposition states.

Silicon Quantum Dots

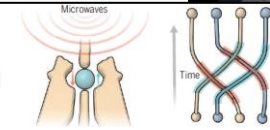
These "artificial atoms" are made by adding an electron to a small piece of pure silicon. Microwaves control the electron's quantum state.



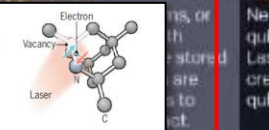
Christopher M...



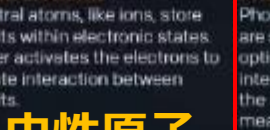
Superconducting loops
A resistance-free current oscillates back and forth around a circuit loop. An injected microwave signal excites the current into superposition states.



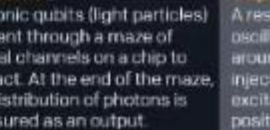
Trapped ions
Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and out



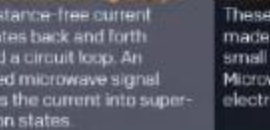
Neutral Atoms
Neutral atoms, like ions, store qubits within electronic states. Laser activates the electrons to create interaction between qubits.



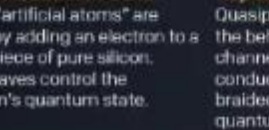
Photonics
Photonic qubits (light particles) are sent through a maze of optical channels on a chip to interact. At the end of the maze, the distribution of photons is measured as an output.




Superconducting Loops
A resistance-free current oscillates back and forth around a circuit loop. An injected microwave signal excites the current into superposition states.



Silicon Quantum Dots
These "artificial atoms" are made by adding an electron to a small piece of pure silicon. Microwaves control the electron's quantum state.



Topological Qubits
Quasiparticles can be seen in the behavior of electrons channeled through semiconductor structures. Their braided paths can encode quantum information.



Diamond Vacancies
A nitrogen atom and a vacancy add an electron to a diamond lattice. Its quantum spin state, along with those of nearby carbon nuclei, can be controlled with light.

Fidelity
99.9%

97%

99.4%

~99%

N/A

99.2%

Qubits Connected
High

Very high; low individual control

High

Very Low

N/A

Low

Company Support
IONQ, AQT, Honeywell, Oxford Ionics

Atom Computing, ColdQuanta, QuEra

PsiQuantum, Xanadu

Google, IBM, QCI, Rigetti

HRL, Intel, SQC

Microsoft

Quantum Diamond Technologies

Pros
Very stable. Highest achieved gate fidelities.

Many qubits, 20 and maybe 30.

Linear optical gates, integrated on-chip.

Can lay out physical circuits on chip.

Borrows from existing semiconductor industry.

Greatly reduce errors.

Can operate at room temperature.

Cons
Slow operation. Many lasers are needed.

Hard to program and control individual qubits; prone to noise.

Each program requires its own chip with unique optical channels. No memory.

Must be cooled to near absolute zero. High variability in fabrication. Lots of noise.

Only a few connected. Must be cooled to near absolute zero. High variability in fabrication.

Existence not yet confirmed.

Difficult to create high numbers of qubits; limiting compute capacity.

Source: Science, Dec. 2016

中性原子
(冷却原子)

光

2016年

zoom

<https://youtu.be/Ex6zy-ZNFAE>

量子コンピュータハードウェア - 2023年 -

6

日経クロステック『5大方式が競う 国産量子コンピューター』2023/4/26 より

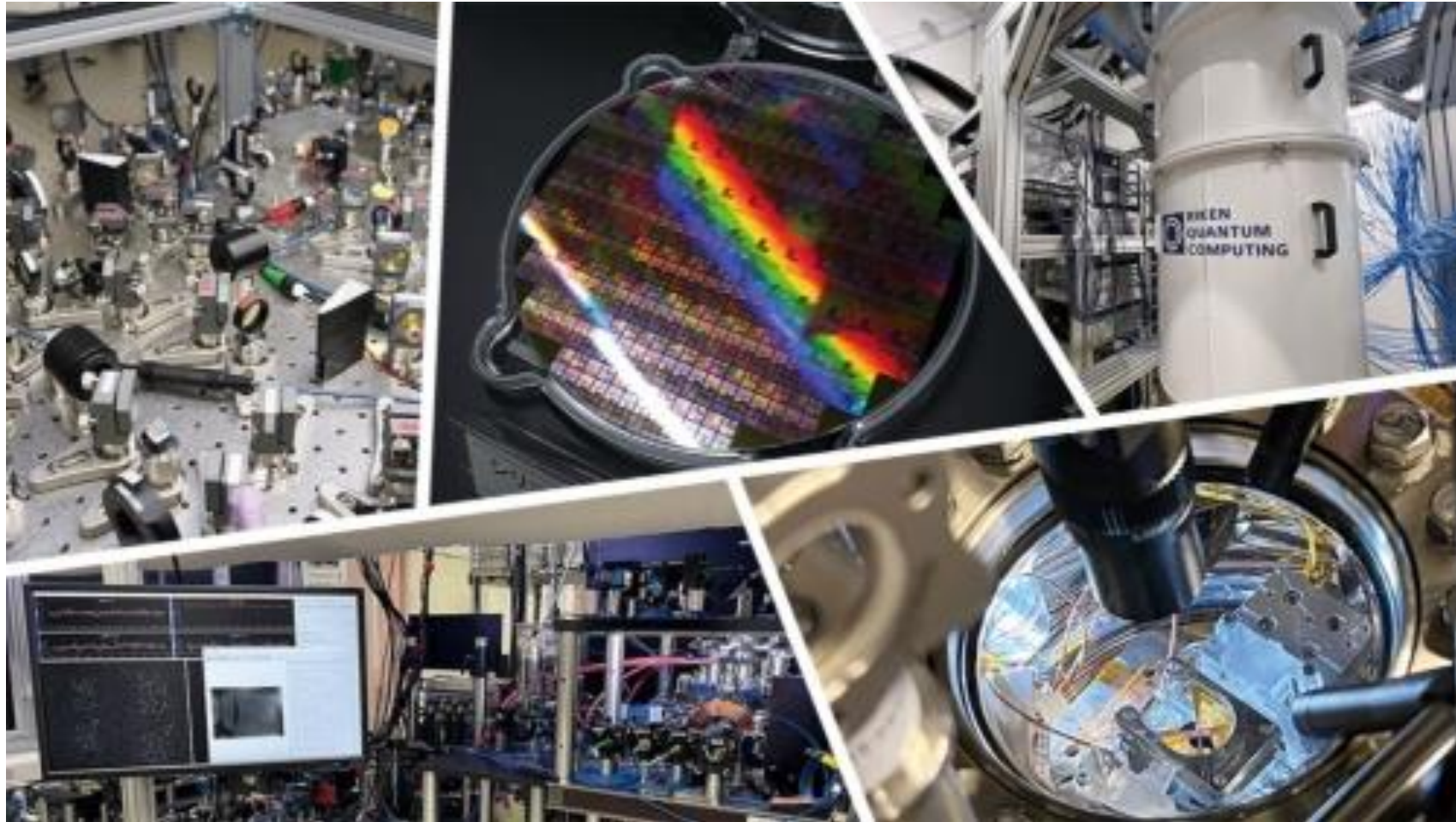
シリコン

超伝導

光

冷却原子
(中性原子)

イオントラップ



Breaking News!!! Logical quantum processor

7

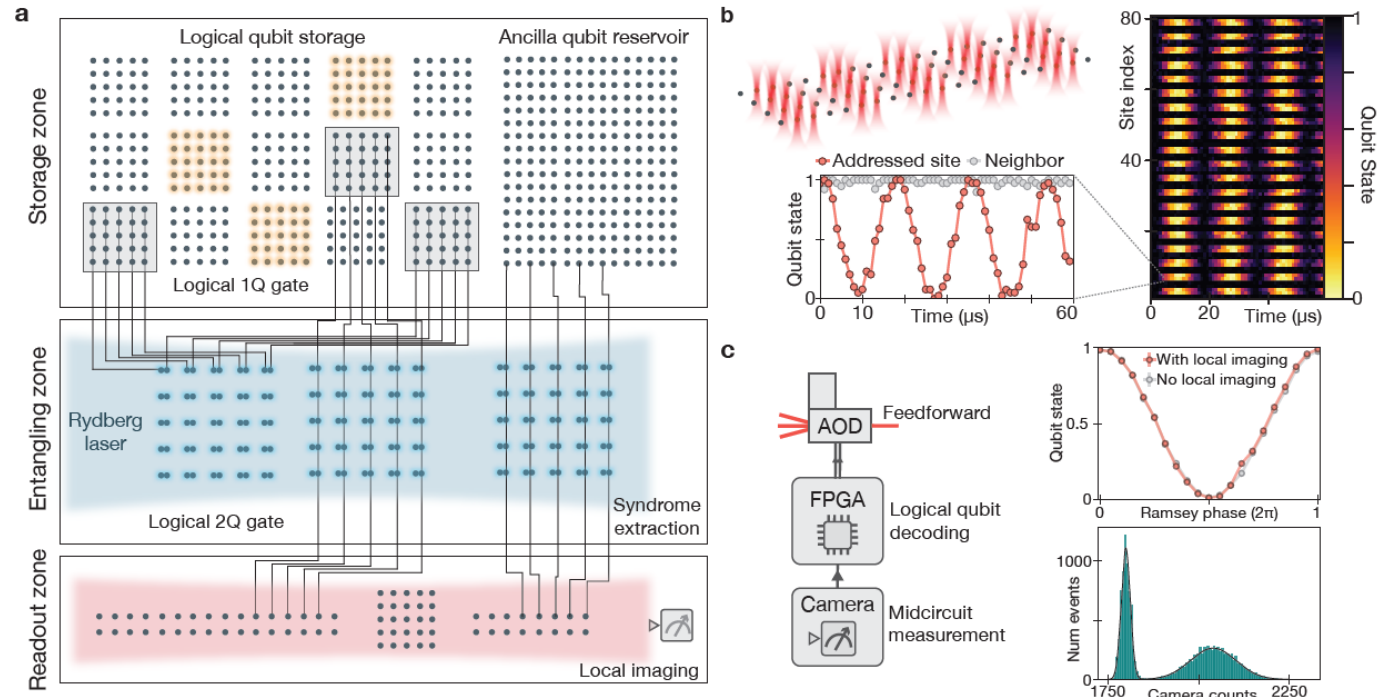
2023年12月

From Mikhail Lukin group @ Harvard/MIT with QuEra Computing



Here we report the realization of a programmable quantum processor based on encoded **logical qubits operating with up to 280 physical qubits**.

..., we realize computationally complex sampling circuits with up to **48 logical qubits** entangled with hypercube connectivity with 228 logical two-qubit gates and 48 logical CCZ gates. ...



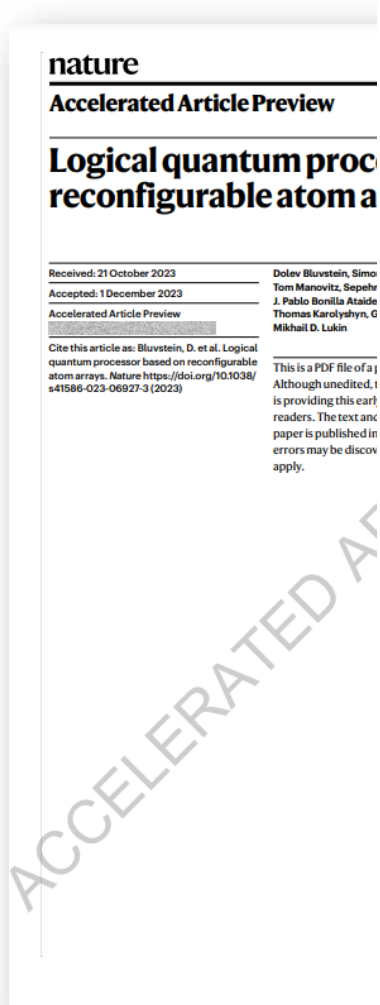
→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).

Breaking News!!! Logical quantum processor

8

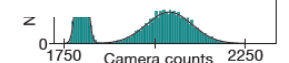
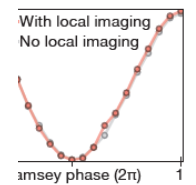
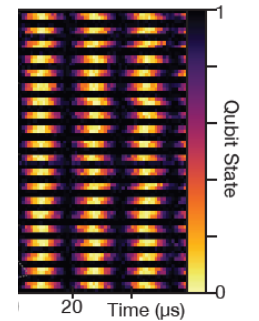
2023年12月

Supplementary video



based on

48 logical qubits



→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).

おそらく皆さんが気になっていること...

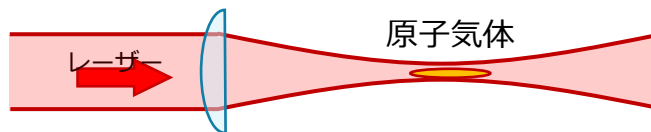
- 冷却原子とはそもそも何なのか？
 - 冷却原子量子コンピュータとはどんなもの？
 - どこまで進んでる？
 - Advantage/disadvantage？
 - 展望
-
- ハードの進展について解説：実験
 - どういったタスクが実行できる？→割愛

レーザー冷却等により絶対零度付近まで冷却された中性原子気体

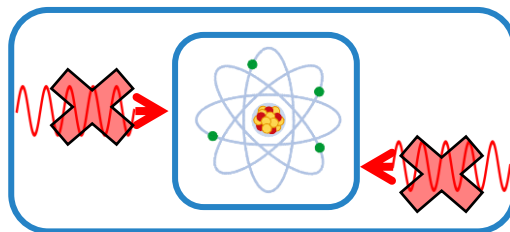
~ μK ~ nK
※希釈冷凍機なし

◆ 特徴

- 光でトラップ・光で制御



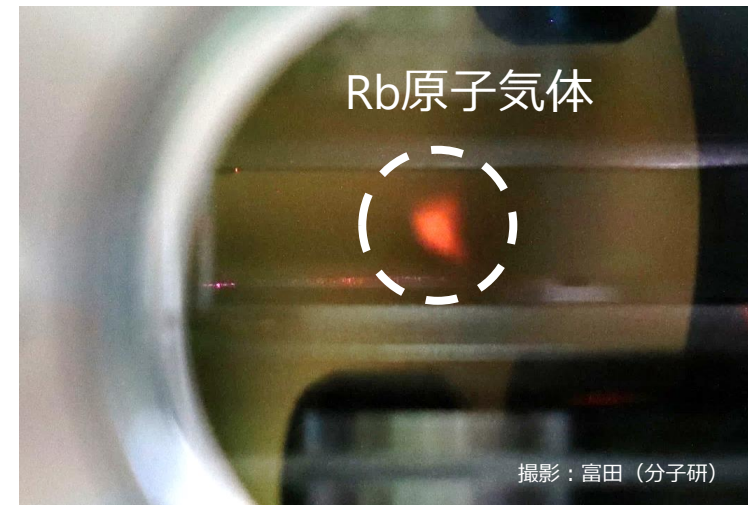
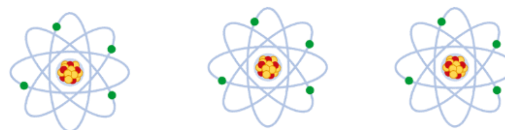
- 孤立量子系

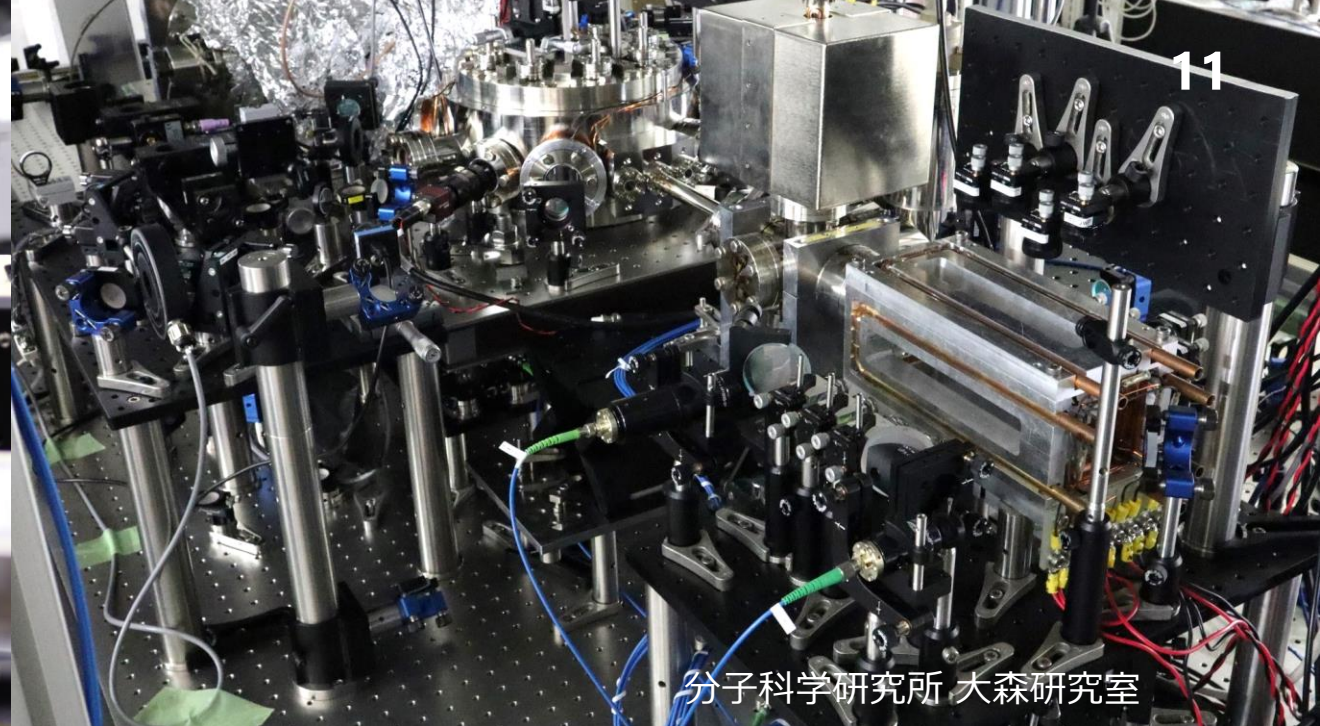
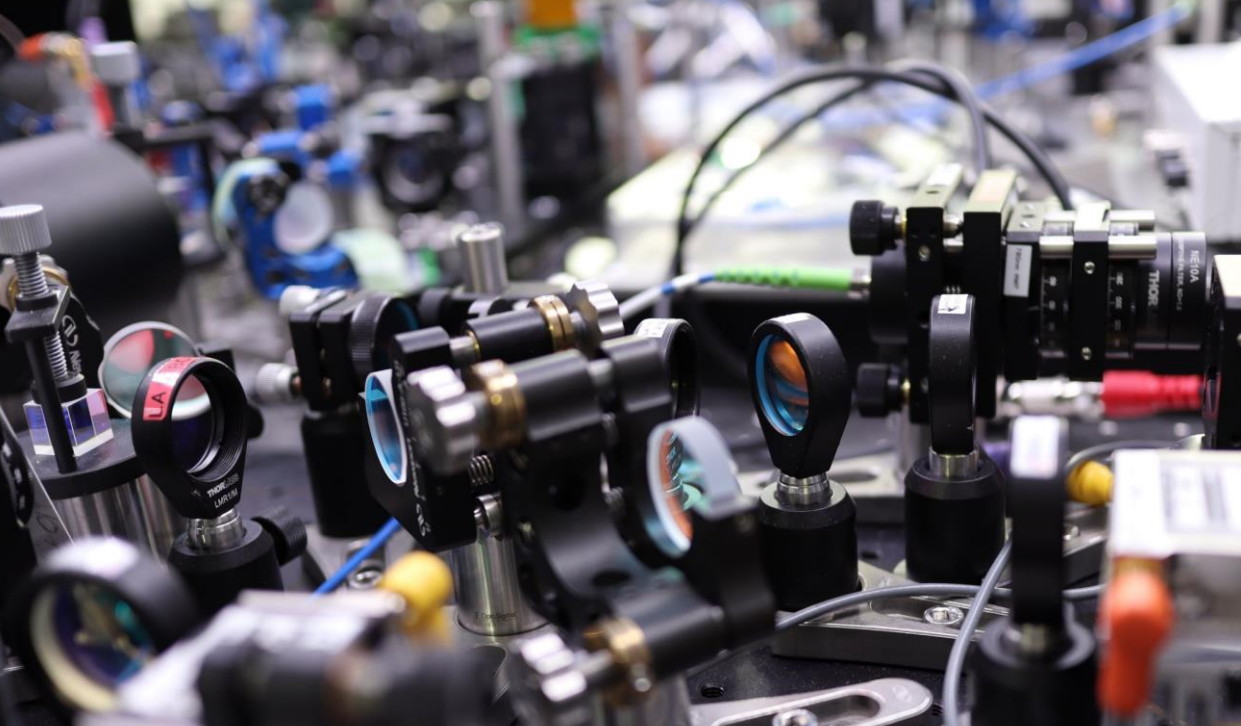


- 量子性：電子/スピン状態・運動自由度

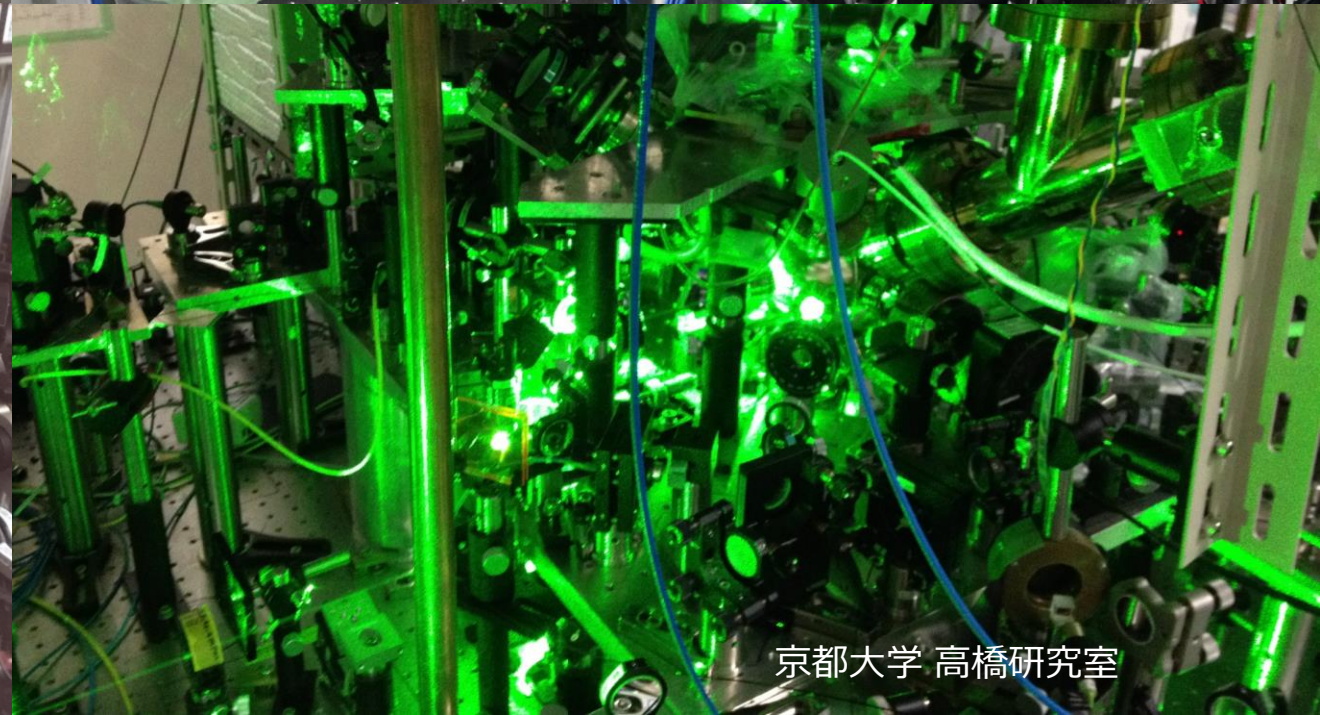
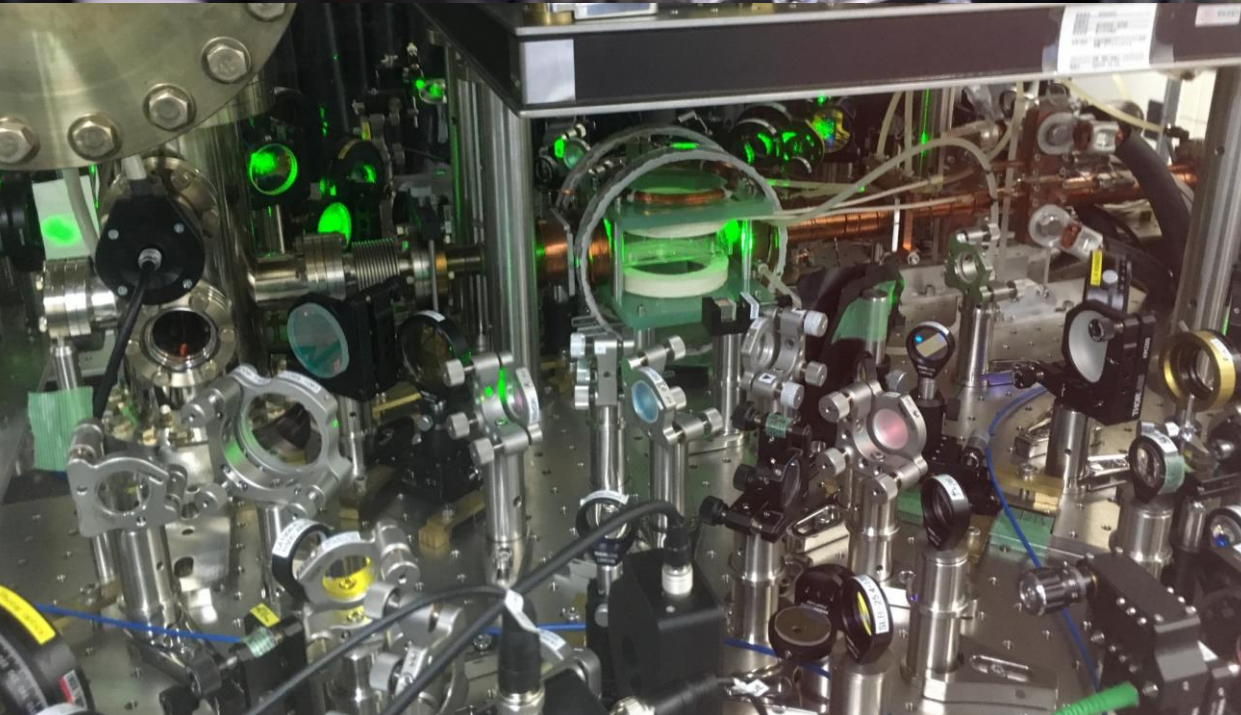
$$\begin{pmatrix} -|e\rangle \\ -|g\rangle \end{pmatrix} \quad |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|g\rangle + |e\rangle)$$

- 均質：原子はすべて同じ

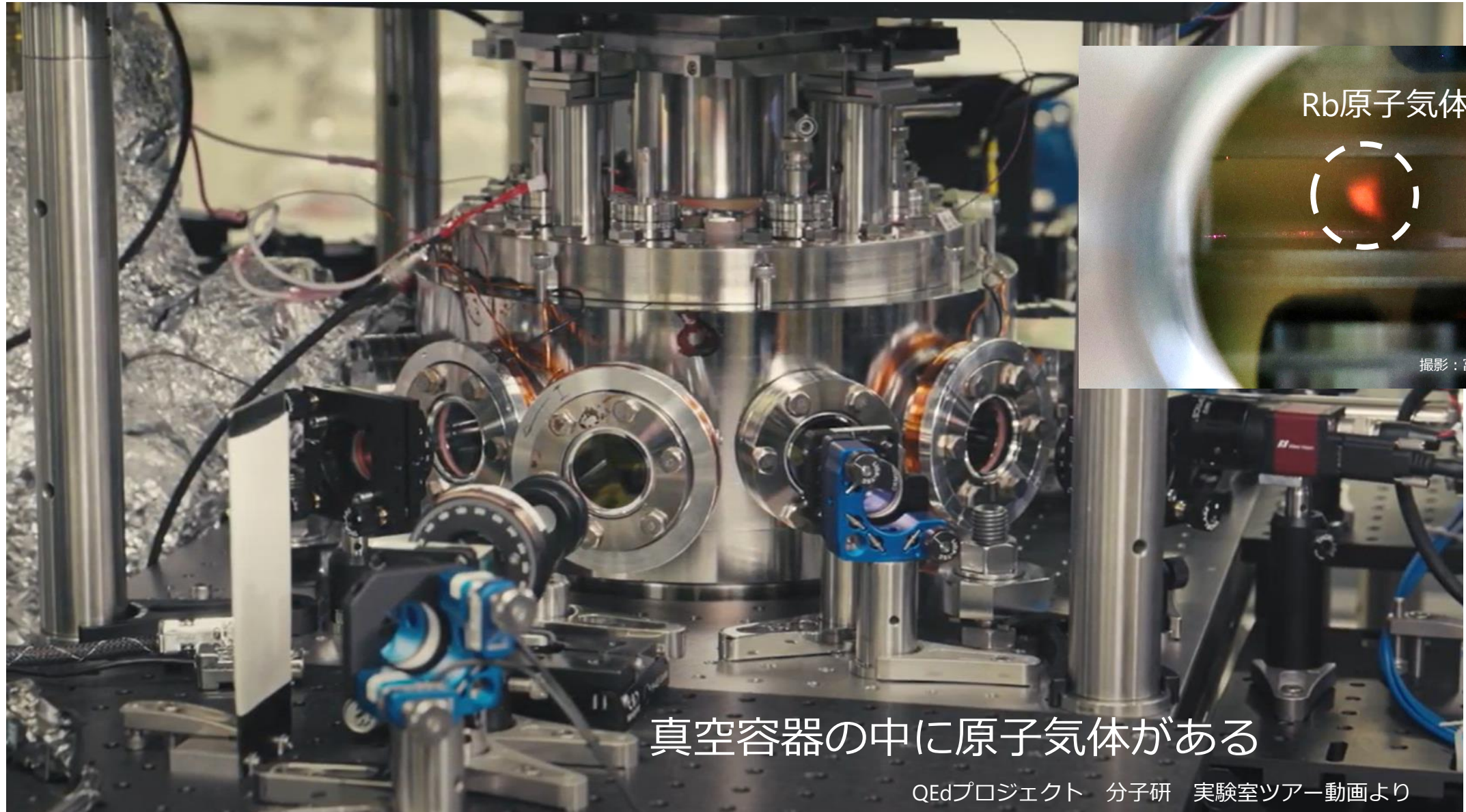




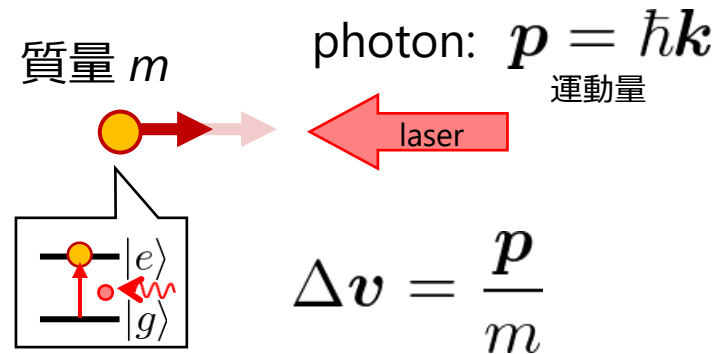
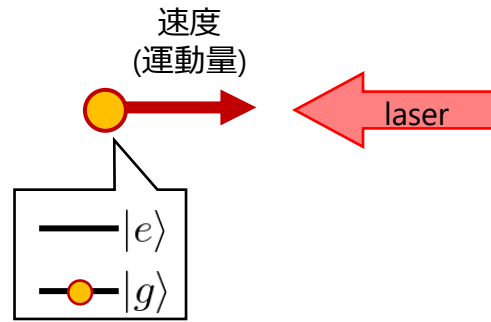
分子科学研究所 大森研究室



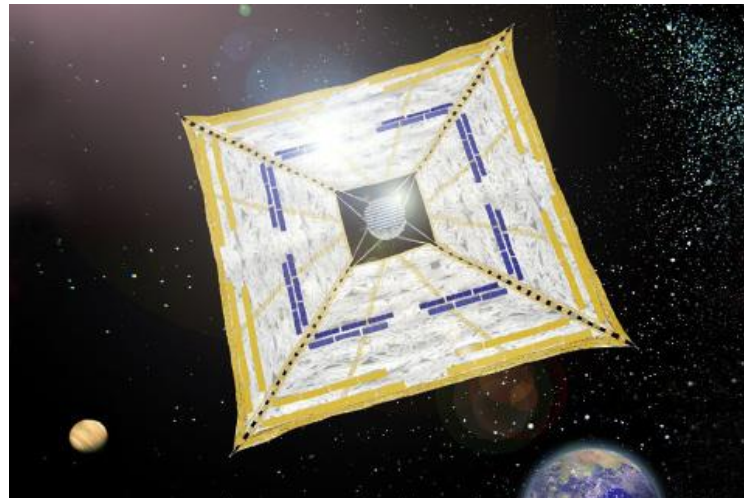
京都大学 高橋研究室



◆ レーザー冷却(laser cooling) = レーザー光で気体原子を**冷却** = **減速**させる



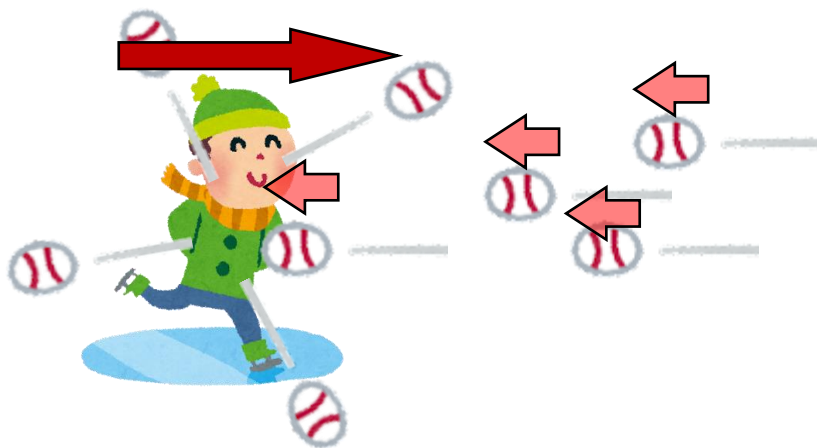
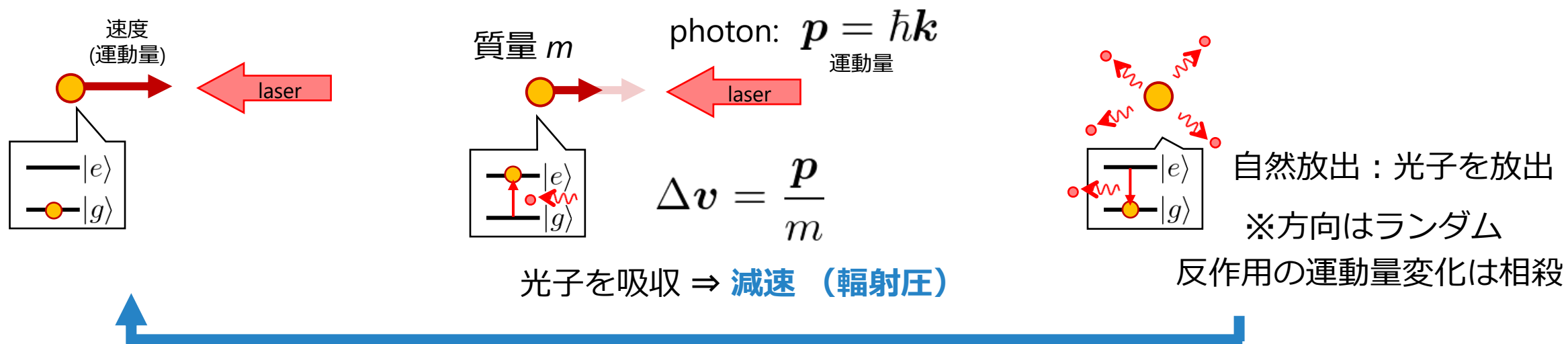
光子を吸収 \Rightarrow **減速** (輻射圧)



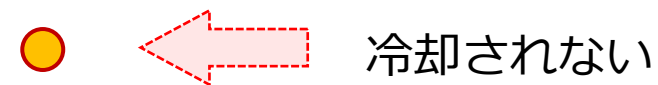
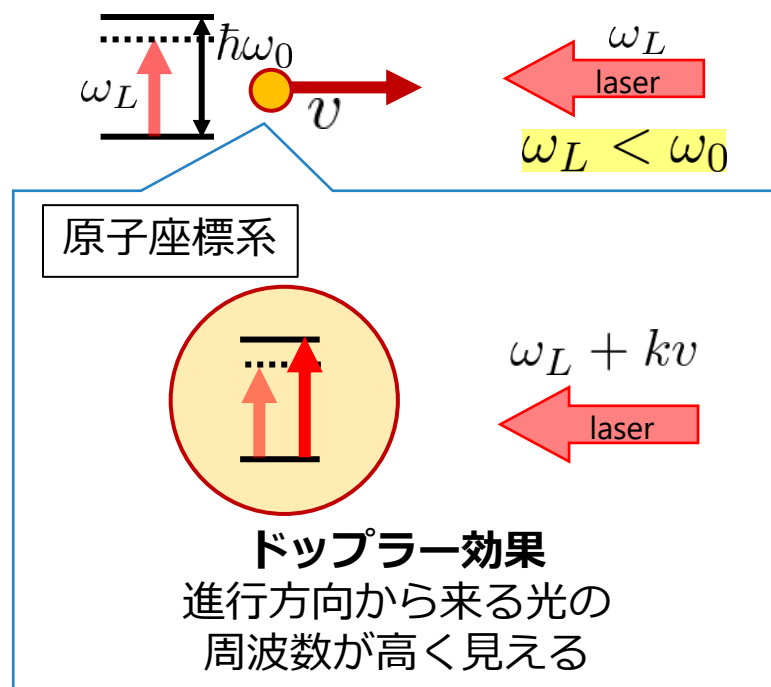
ソーラーセイル
IKAROS
(JAXA)

https://www.jaxa.jp/projects/sas/ikaros/index_j.html

◆ レーザー冷却(laser cooling) = レーザー光で気体原子を**冷却** = **減速**させる



◆ レーザー冷却(laser cooling) = レーザー光で気体原子を**冷却** = **減速**させる

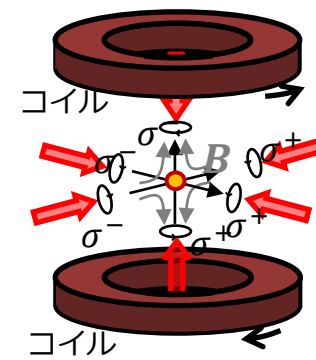
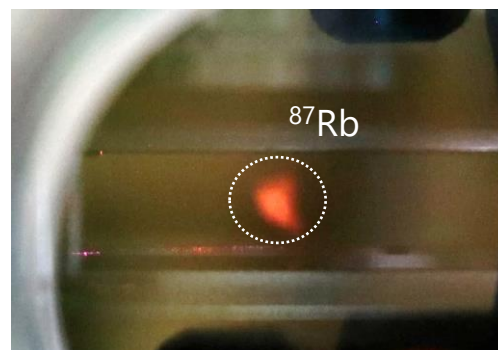


ドップラー冷却
(Doppler cooling)

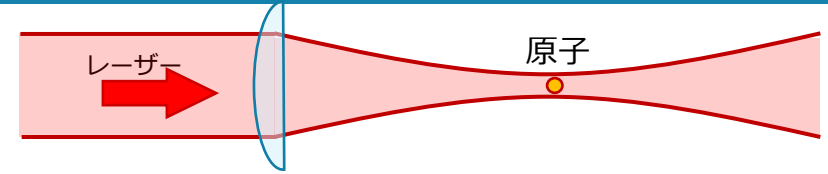
➤ 磁気光学トラップ
Magneto-Optical Trap (MOT)

Rbの場合: $T \sim 100 \mu\text{K}$

速度 $v \sim \text{cm/s}$



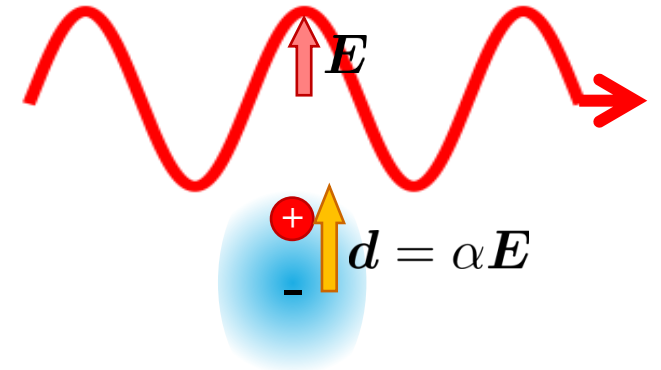
レーザー光を集光→集光点に原子をトラップ



① レーザー光の振動電場で原子が分極：電気双極子 $d = \alpha E$

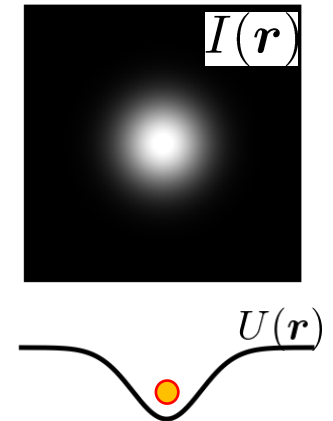
② 共鳴周波数より低周波側 $\omega_L < \omega_0$ d と E の向きが揃う

③ 電場－双極子相互作用 $U = -d \cdot E$ 電場が強いほどエネルギー下がる



AC Stark shift, Light shift

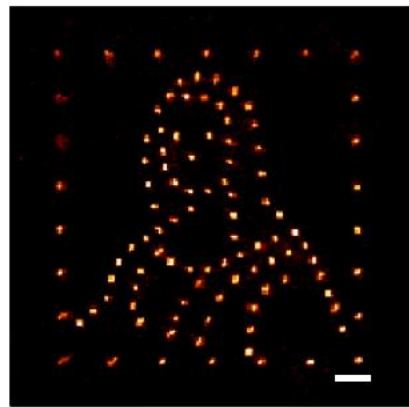
$$U(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2} \underset{\text{分極率}}{\alpha(\omega)} \langle |\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)|^2 \rangle_t \underset{\text{光強度}}{\propto I(\mathbf{r})} \quad \text{光強度に比例}$$



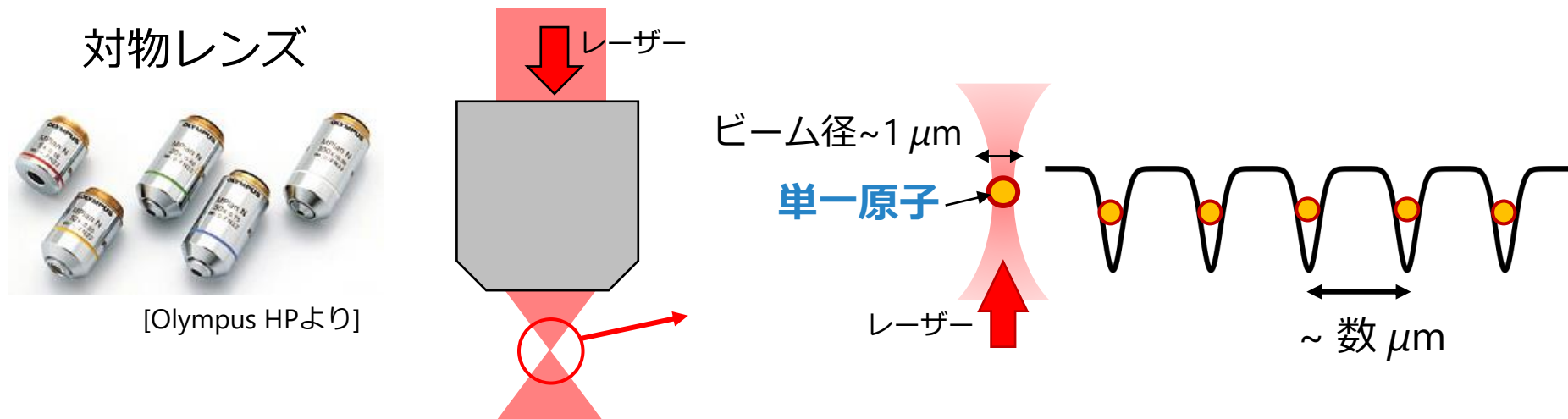
光で原子をトラップする

17

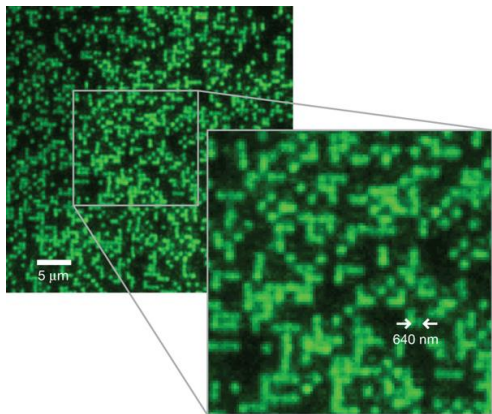
例：光ピンセット



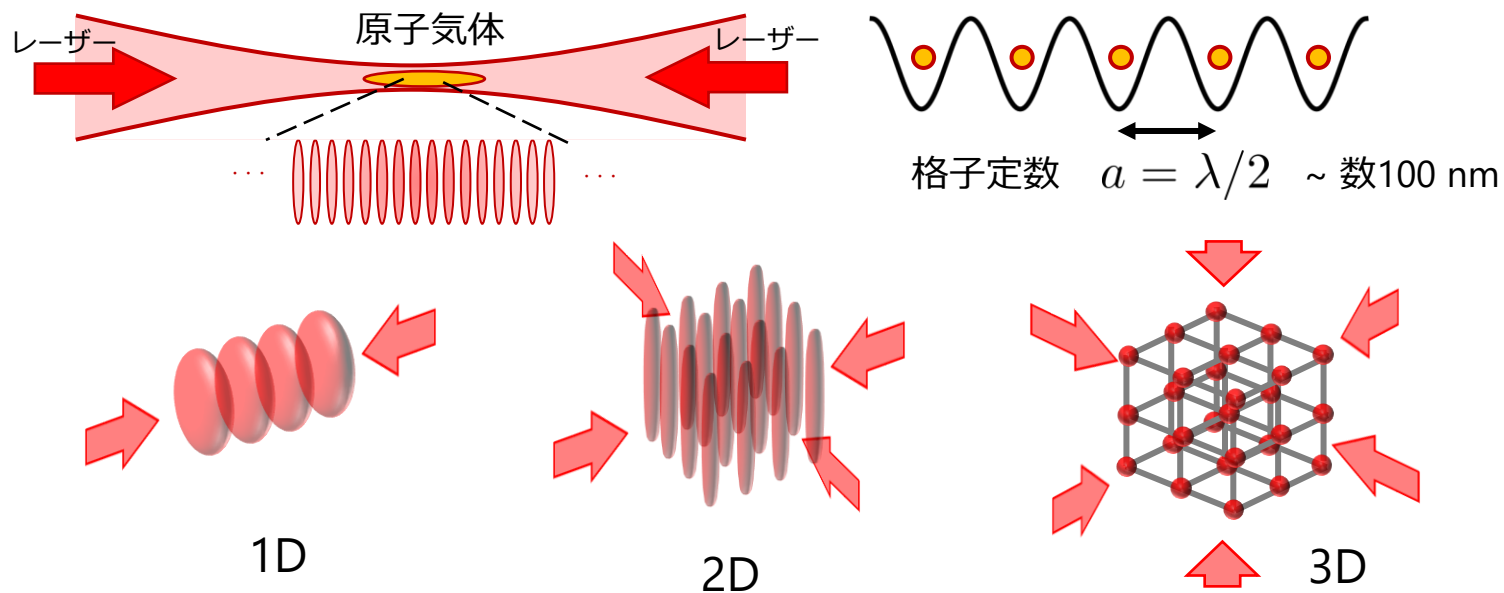
[K.-N. Schymik *et al.* PRA **102**, 063107 (2020)]



例：光格子



[W. S. Bakr *et al.* Nature **462**, 74-77 (2009)]



冷却原子を用いた量子シミュレーション

18

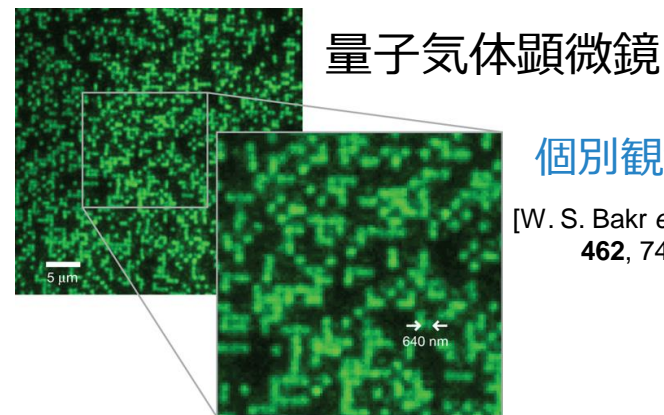
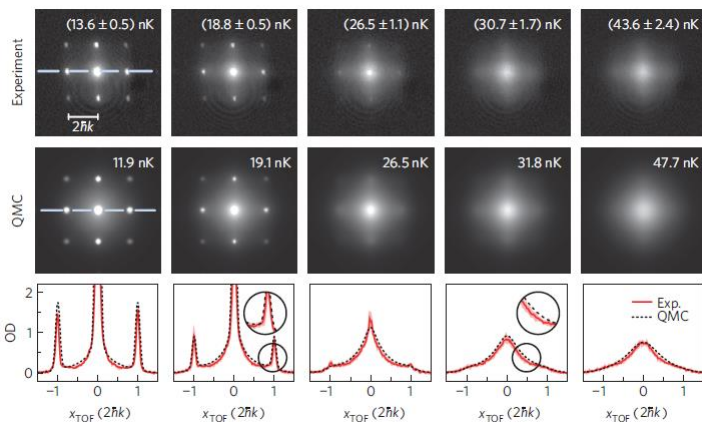
ボース・ハバードモデル

$$\hat{H}_{\text{BH}} = -J \sum_{\langle j,k \rangle} (\hat{a}_j^\dagger \hat{a}_k + \text{H.c.}) + \frac{U}{2} \sum_j \hat{n}_j (\hat{n}_j - 1)$$

モデルの再現、パラメータ制御性

量子モンテカルロ計算との比較

[S. Trotzky *et al.*, Nat. Phys. **6**, 998-1004 (2010)]



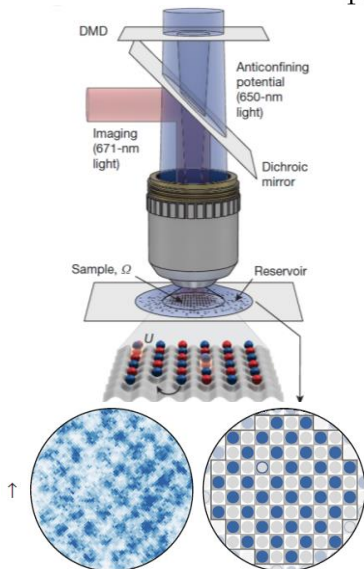
量子気体顕微鏡

個別観測・制御

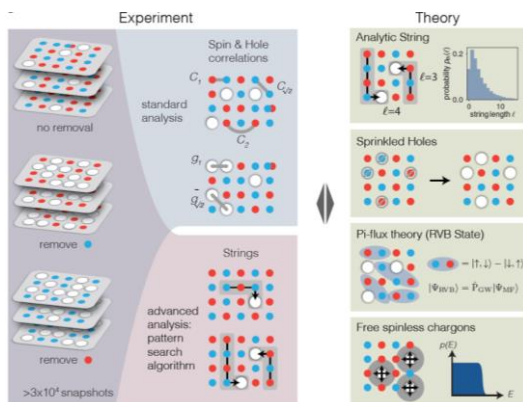
[W. S. Bakr *et al.* Nature **462**, 74-77 (2009)]

フェルミ・ハバードモデル 基底/励起状態、相構造

$$\hat{H}_{\text{FH}} = -t \sum_{\langle j,k \rangle, \sigma} (\hat{c}_{j,\sigma}^\dagger \hat{c}_{k,\sigma} + \text{h.c.}) + U \sum_j \hat{n}_{j,\uparrow} \hat{n}_{j,\downarrow}$$

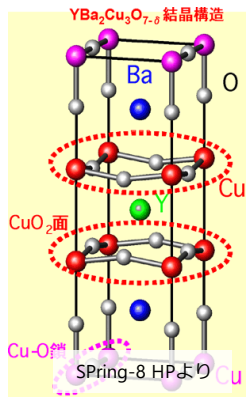


[A. Mazurenko *et al.*, Nature **545**, 462 (2017)]



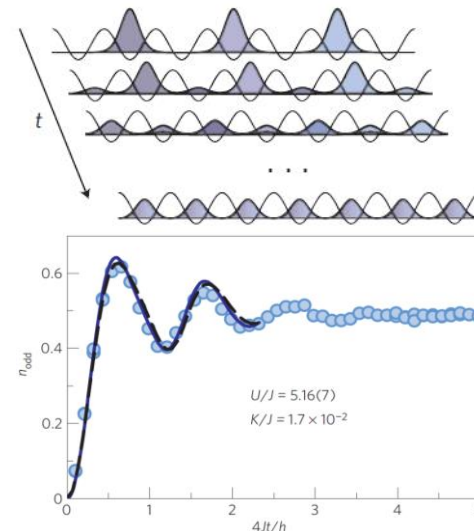
[C. Chiu *et al.*, Science **365**, 251-256 (2019)]

高温超伝導
(銅酸化物)



非平衡ダイナミクス

孤立量子系
の緩和過程



[S. Trotzky *et al.*, Nat. Phys. **8**, 325-330 (2012)]

光格子系

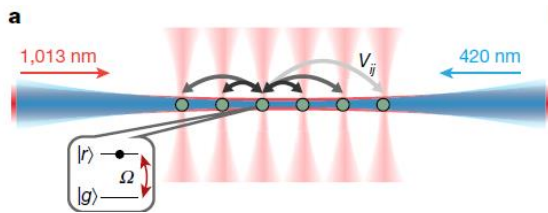
今日はこの話はしない

◆量子Isingモデル

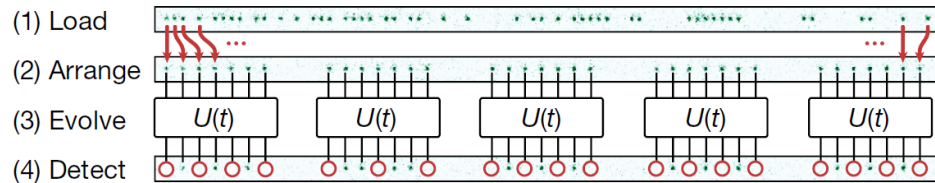
Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator

Hannes Bernien¹, Sylvain Schwartz^{1,2}, Alexander Keesling¹, Harry Levine¹, Ahmed Omran¹, Hannes Pichler^{1,3}, Soonwon Choi¹, Alexander S. Zibrov¹, Manuel Endres⁴, Markus Greiner¹, Vladan Vuletic² & Mikhail D. Lukin¹

[H. Bernien *et al.*, Nature **551**, 579 (2017)]

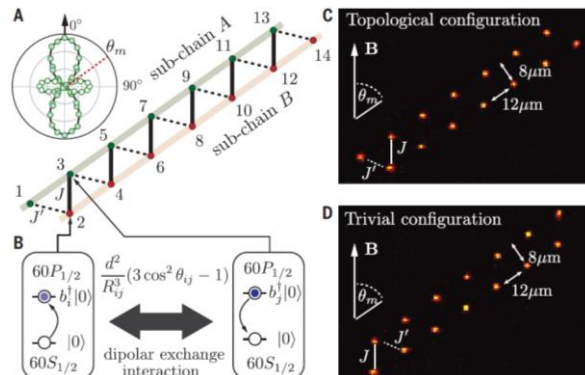


$$\hat{H}/\hbar = \sum_i \frac{\Omega_i}{2} \hat{\sigma}_x^i - \sum_i \Delta_i \hat{n}_i + \sum_{i<j} V_{ij} \hat{n}_i \hat{n}_j$$



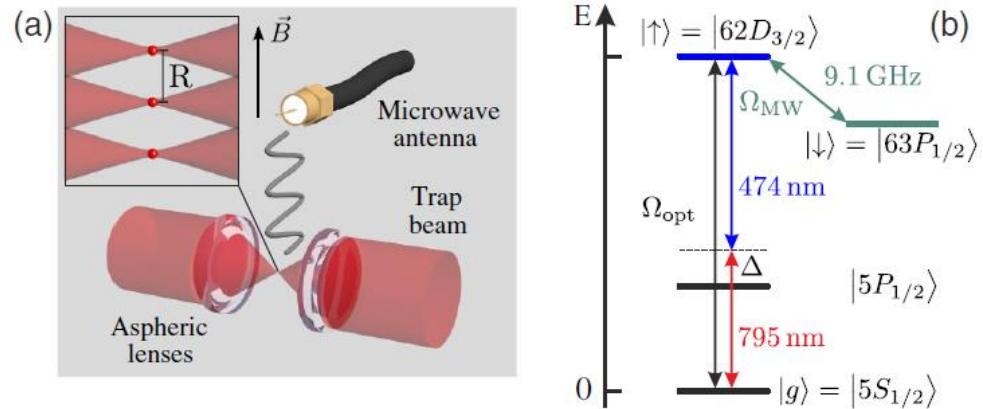
◆Su-Schrieffer-Heegerモデル

[S. de Léséleuc, V. Lienhard *et al.*, Science **365**, 775 (2019)]



◆量子XYモデル

[D. Barredo *et al.*, PRL **114**, 113002 (2015)]



$$\frac{H}{\hbar} = \sum_{i \neq j} \frac{C_3}{R_{ij}^3} (\sigma_i^+ \sigma_j^- + \sigma_i^- \sigma_j^+)$$

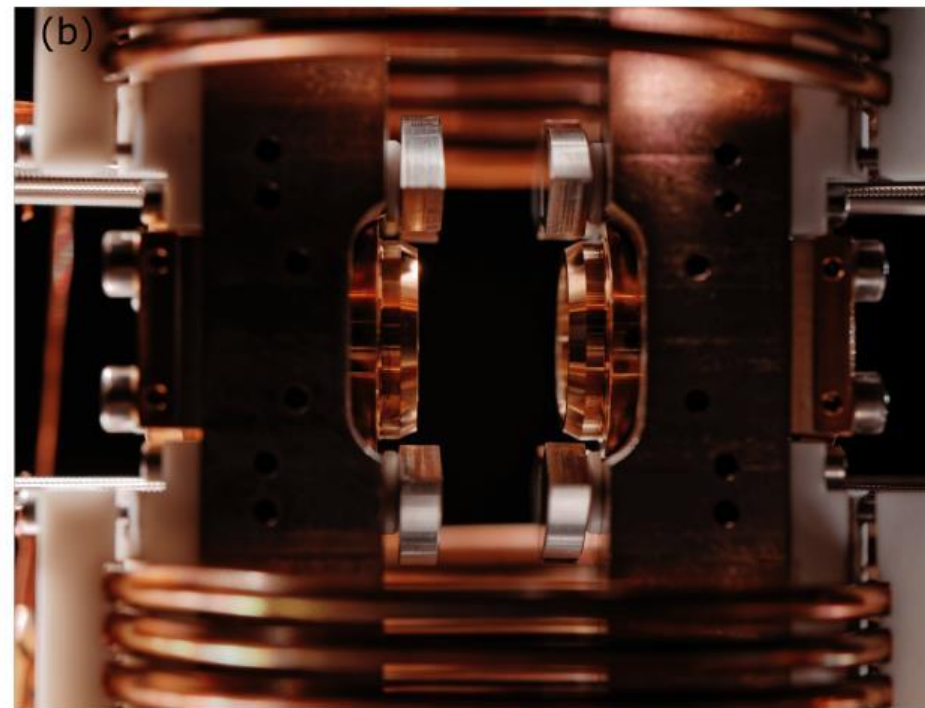
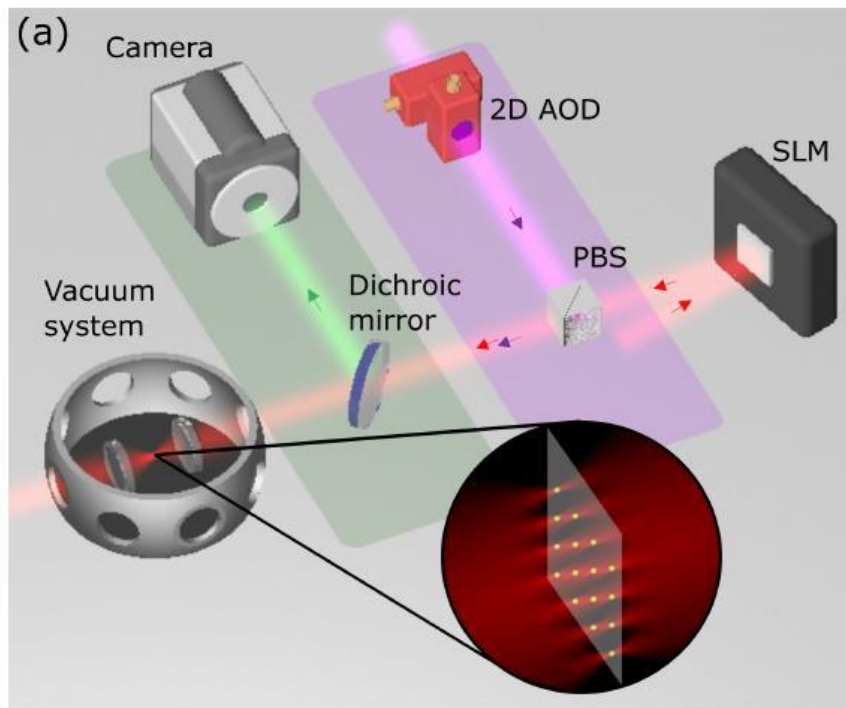
光ピンセット系

$$H = - \sum_{i \in A, j \in B} J_{ij} (b_i^\dagger b_j + b_i b_j^\dagger)$$

今日はこの話もしない

光ピンセットで
原子量子ビットを配列状に配置

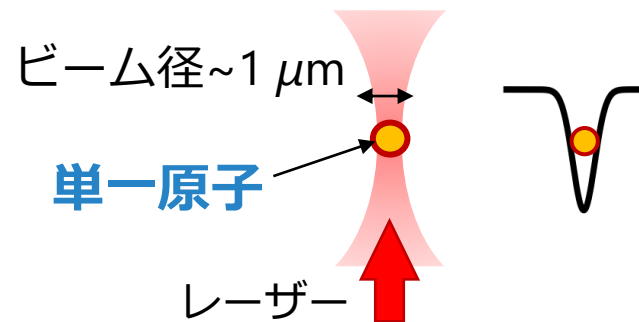
レーザー光で
ゲート操作・観測



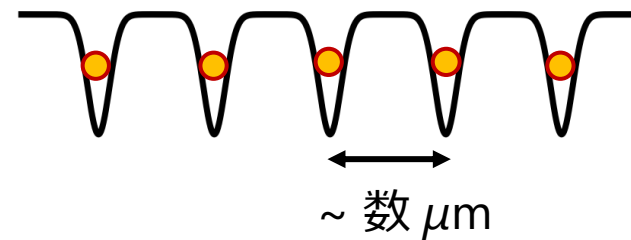
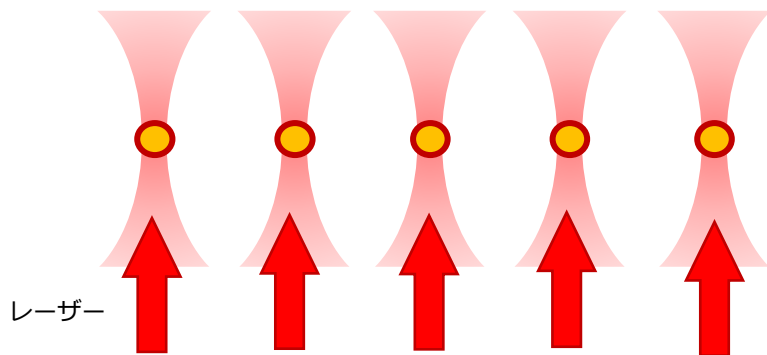
冷却原子型量子コンピュータ企業PASQAL 白書 “Quantum computing with neutral atoms”
arXiv: 2006.12326

◆**光ピンセット** (Optical tweezers) = **強く集光**された光双極子トラップ

対物レンズ



◆**光ピンセット配列** optical tweezers array



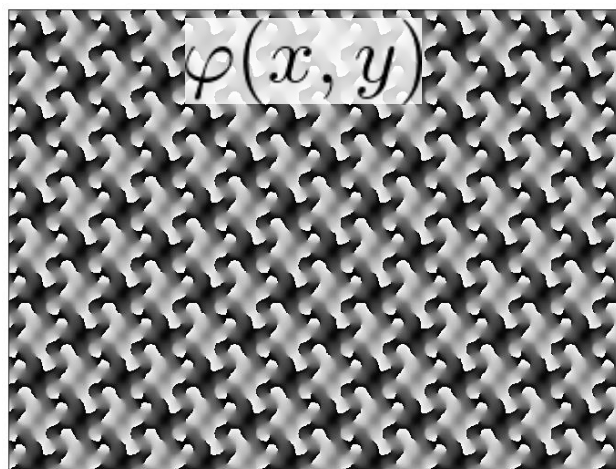
◆光ピンセット配列 optical tweezers array



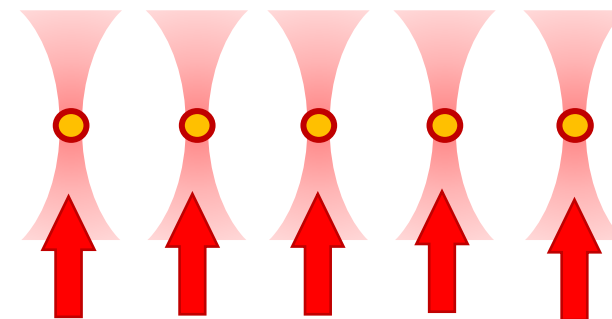
画像：浜松ホトニクス中央研究所提供

空間光変調器

レーザー光波面を変調



$$I(x, y) = |\mathcal{F}[e^{i\varphi(x, y)}]|^2$$



$I(x, y)$

数 μm 間隔



任意の配列形状が可能！

“波”の多重化 Multiplexing

詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

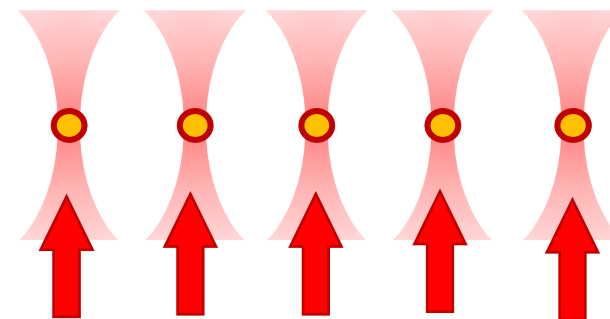
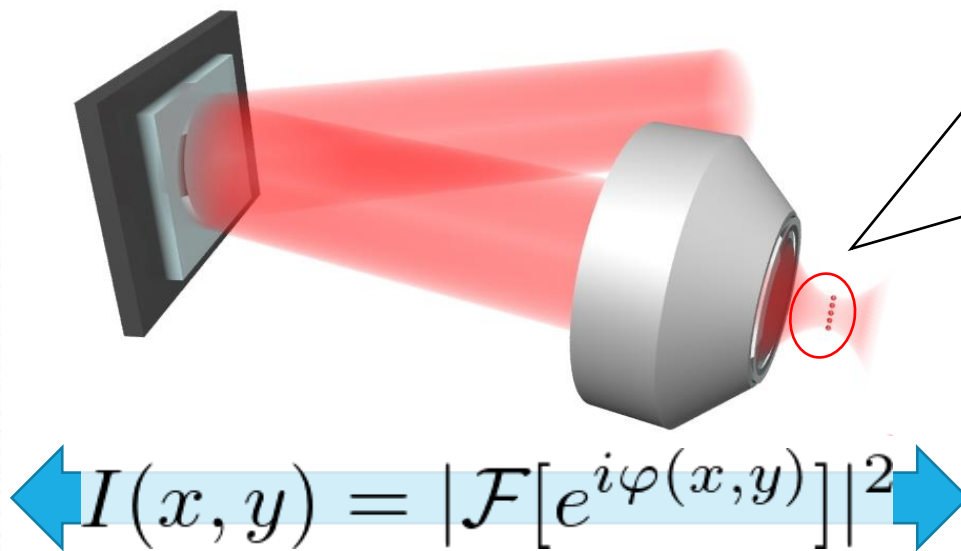
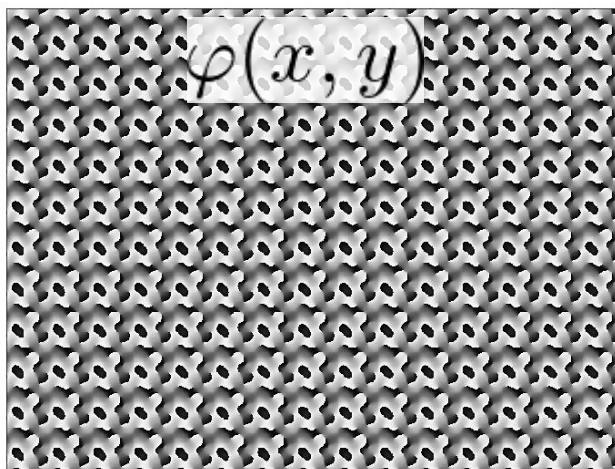
◆光ピンセット配列 optical tweezers array



画像：浜松ホトニクス中央研究所提供

空間光変調器

レーザー光波面を変調



$I(x, y)$

数 μm 間隔

任意の配列形状が可能！

“波”の多重化 **Multiplexing**

詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

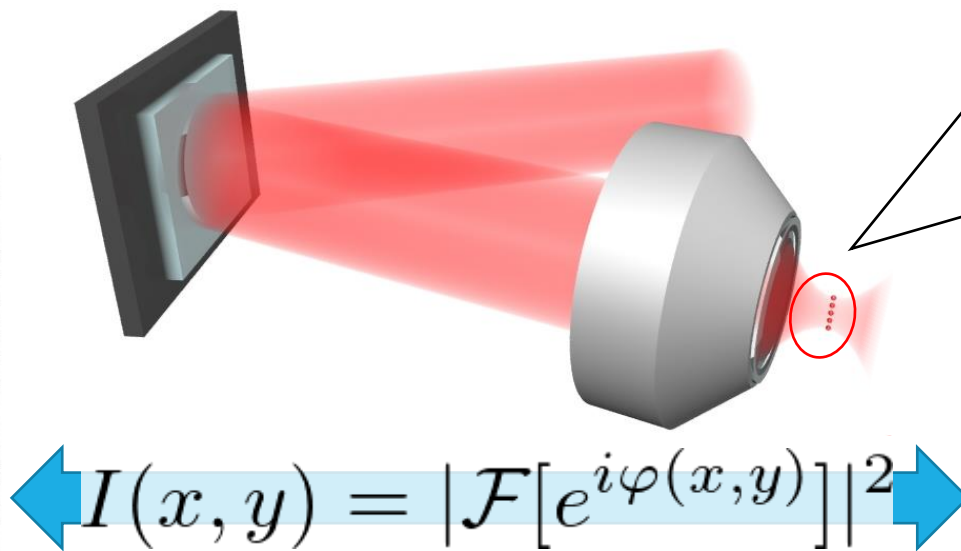
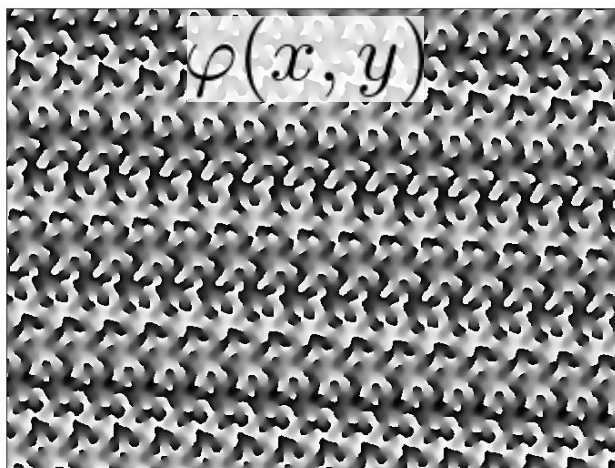
◆光ピンセット配列 optical tweezers array



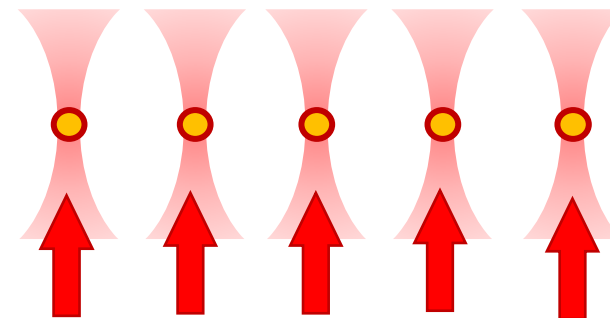
画像：浜松ホトニクス中央研究所提供

空間光変調器

レーザー光波面を変調

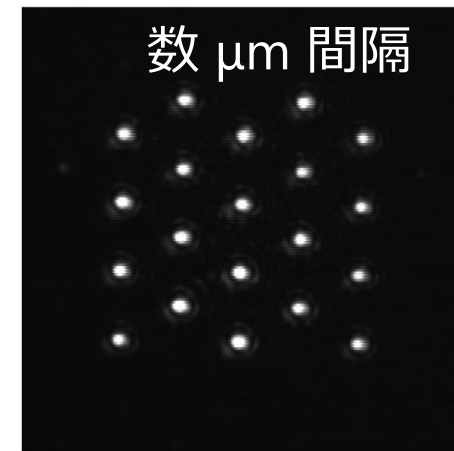


$$I(x, y) = |\mathcal{F}[e^{i\varphi(x, y)}]|^2$$



$I(x, y)$

数 μm 間隔



任意の配列形状が可能！

“波”の多重化 **Multiplexing**

詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

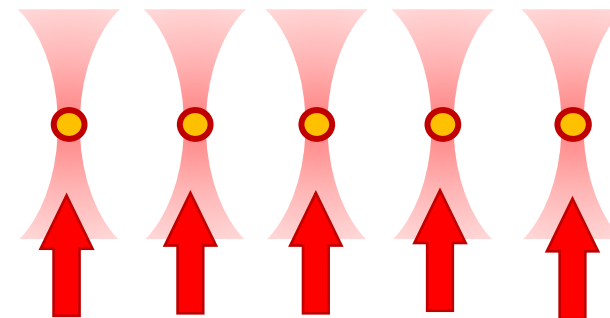
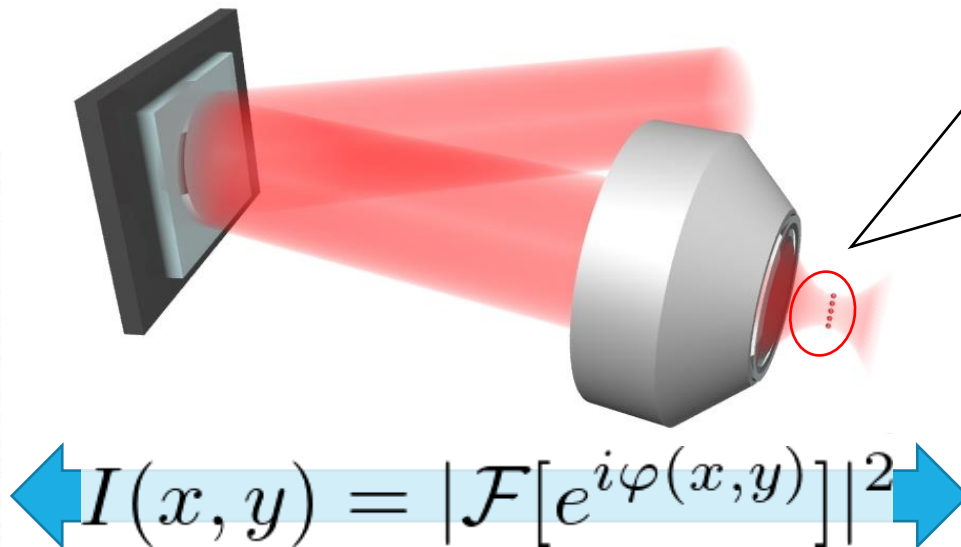
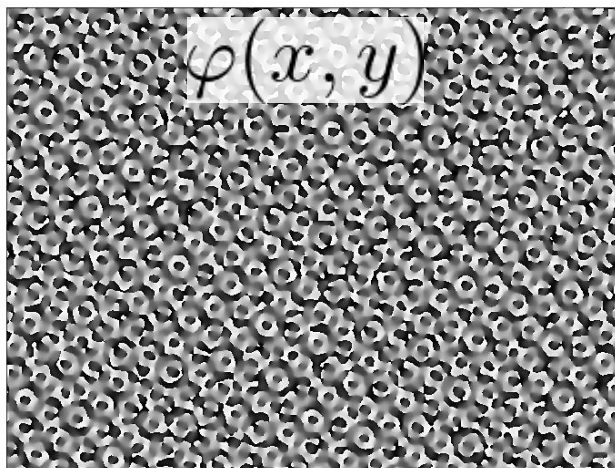
◆光ピンセット配列 optical tweezers array



画像：浜松ホトニクス中央研究所提供

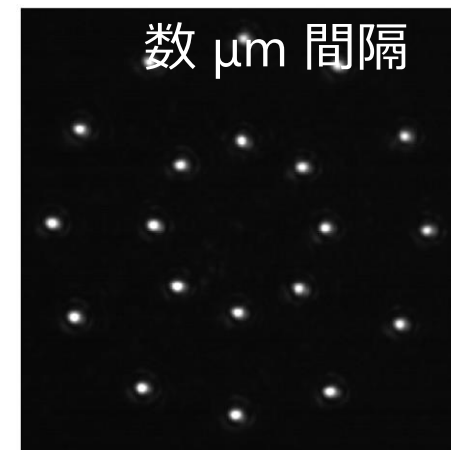
空間光変調器

レーザー光波面を変調



$I(x, y)$

数 μm 間隔



任意の配列形状が可能！

“波”の多重化 **Multiplexing**

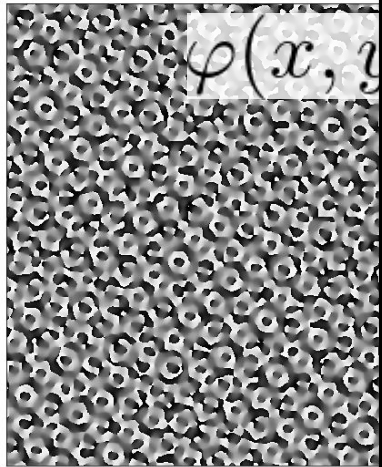
詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

◆光ピンセツ



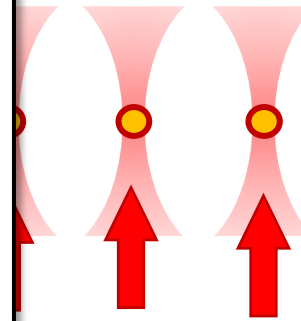
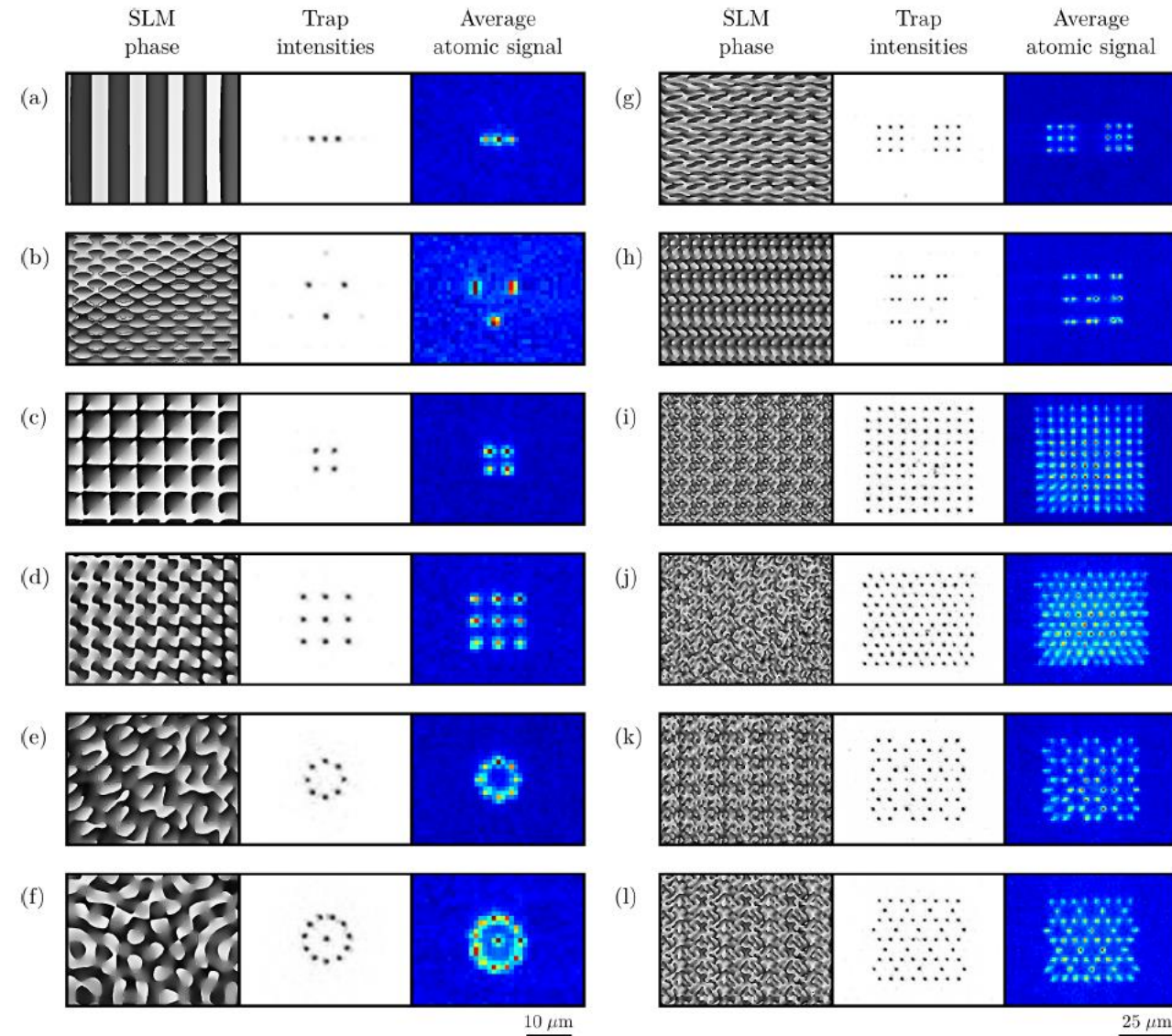
画像：浜松ホトニクス

レーザー光波面



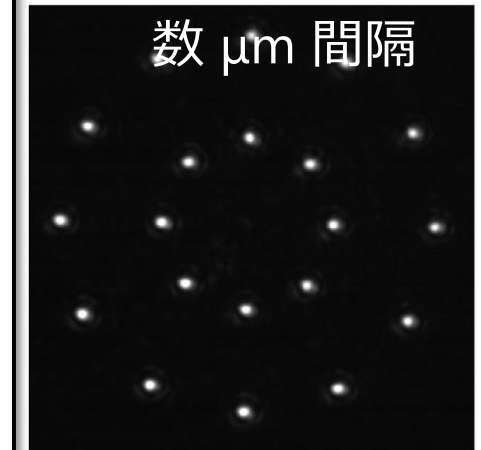
SINGLE-ATOM TRAPPING IN HOLOGRAPHIC 2D ARRAYS ...

PHYS. REV. X 4, 021034 (2014)



$$I(x, y)$$

数 μm 間隔



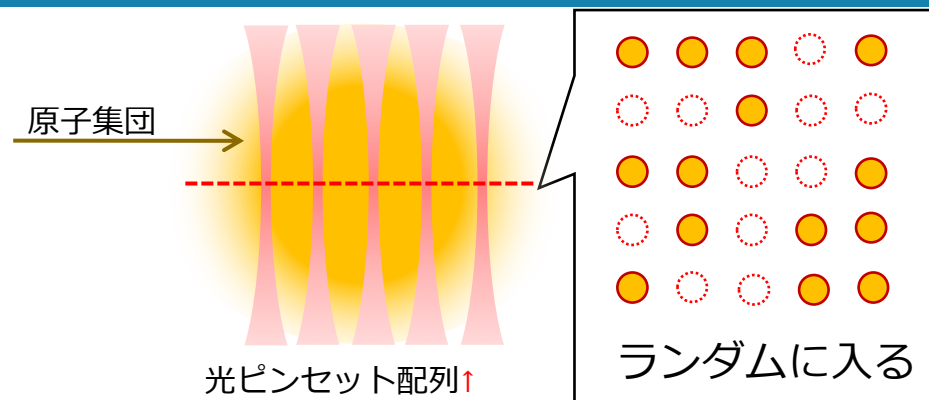
任意の配列形状が可能！

多重化 Multiplexing

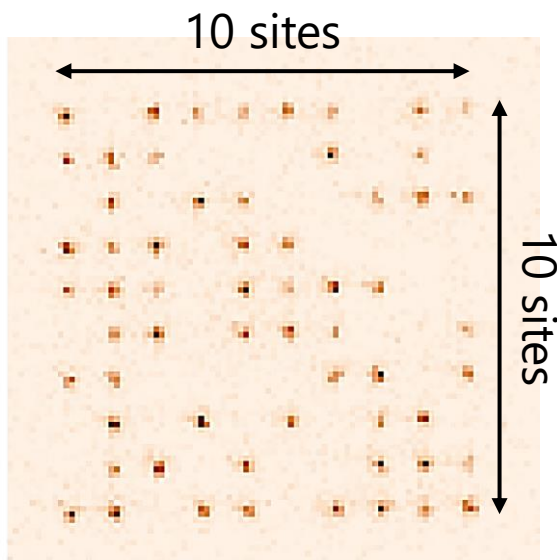
[F. Nogrette *et al.*, PRX 4, 021034 (2014)] ブレークスルー

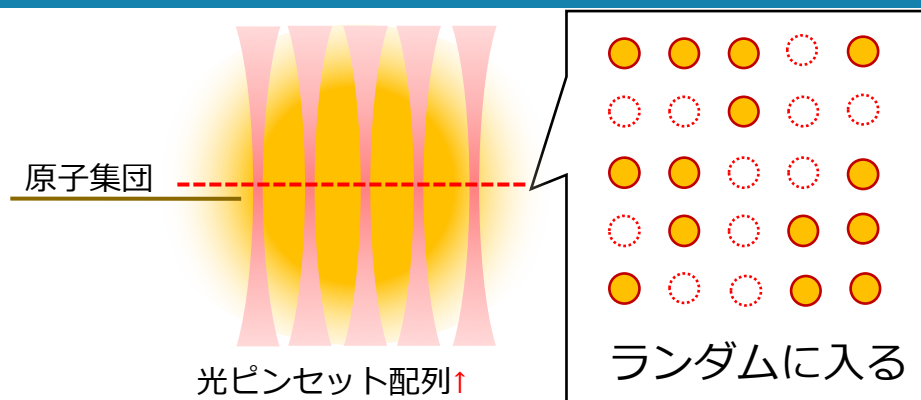
原子量子ビットの再配列

27



→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 ~ **50 %**

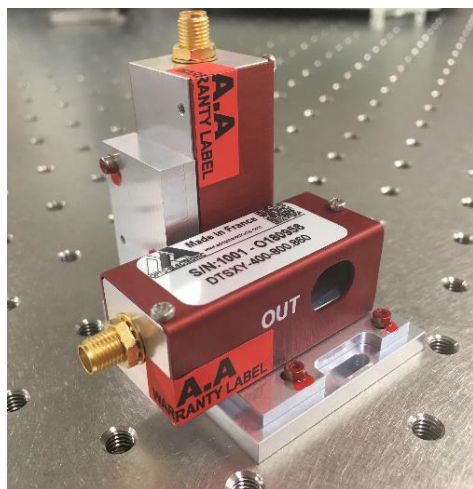




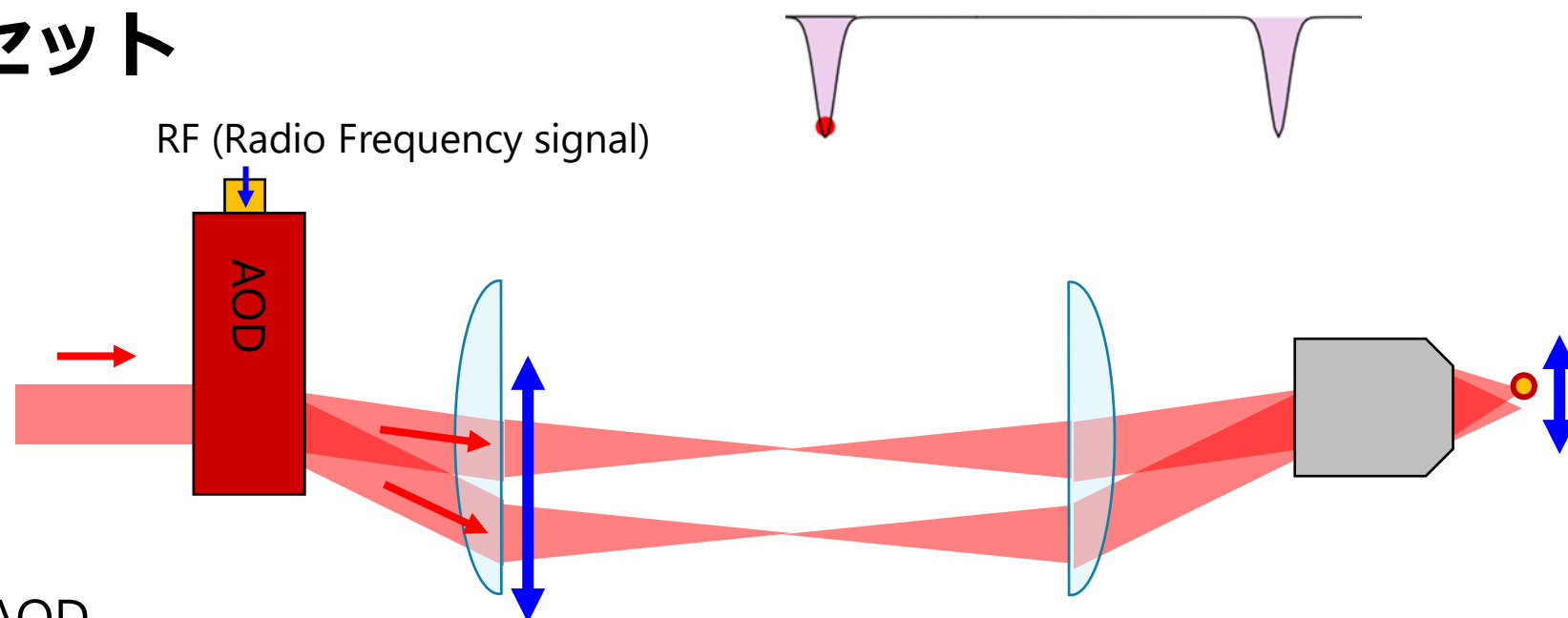
→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 ~ 50 %

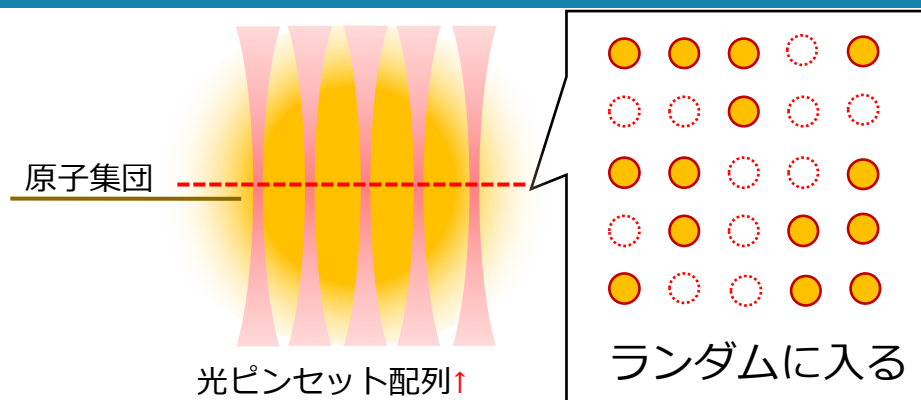
2016年ブレイクスルー

➤ 動的光ピンセット



Acousto-Optic Deflector: AOD





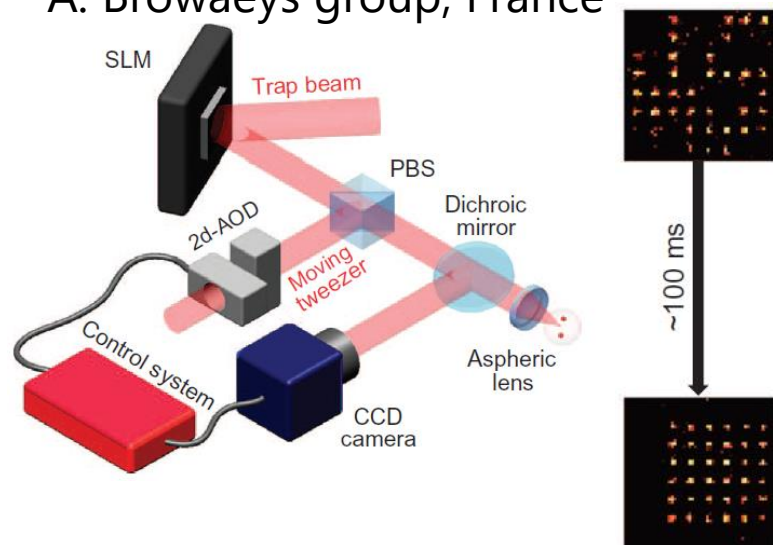
→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 ~ 50 %

2016年ブレイクスルー

配列中の原子を撮影 → 再配列

欠陥無し任意配列が可能に

A. Browaeys group, France



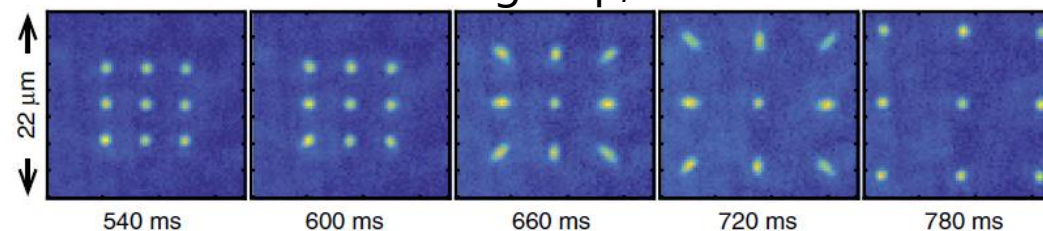
[D. Barredo, S. de Léséleuc *et al.*, Science **354**, 1021 (2016)]

M. Lukin group, USA

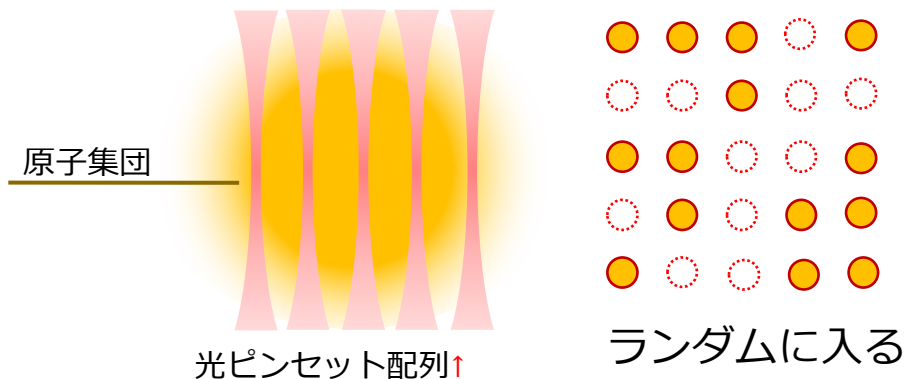


[M. Endres *et al.*, Science **354**, 1024 (2016)]

J. Ahn group, Korea



[H. Kim *et al.*, Nat. Commun. **7**, 13317 (2016)]



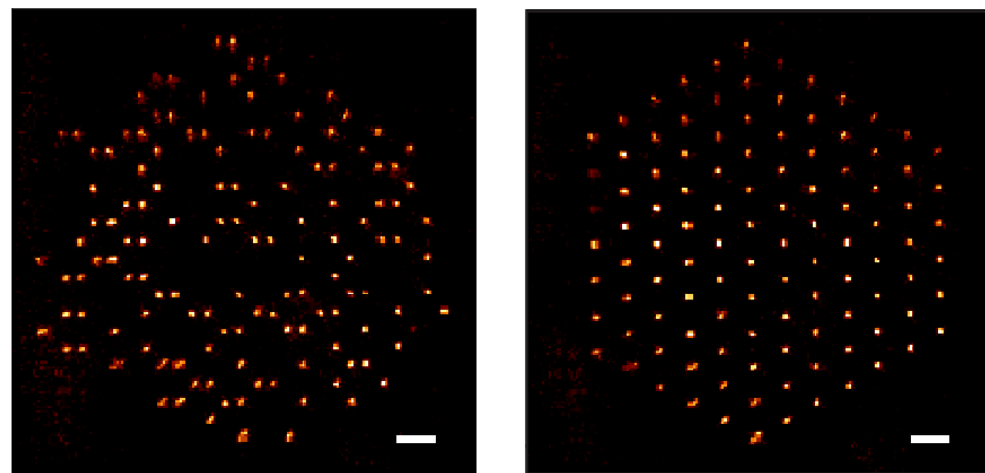
→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 ~ 50 %

2016年ブレイクスルー

配列中の原子を撮影 → 再配列

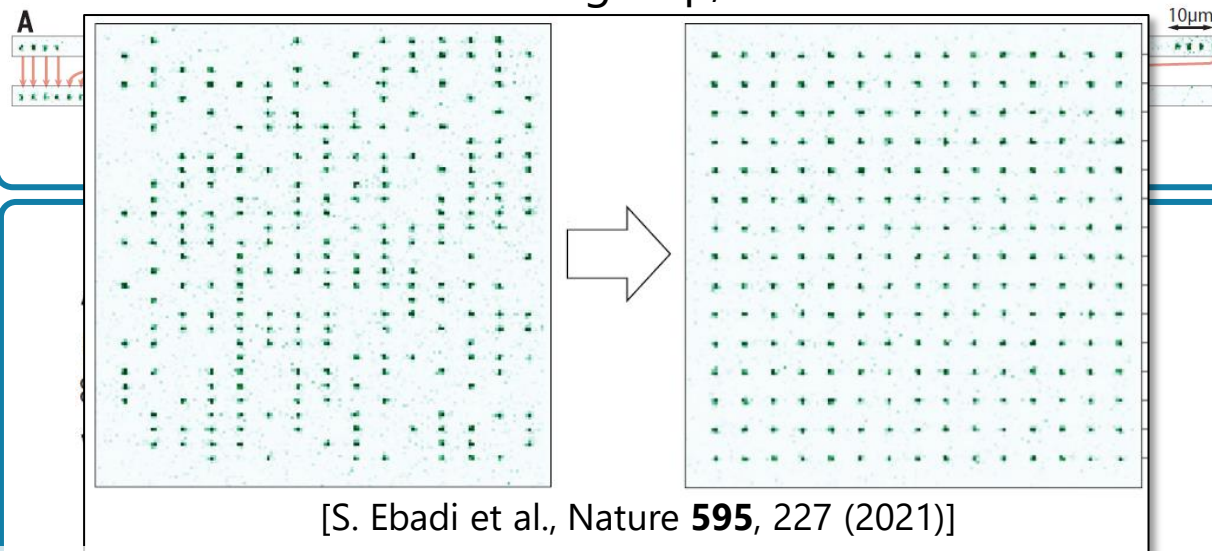
欠陥無し任意配列が可能に

A. Browaeys group, France



[K-N. Schymik *et al.*, PRA **102**, 063107 (2020)]

M. Lukin group, USA

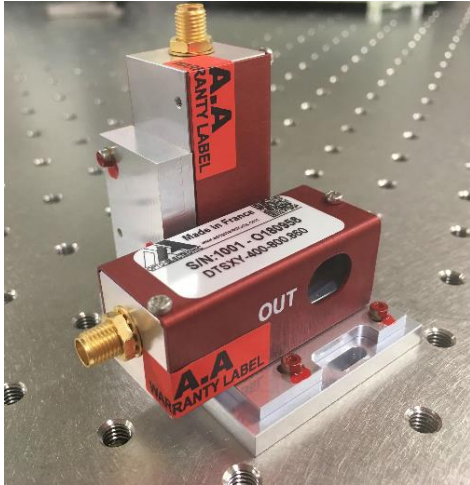


[S. Ebadi *et al.*, Nature **595**, 227 (2021)]

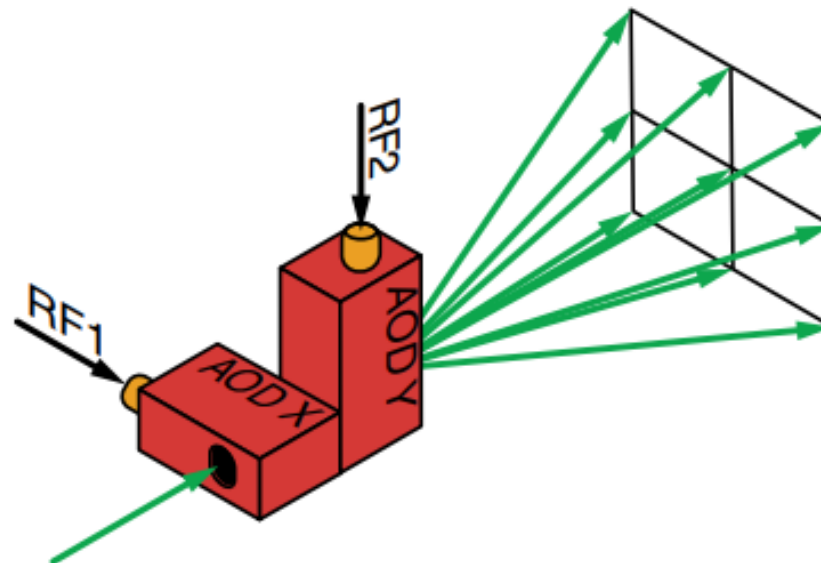
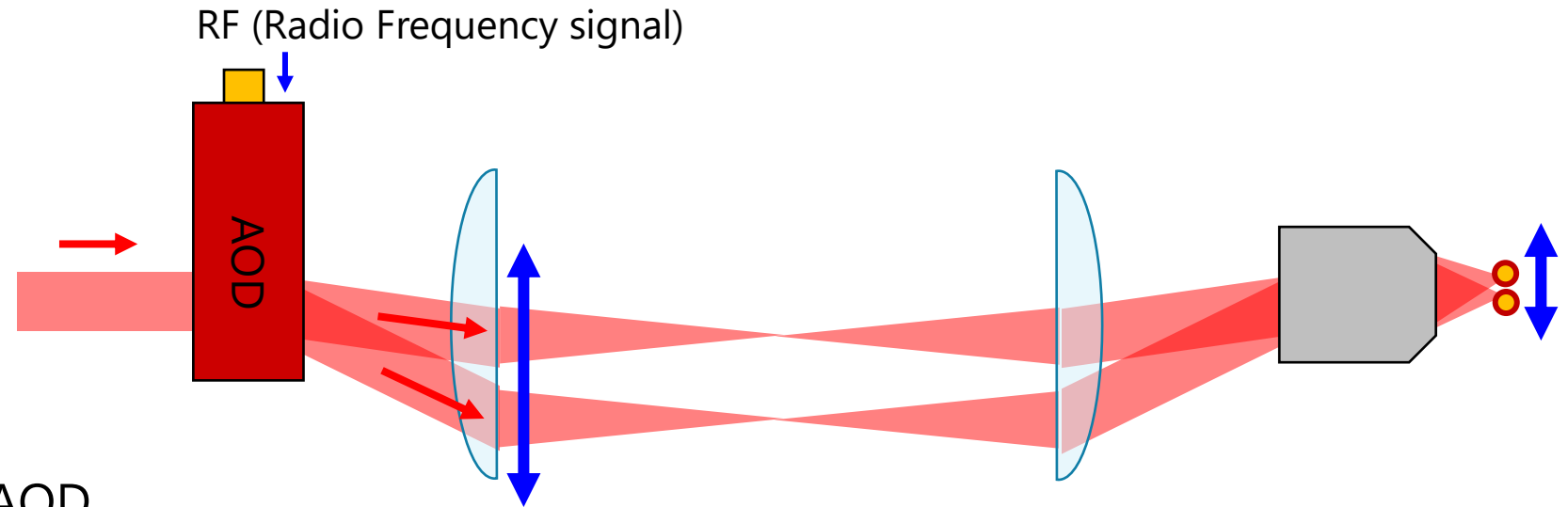
2次元, 数100~1000原子, 個別観測・制御できる間隔

Local addressing/Parallel addressing

31



Acousto-Optic Deflector: AOD

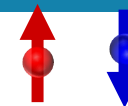


RF1 水平: f_1, f_2, f_3
RF2 垂直: f'_1, f'_2, f'_3
→ $3 \times 3 = 9$ tweezers!

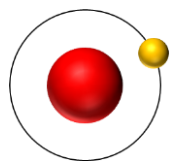
“波”の多重化 Multiplexing

Multitone signal : Arbitrary waveform generator

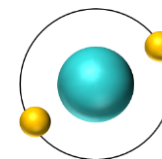
量子ビット = 原子の電子/核スピン状態



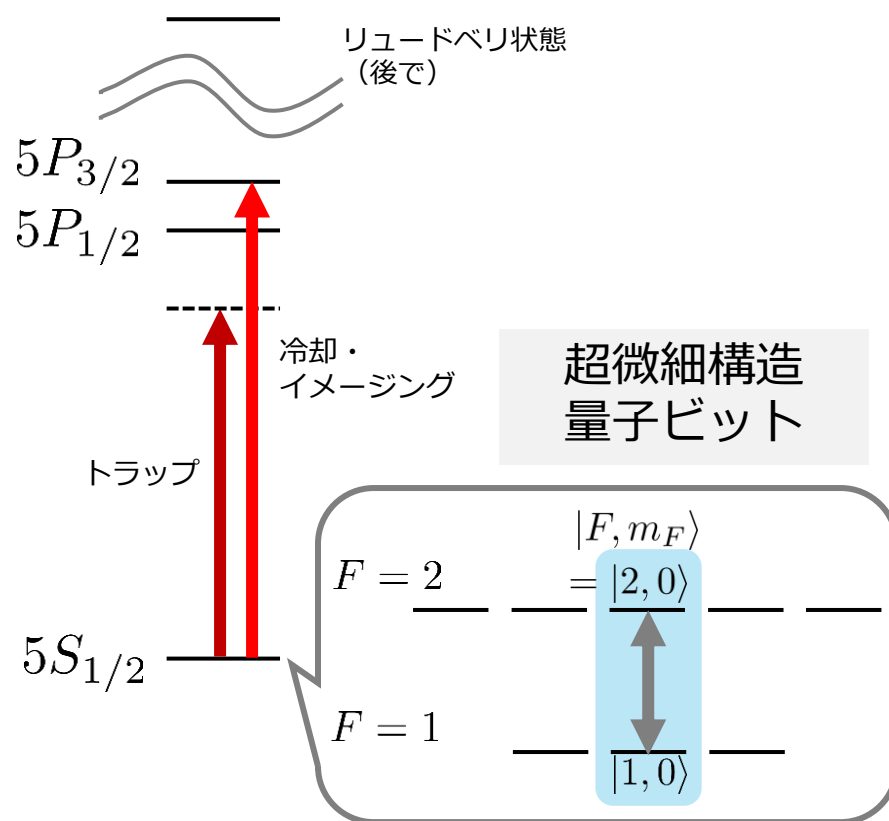
アルカリ原子
Rb, Cs



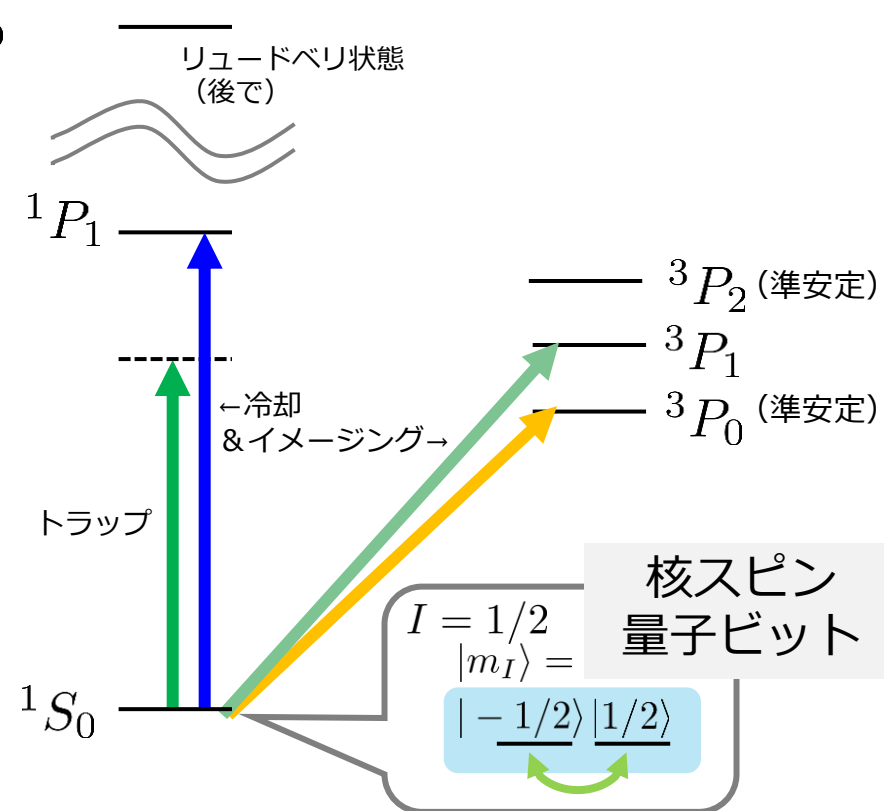
アルカリ土類（様）原子
Yb, Sr



^{87}Rb

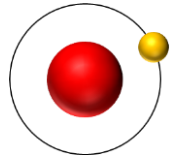


^{171}Yb

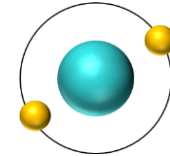


量子ビット = 原子の電子/核スピン状態  

アルカリ原子
Rb, Cs

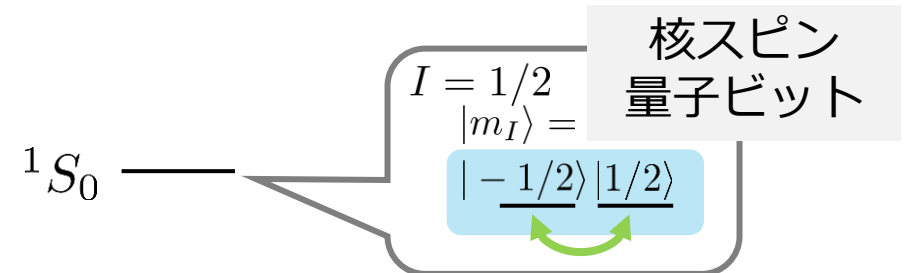
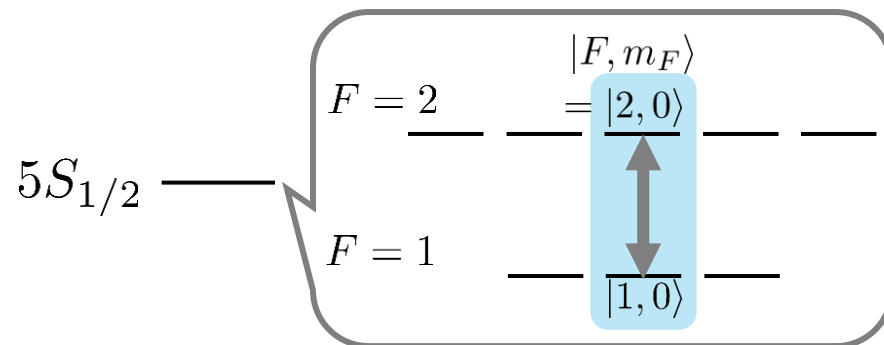


アルカリ土類（様）原子
Yb, Sr



コヒーレンス時間： $T_1 = 1 \sim 10 \text{ s}$, $T_2 \sim 1 \text{ s}$ \gg ゲート操作時間 $\sim 1 \mu\text{s}$

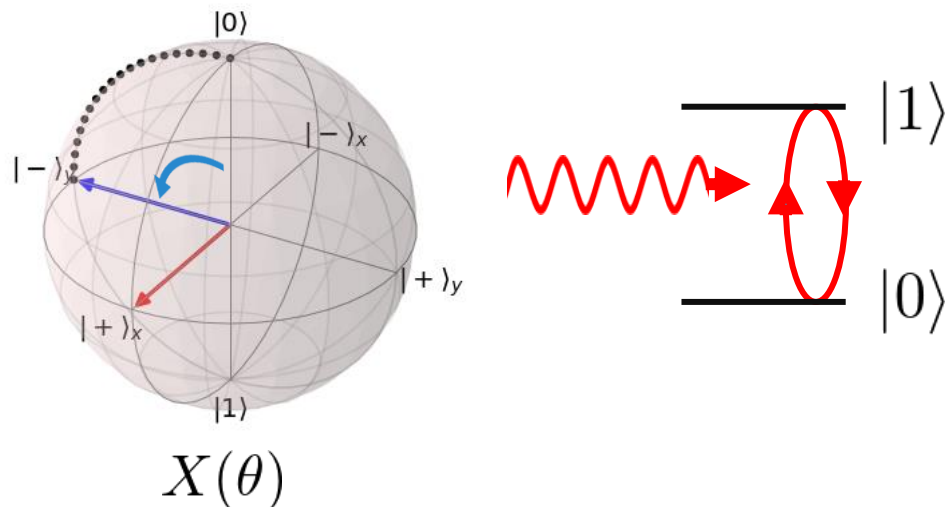
超微細構造
量子ビット



ゲート操作 : 1-qubit gate

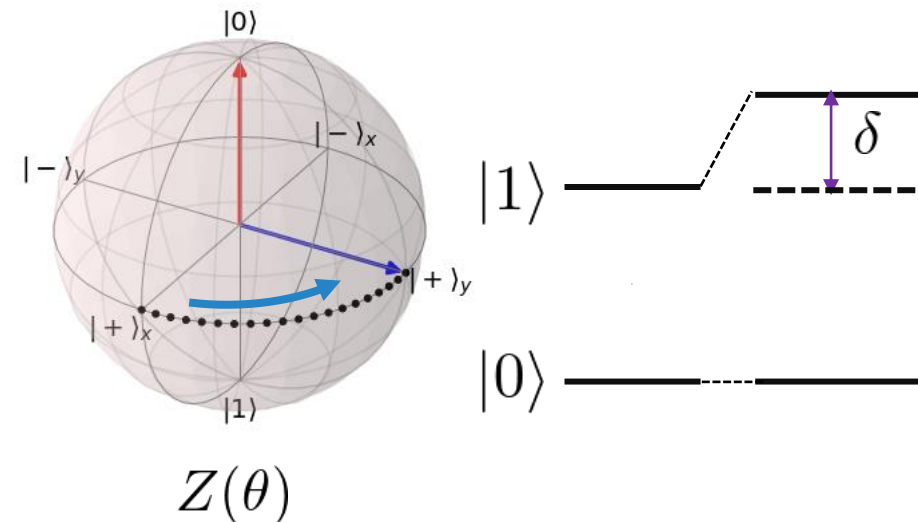
34

➤ X回転ゲート: 共鳴光/マイクロ波によるラビ振動



$$X(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Omega t/2) & -i \sin(\Omega t/2) \\ -i \sin(\Omega t/2) & \cos(\Omega t/2) \end{bmatrix} \quad \theta = \Omega t$$

➤ Z回転ゲート: ライトシフトによる位相獲得



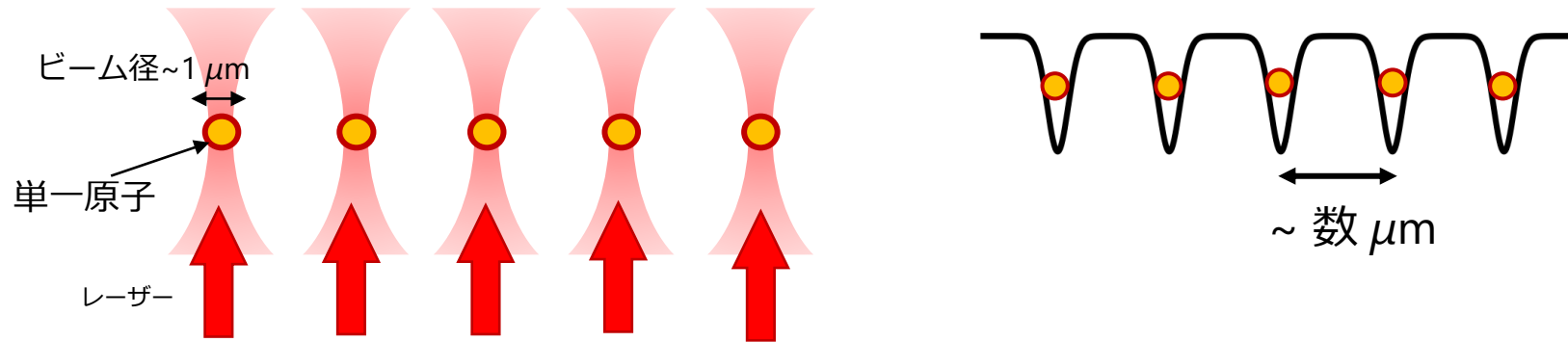
$$\alpha|0\rangle + e^{i\delta t}\beta|1\rangle$$

1-qubit gate fidelity ~ 99.96-99.99%

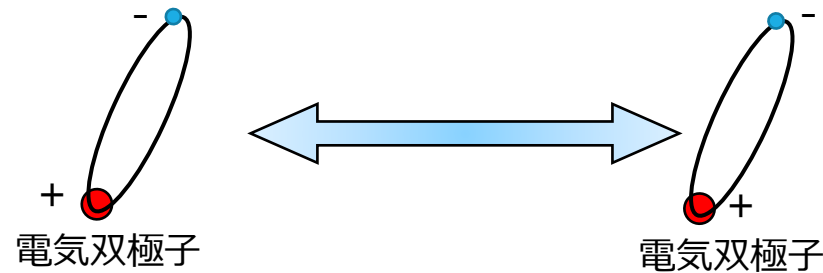
※ Best score: Infidelity $4.7(1.1) \times 10^{-5}$ [PRL **121**, 240501 (2018)]

[D. Bluvstein et al., Nature **604**, 451 (2022),
T. M. Graham et al., Nature **604**, 457 (2022).]

コヒーレンス時間 : $T_1 = 1 \sim 10$ s, $T_2 \sim 1$ s >> ゲート操作時間 ~ 1 μ s



中性原子 → 長距離の相互作用無し？



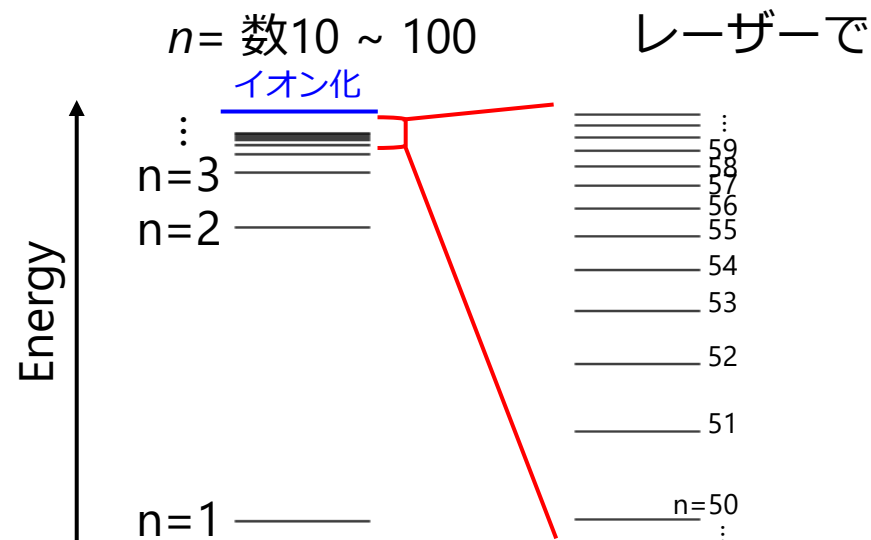
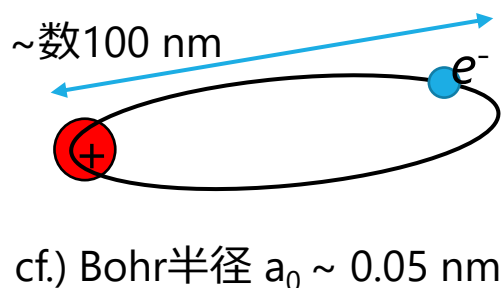
原子を**リュードベリ状態 (Rydberg state)**に励起する

→ 双極子双極子相互作用

リュードベリ原子 Rydberg atom

36

リュードベリ状態/原子 = 最外殻電子を**高い主量子数 n** に励起した状態/原子

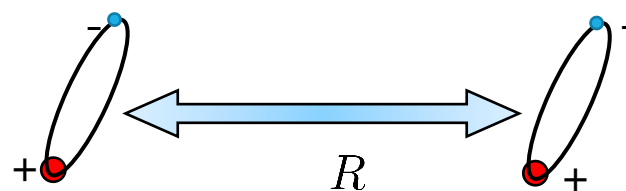


➤ 長距離相互作用

- 双極子双極子相互作用 $V_{dd} = \frac{C_3}{R^3}$

→ 2次摂動 van der Waals相互作用:

$$V_{vdW} = \frac{V_{dd}^2}{\Delta E} = \frac{C_6}{R^6}$$



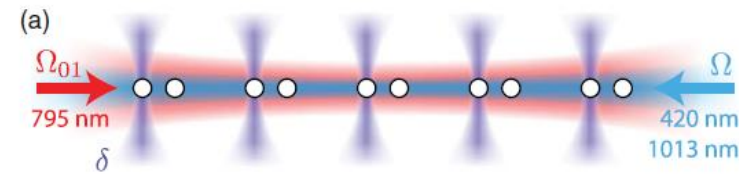
- ✓ μm スケールでも相互作用
- ✓ レーザー光の局所照射でON/OFF
- ✓ 距離・主量子数 n により自由に制御可能

隣接サイトを
を超えて
ゲート操作
可能

◆ Controlled-Zゲート

Lukin group, Harvard [H. Levine *et al.*, PRL **123**, 170503 (2019)]

複数のペアに対して並行に操作

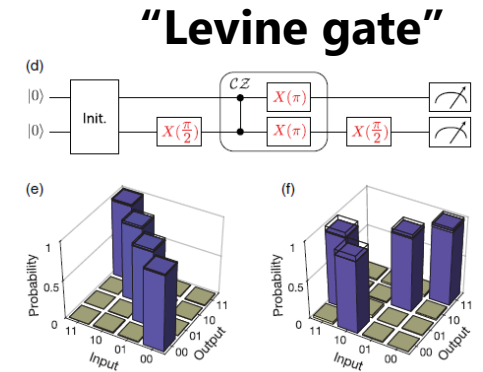


2019年：Bell state fidelity (SPAM corrected): $\geq 97.4(3)\%$

(**2018**年 忠実度低減要因の同定[PRA **97**, 053803(2018)]がきっかけ：ブレイクスルー)

→ 2023年 4月 同groupにより

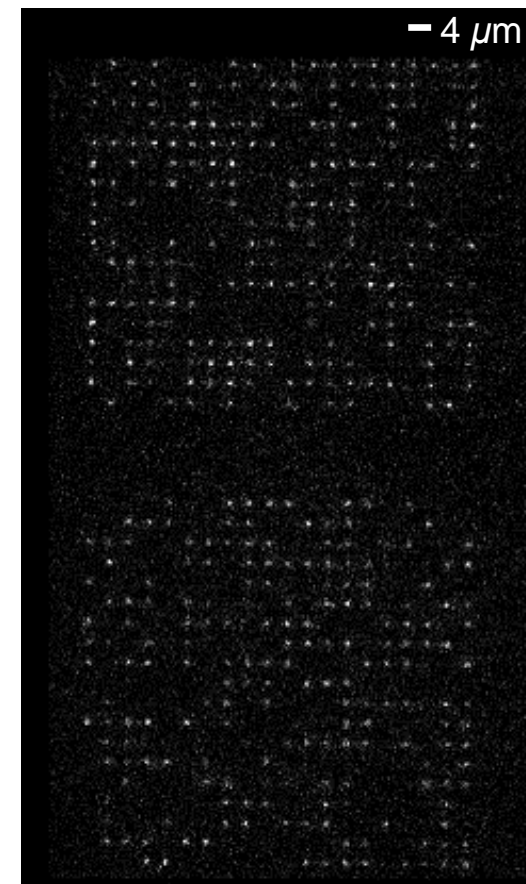
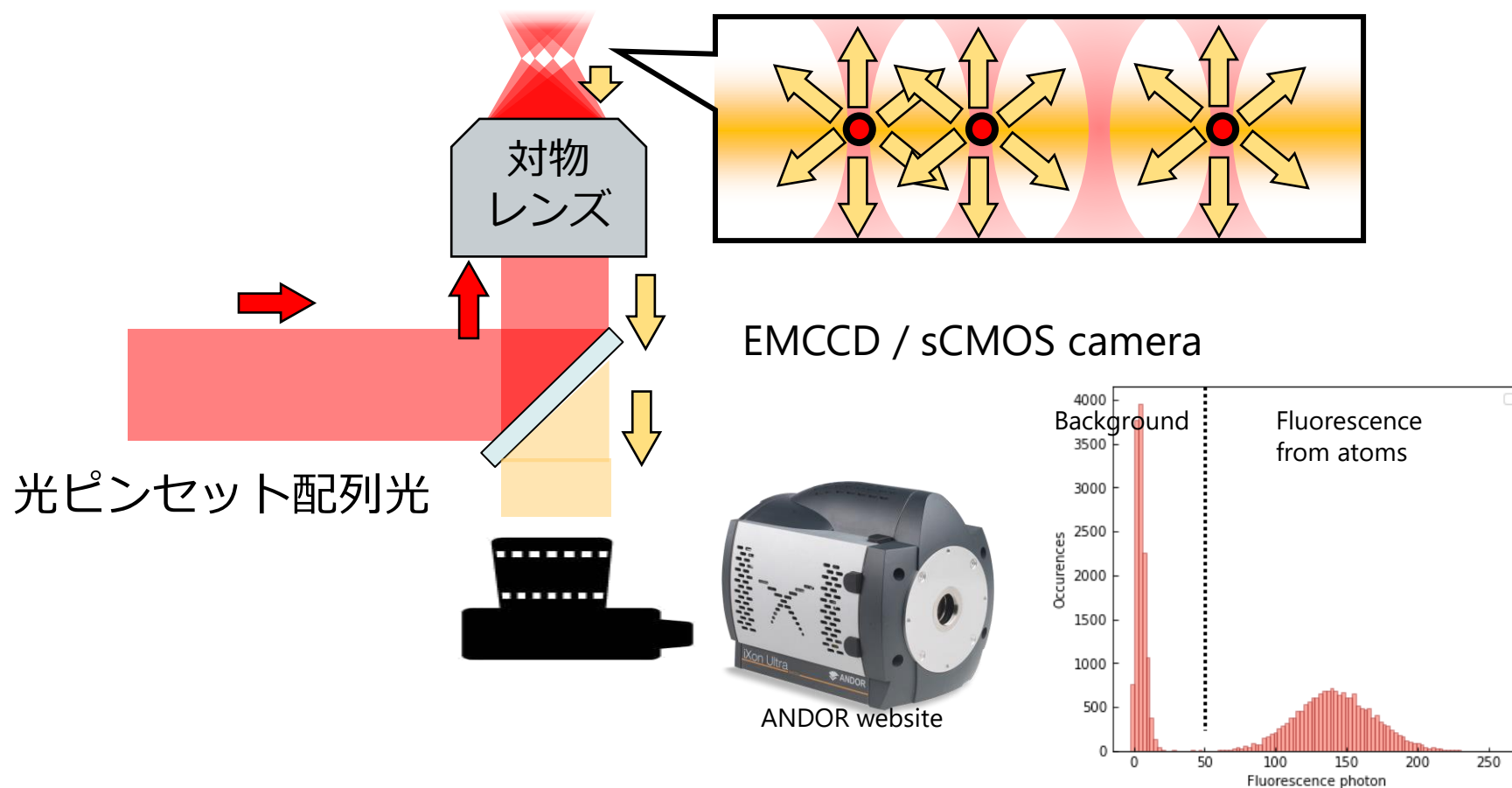
CZ gate fidelity (SPAM corrected) = **99.52(4)%** 達成 [S. J. Evered *et al.*, Nature **622**, 268 (2023)]



ゲート操作時間 $\sim 0.2 \mu\text{s} \ll$ コヒーレンス時間

cf.) $T_1 = 1 \sim 10 \text{ s}$, $T_2 \sim 1 \text{ s}$

原子に近共鳴光(イメージング光)を当て、原子からの蛍光をカメラで観測



原子が **光っている/光っていない** を判定

$|0\rangle$

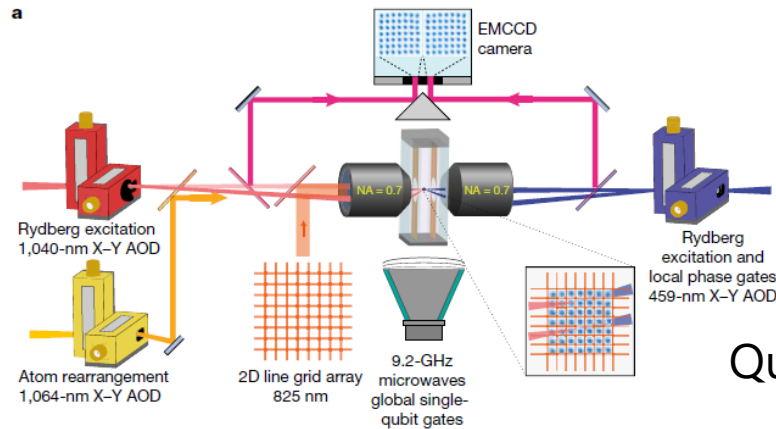
$|1\rangle$

Readout fidelity ~ **99.8%** [*Nature* 626, 58 (2023)]

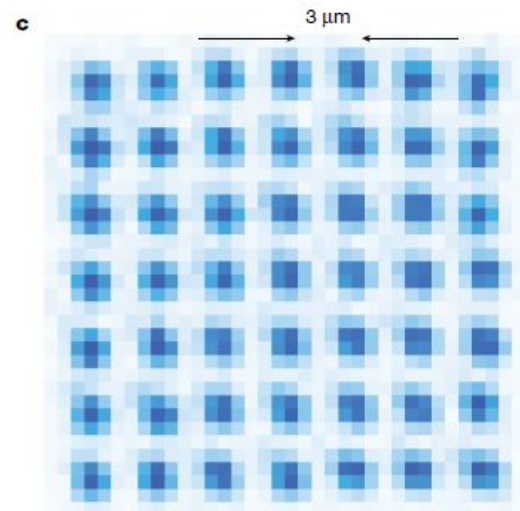
Quantum circuits

39

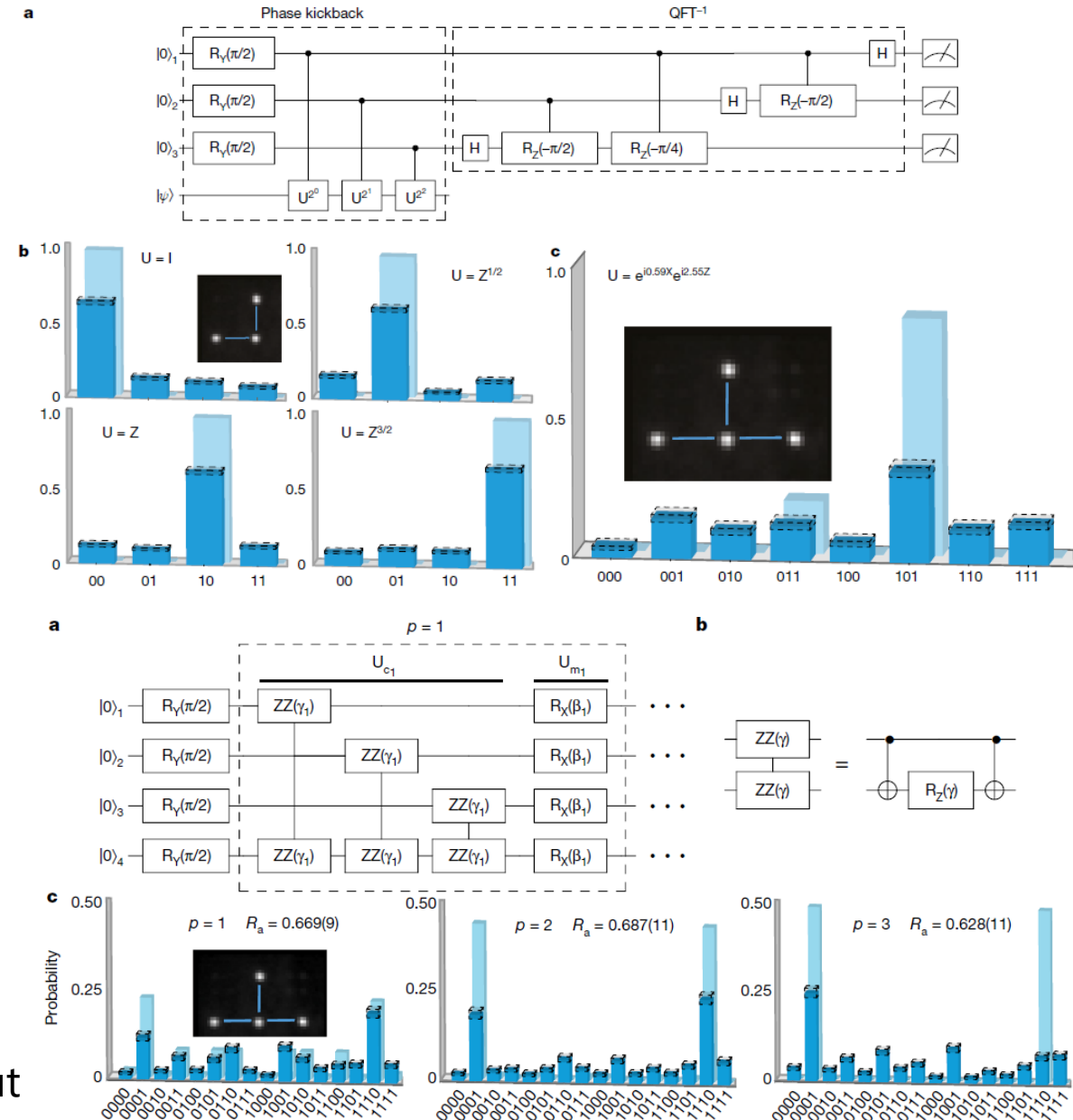
Saffman group, University of Wisconsin-Madison
+ ColdQuanta (Infleqtion) [Nature **604**, 457 (2022)]



Quantum phase estimation



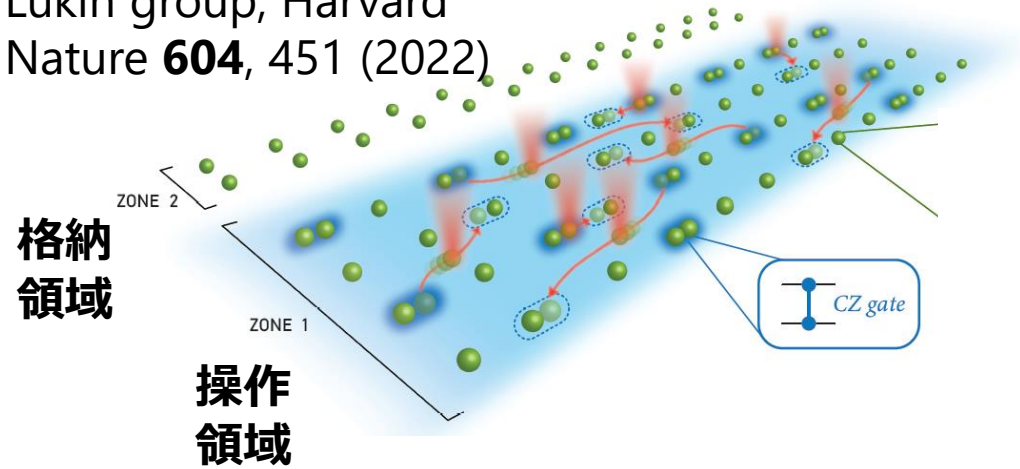
QAOA algorithm for solving MaxCut



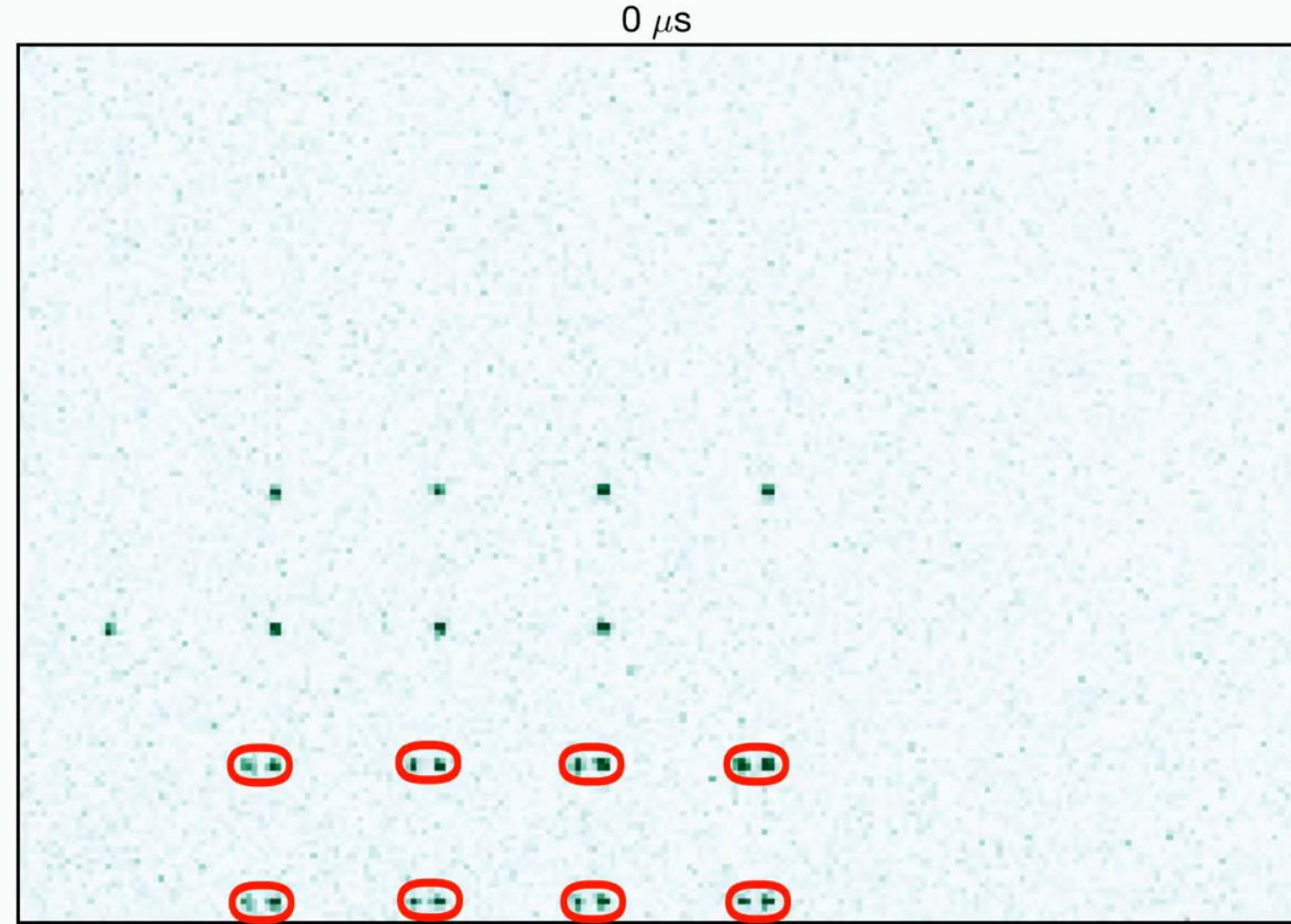
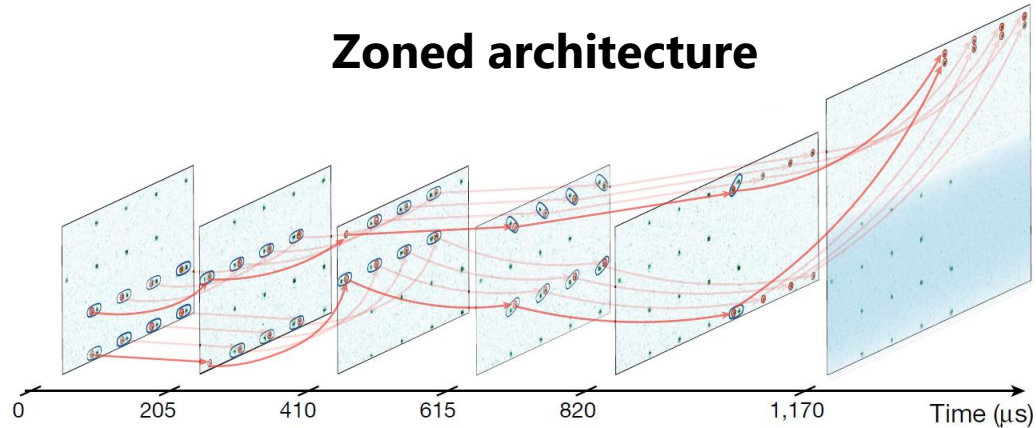
動的光ピンセットによる量子ビット輸送

40

Lukin group, Harvard
Nature **604**, 451 (2022)



Zoned architecture

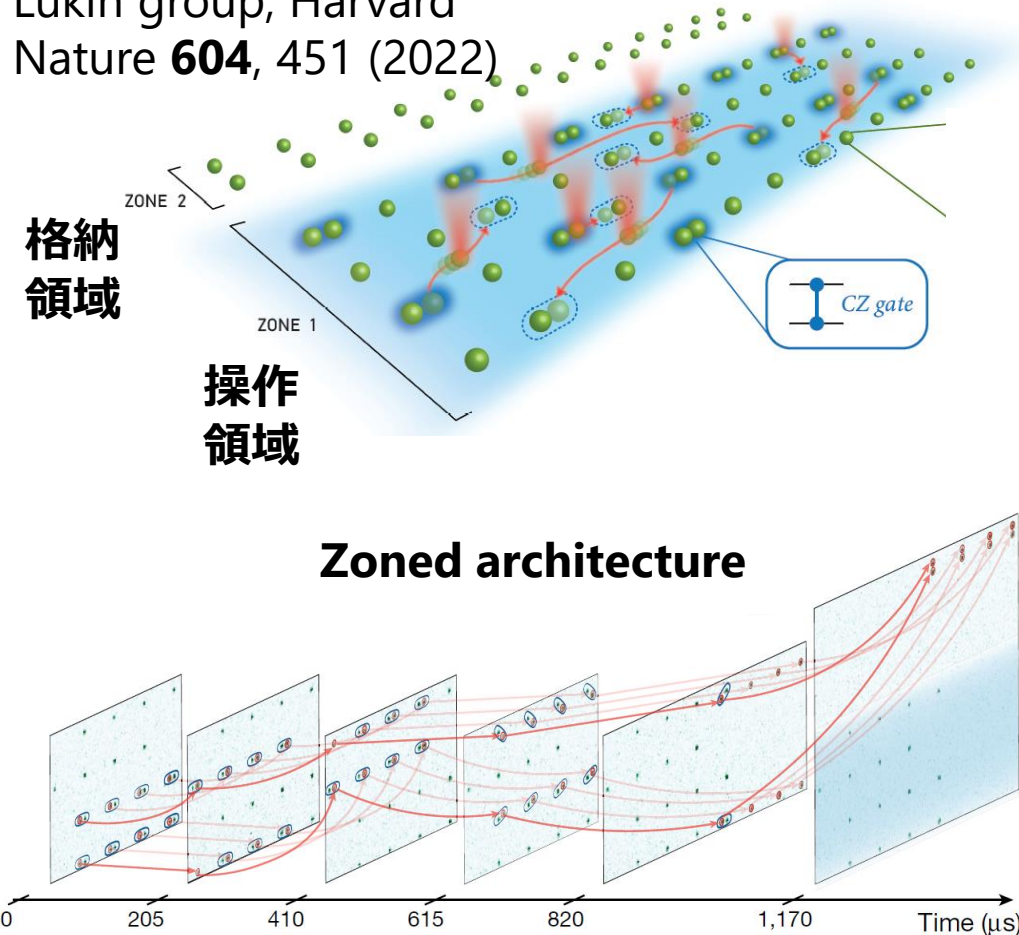


動的光ピンセットにより**全結合**が可能に！

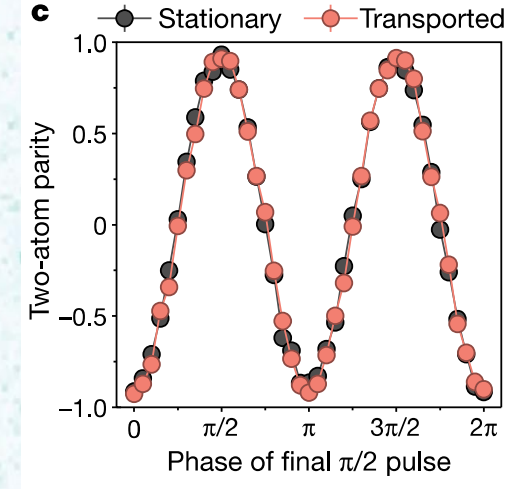
動的光ピンセットによる量子ビット輸送

41

Lukin group, Harvard
Nature **604**, 451 (2022)



Dynamical decoupling (XY16-128)
輸送前後でfidelityの優位な劣化なし



動的光ピンセットにより全結合が可能に！

Breaking News!!! Logical quantum processor

42

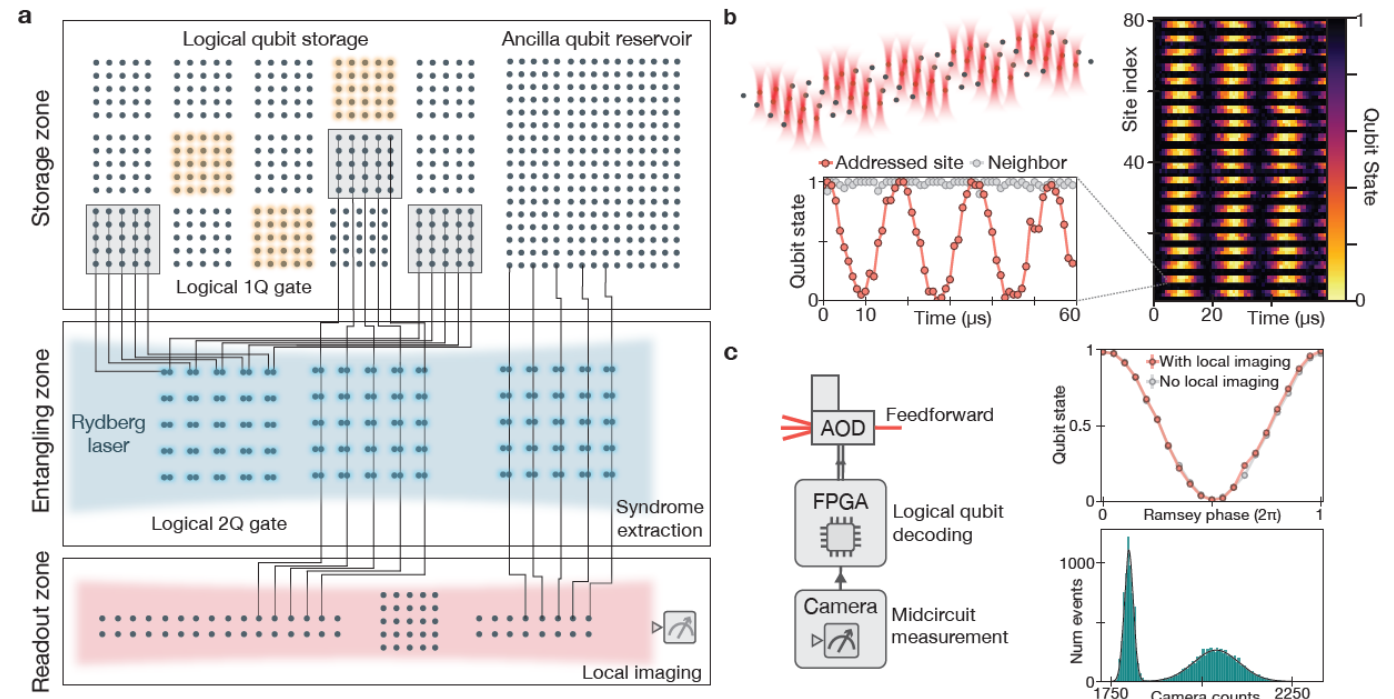
2023年12月

From Mikhail Lukin group @ Harvard/MIT with QuEra Computing



Here we report the realization of a programmable quantum processor based on encoded **logical qubits operating with up to 280 physical qubits**.

..., we realize computationally complex sampling circuits with up to **48 logical qubits** entangled with hypercube connectivity with 228 logical two-qubit gates and 48 logical CCZ gates. ...



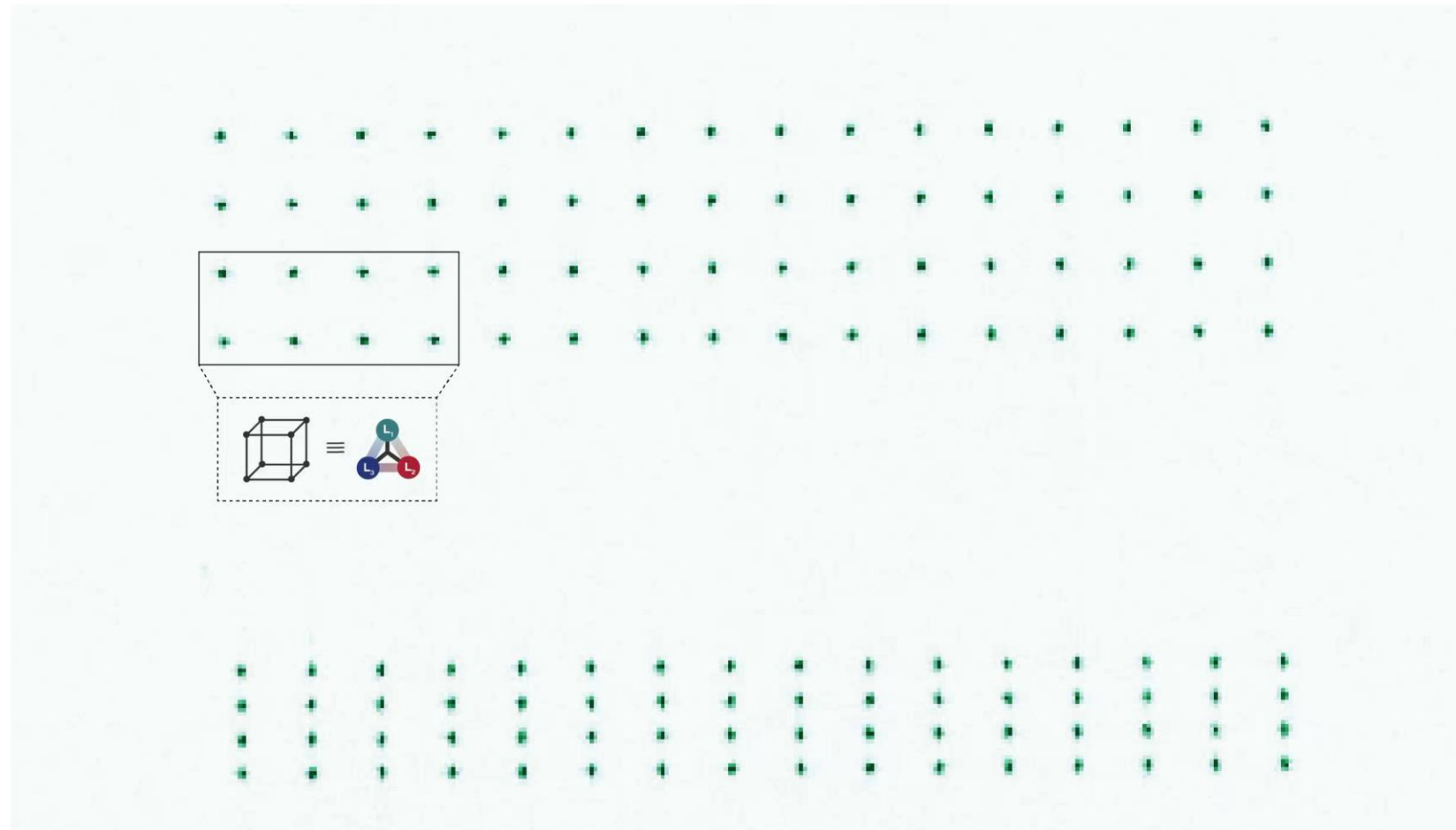
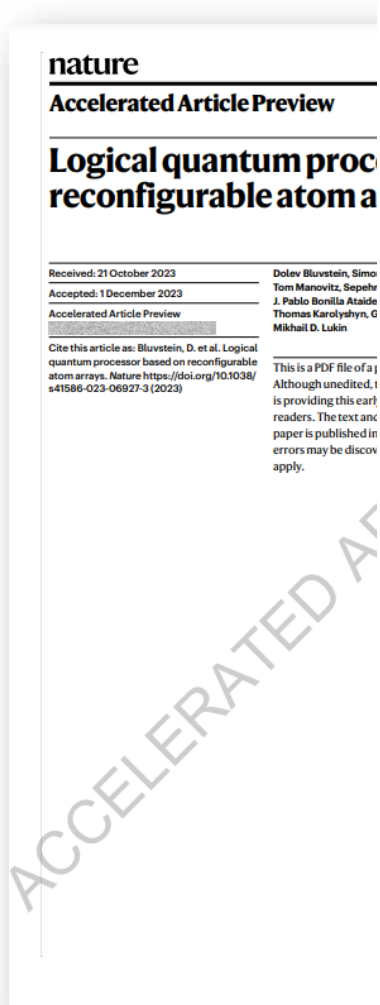
→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).

Breaking News!!! Logical quantum processor

43

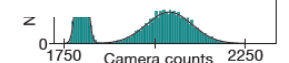
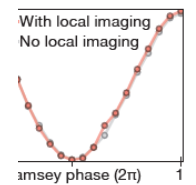
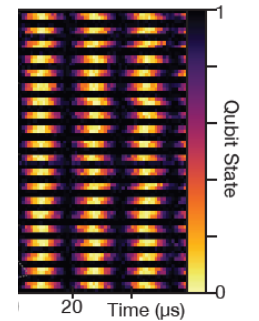
2023年12月

Supplementary video



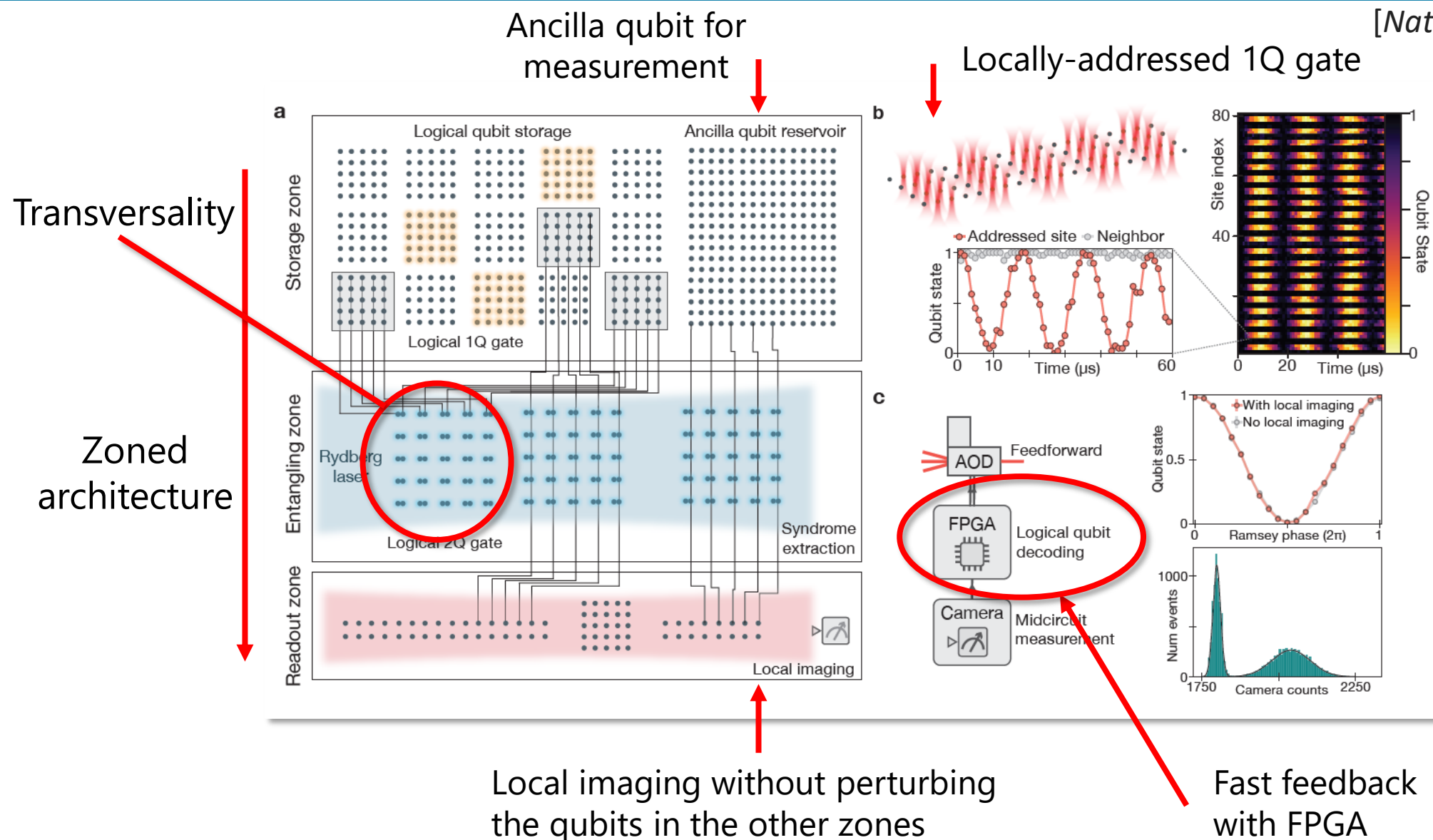
ed on

al qubits
d 48 logical

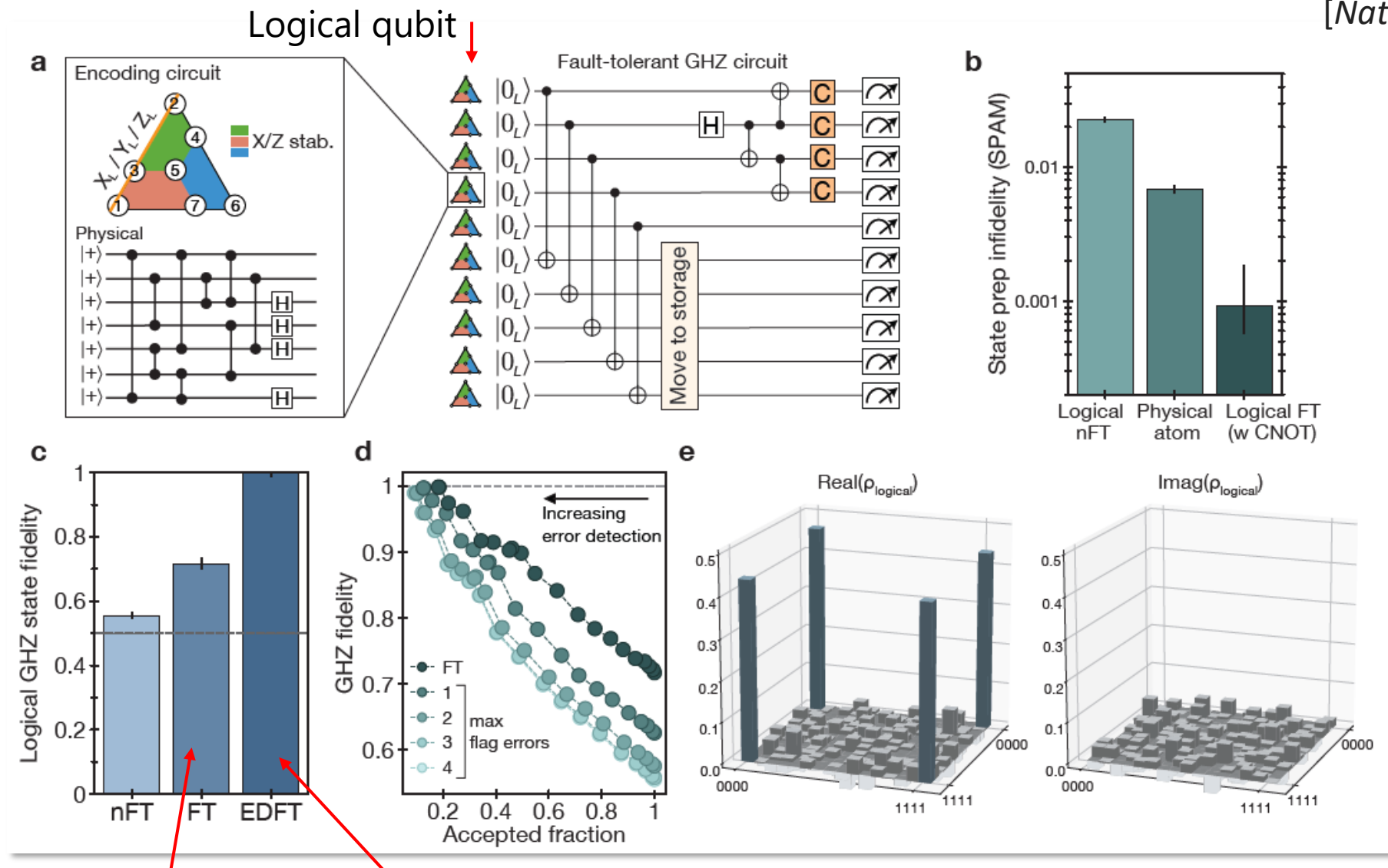


→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).

[Nature 626, 58 (2023)]

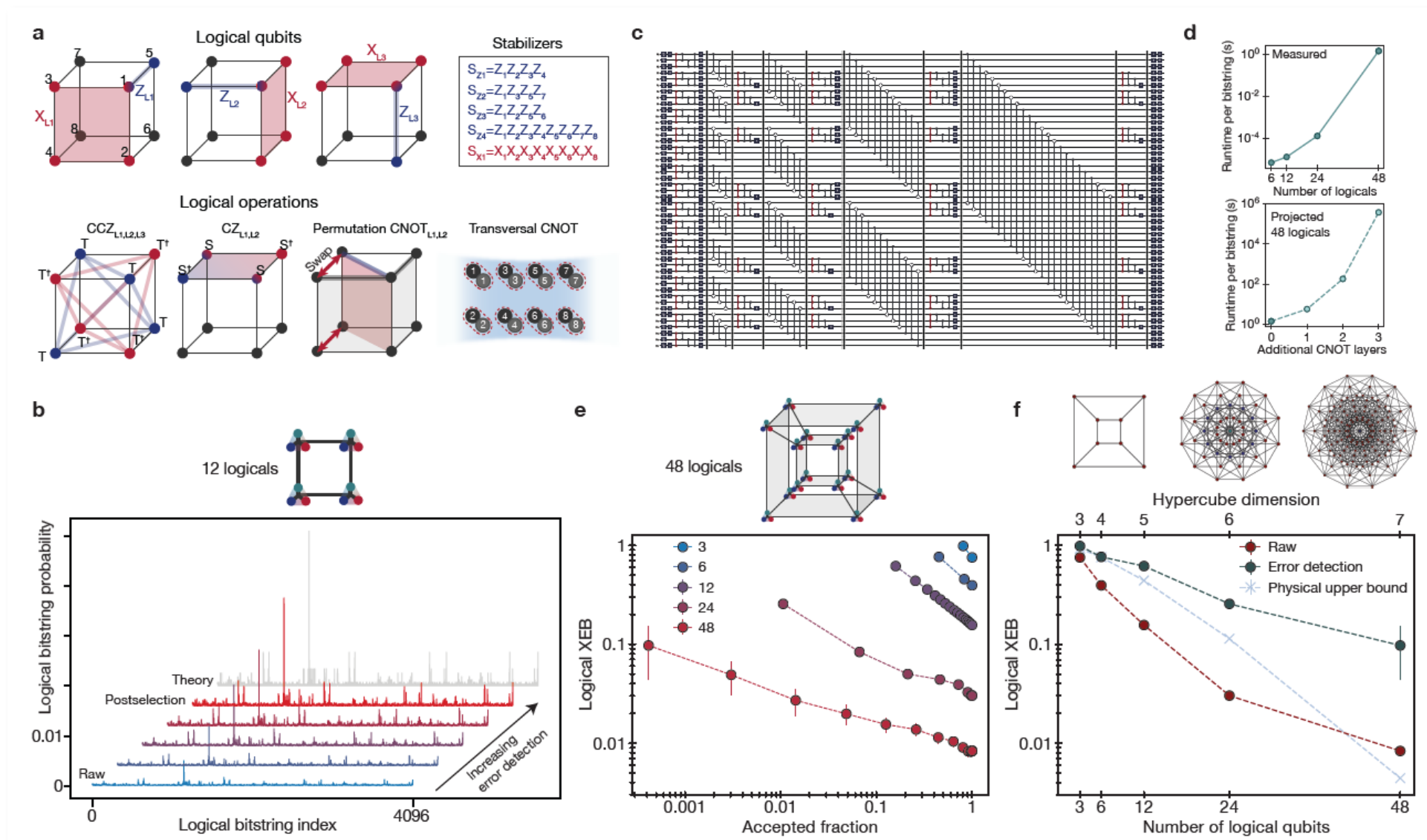


[Nature 626, 58 (2023)]



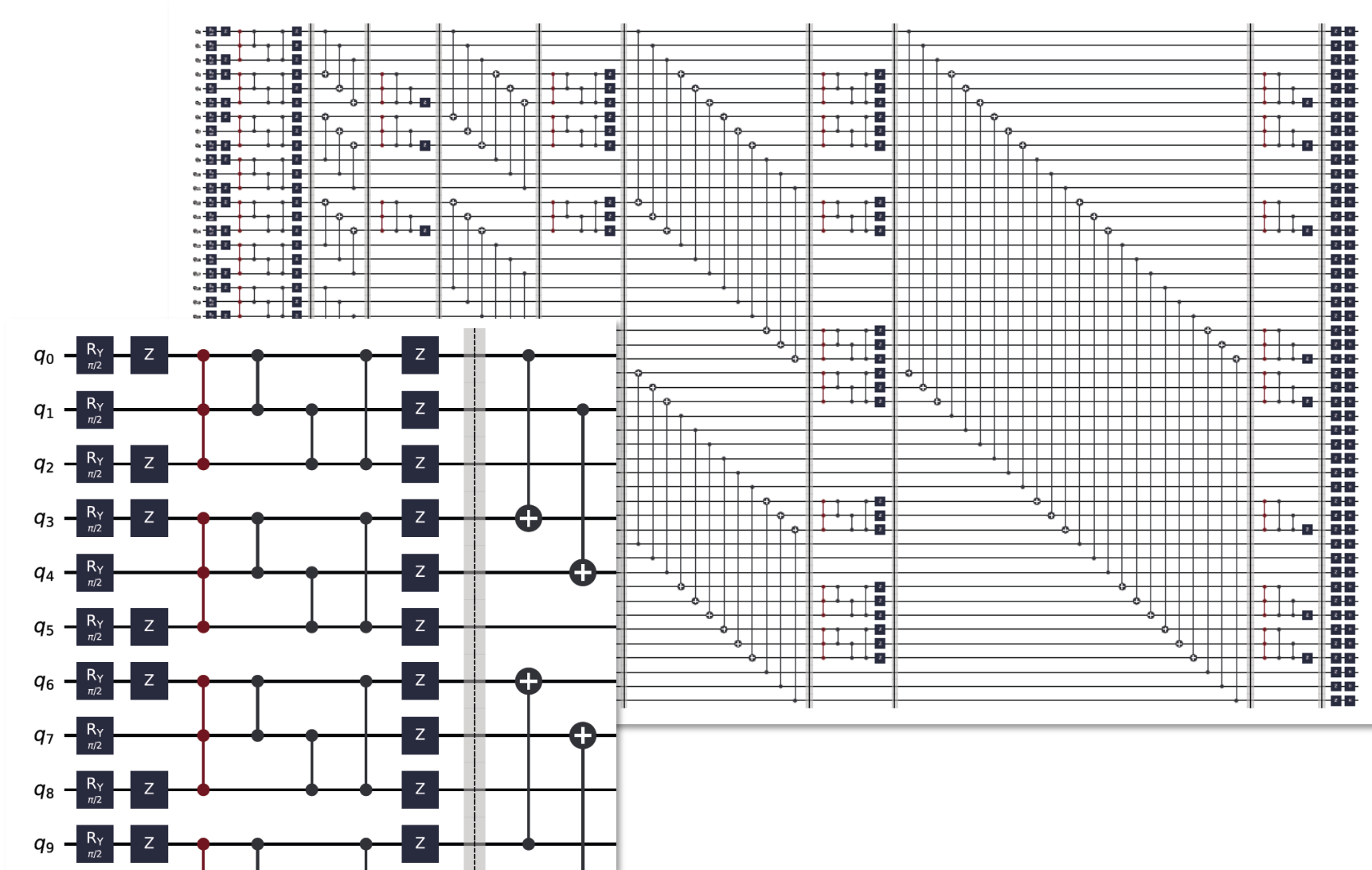
Postselecting on ancilla flags

Postselecting on ancilla flags+stabilizers



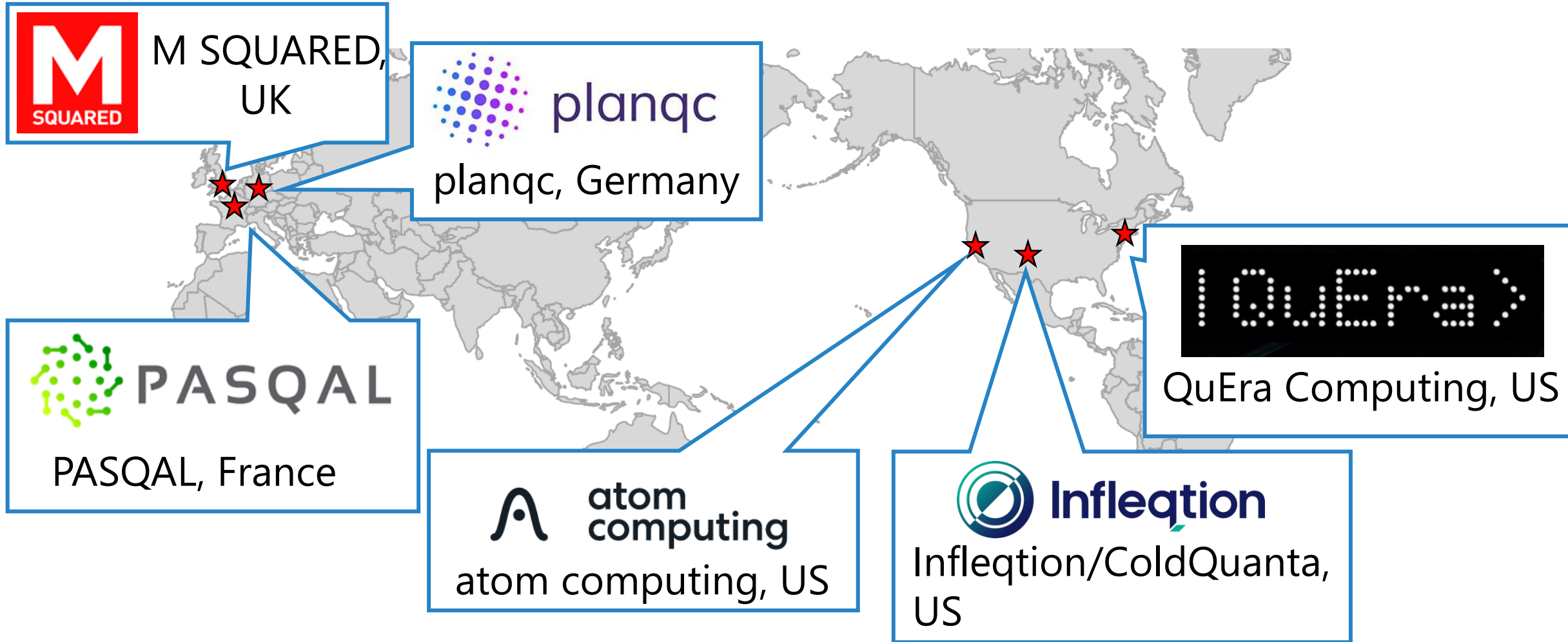
[Nature 626, 58 (2023)]

Logical qubit



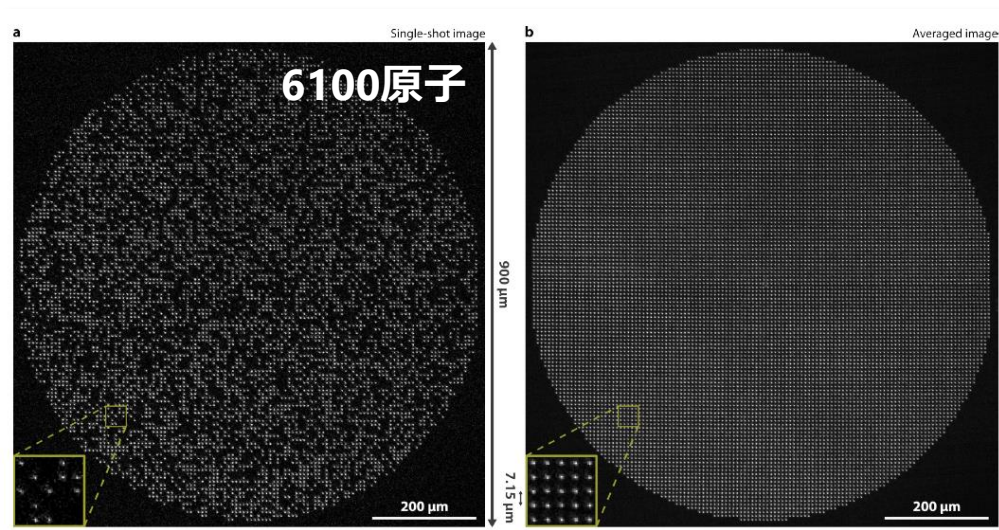
冷却原子型量子コンピュータ 開発企業

48



Advantage

- **Scalability:** マシンサイズを変えず1,000 ~ 10,000原子配列



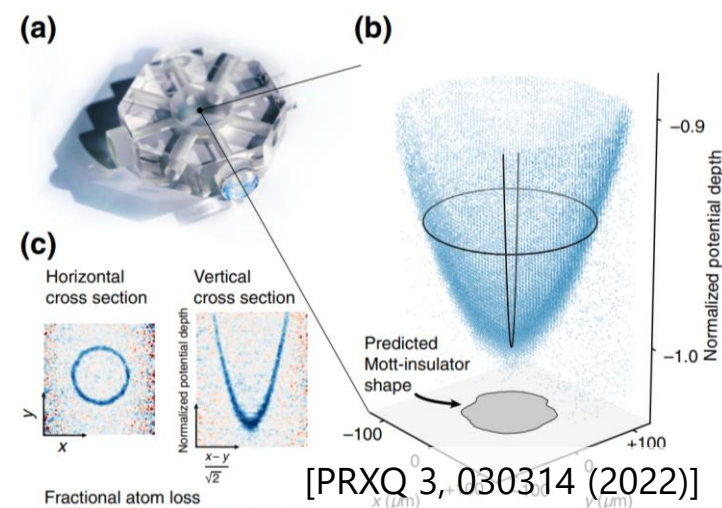
[Endres group, Caltech arXiv 2403.12021 (2024)]

展望 :

- 1M量子ビット? 1G量子ビット?
- 光格子 cavity-enhanced lattice
- Photonとの結合, モジュール化

Key development

- 高出力レーザー
- 光学系デザイン
- 配列アルゴリズム



Advantage

- **Scalability**: マシンサイズを変えず1,000 ~ 10,000量子ビット

展望: 1M量子ビット? 1G量子ビット?

→ 光格子 cavity-enhanced lattice

→ Photonとの結合, モジュラー化

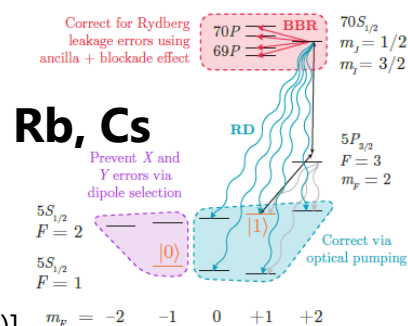
- **Connectivity**: 任意形状、原子輸送による全結合 = transversal gate

Long-range 2-qubit gate, Native CCZ gate

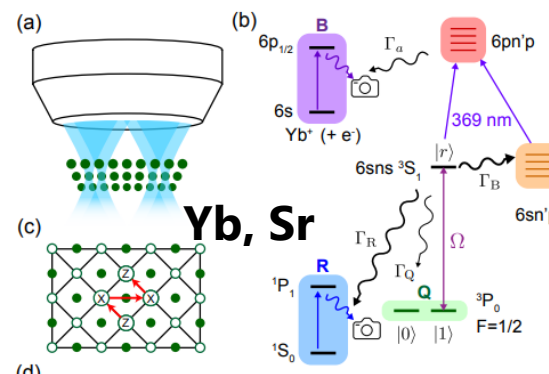
展望: 冷却原子系に特化したアルゴリズム・アーキテクチャ

Key development

- 高出力レーザー
- 光学系デザイン
- 配列アルゴリズム
- 移動速度・時間
- 輸送最適化
- アルゴリズム開発



[PRX **12**, 021049 (2022)]



[Nat. Commun. **13**, 4657 (2022)]

Advantage

- **Scalability:** マシンサイズを変えず1,000 ~ 10,000量子ビット

展望 : 1M量子ビット? 1G量子ビット?

→ 光格子 cavity-enhanced lattice

→ Photonとの結合, モジュラー化

- **Connectivity:** 任意形状、原子輸送による全結合 = transversal gate

Long-range 2-qubit gate, Native CCZ gate

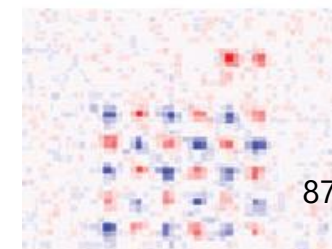
展望 : 冷却原子系に特化したアルゴリズム・アーキテクチャ

- **High degree of freedom in atoms:** 軌道・電子/核スピン・運動自由度
多様なエネルギー準位, 原子種 (1電子原子Rb, Cs, K, ... / 2電子原子 Yb, Sr)

展望 : 異種(同位体)原子混合系によるreadout/誤り訂正

Key development

- 高出力レーザー
- 光学系デザイン
- 配列アルゴリズム
- 移動速度・時間
- 輸送最適化
- アルゴリズム開発



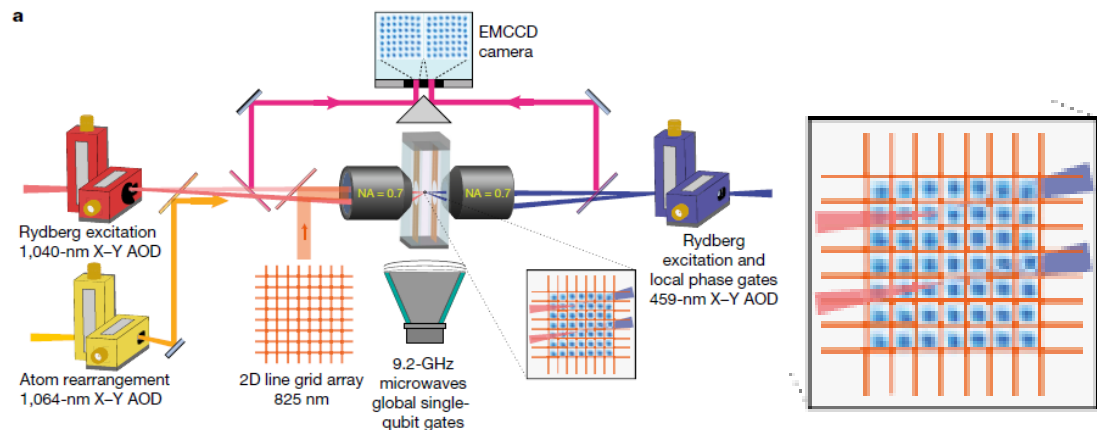
^{87}Rb & ^{85}Rb

Wuhan, Zhan group,
[PRL 128, 083202 (2022)]

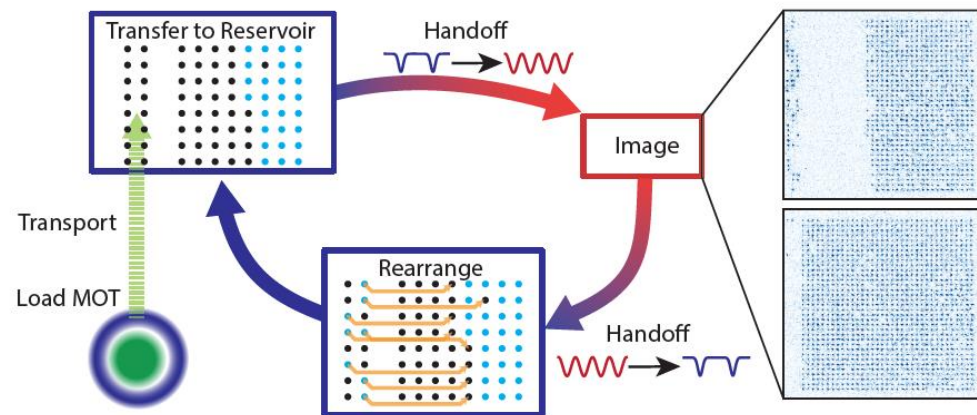
Disadvantage

- Slow clock speed:

- ゲート : 1 ~ sub μ s → 超高速ゲート操作 : \sim ns 分子研
- 測定 : 1 ~ sub ms → Cavity QED?
- 原子輸送 : 1 ~ sub ms → 原子輸送と局所操作の組み合わせ
- 初期準備 : \sim 10 ms (原子冷却) → 連続的に原子を供給

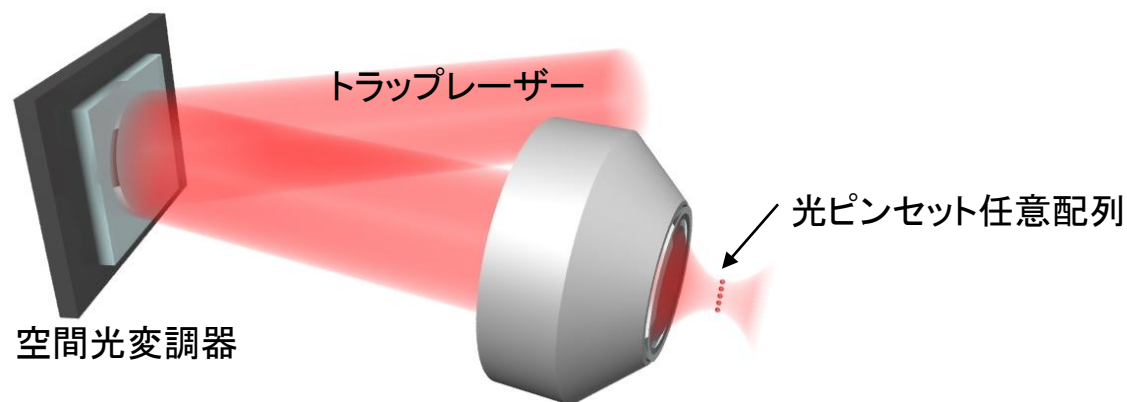


[Saffman group, Nature **604**, 457 (2022)]



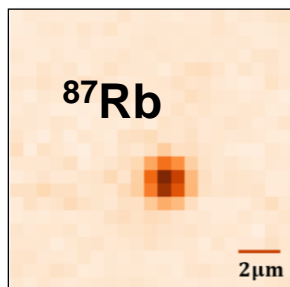
[Atom Computing, Inc., arXiv 2401.16177(2024)]

2019年～：光ピンセット配列型冷却原子系を開発



2019.11

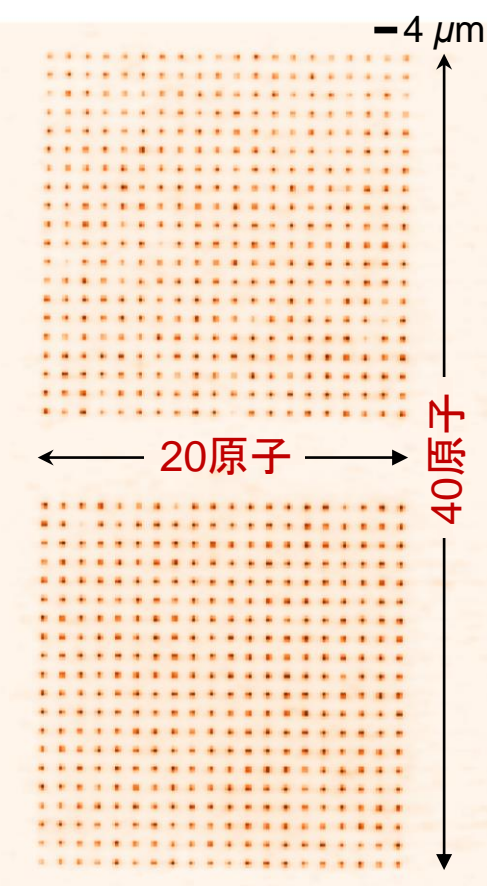
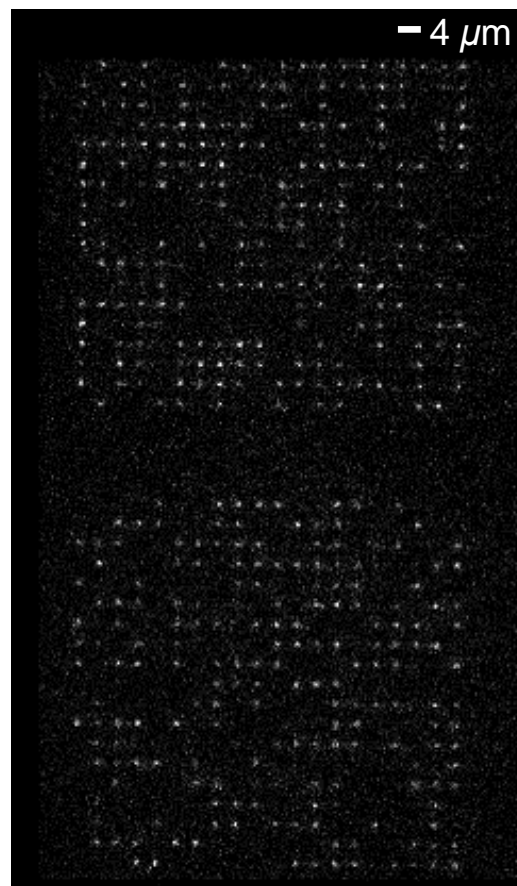
Single atom



2019年～：光ピンセット配列型冷却原子系を開発

800サイト400原子量子ビット

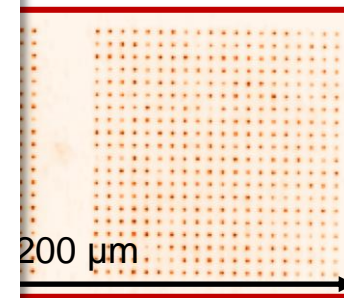
原子蛍光(リアルタイム) 原子蛍光(平均画像)



任意配列

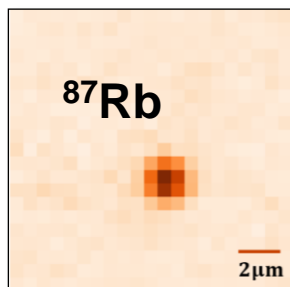
01 (平均画像)

100 atoms

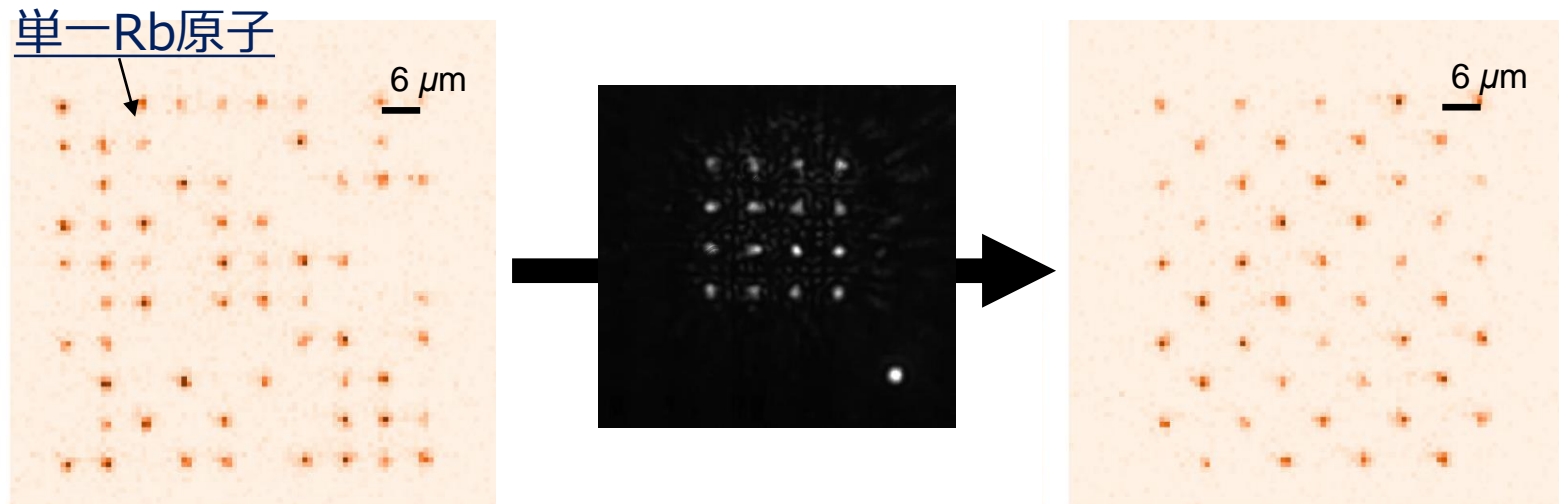


2019.11

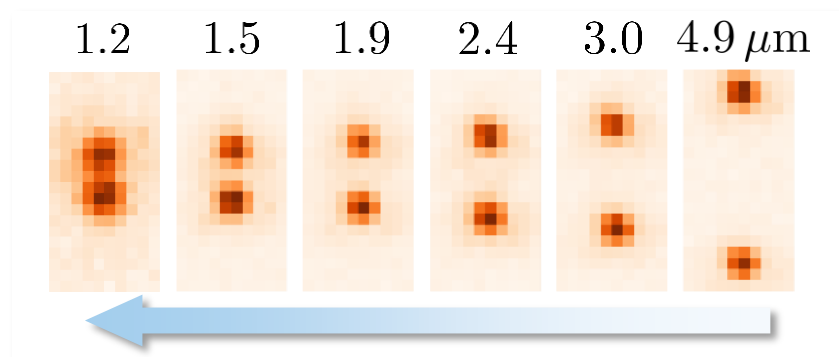
Single atom



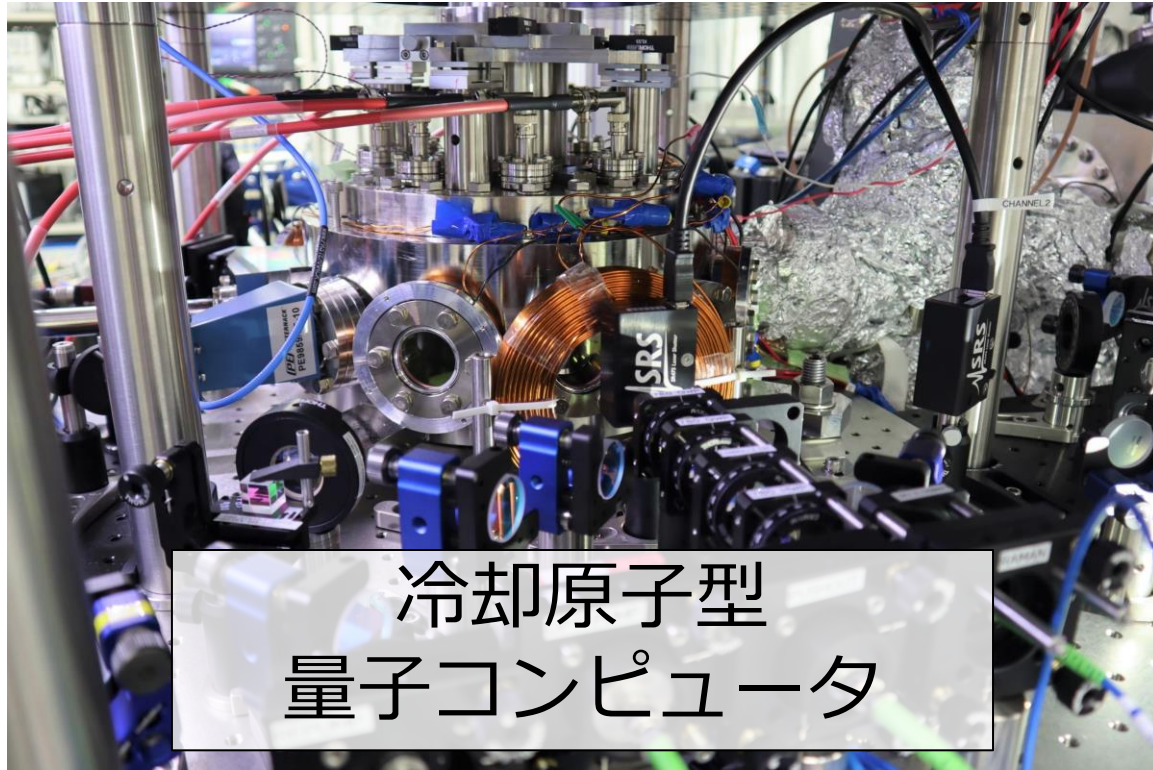
➤ 動的な光ピンセットによる50原子の再配列



➤ 世界最小間隔原子ペア配列の生成



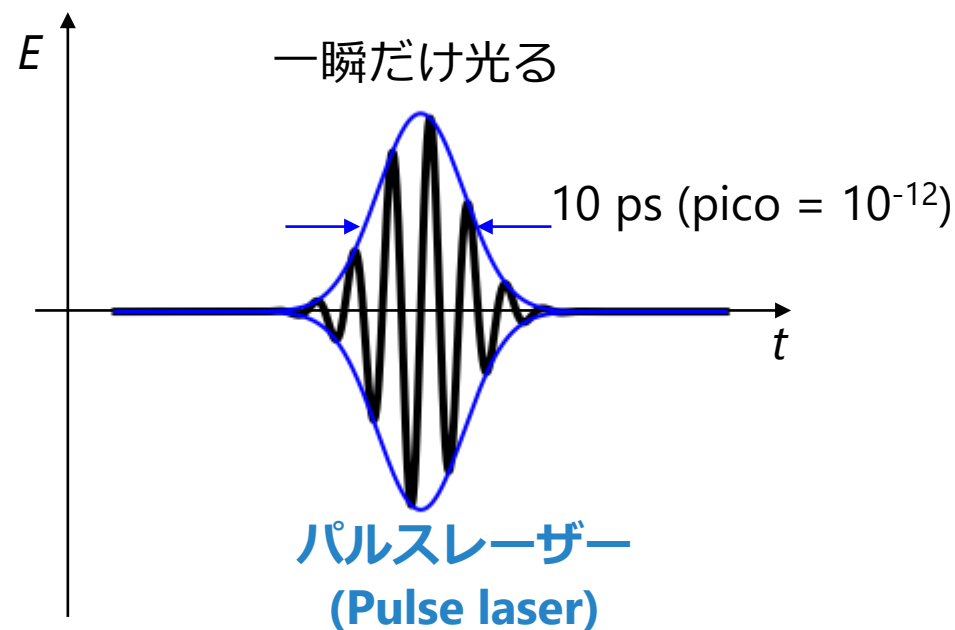
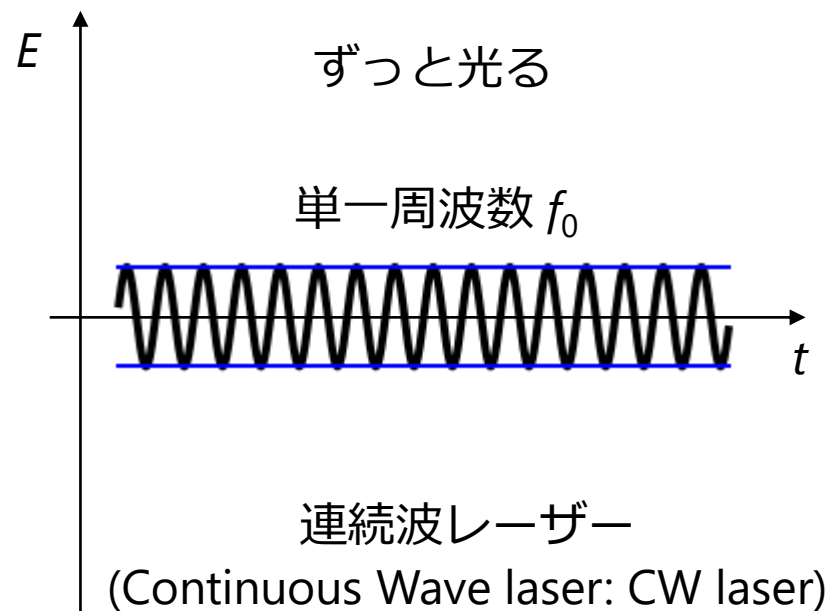
短距離
↓
相互作用大 = 高速



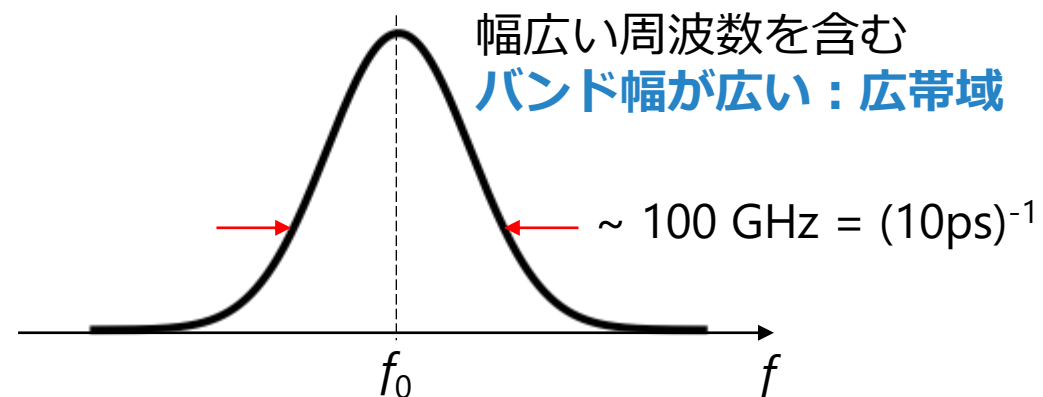
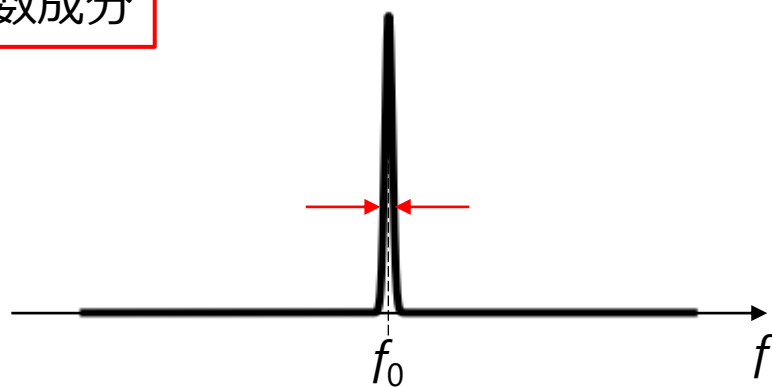
Ultrafast Rydberg physics!

分子科学研究所での研究 – 概要 –

◆ 連続波レーザーとパルスレーザー

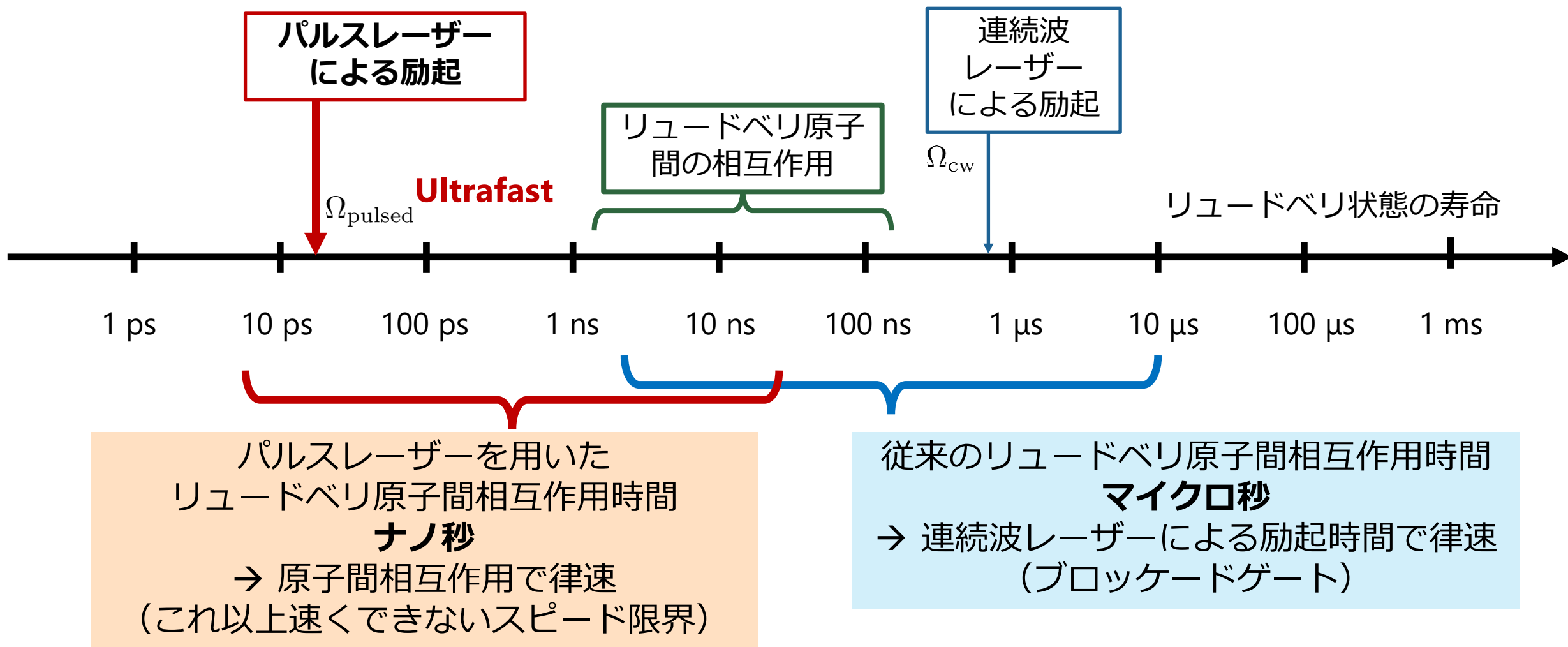


周波数成分



なぜパルスレーザー？

58

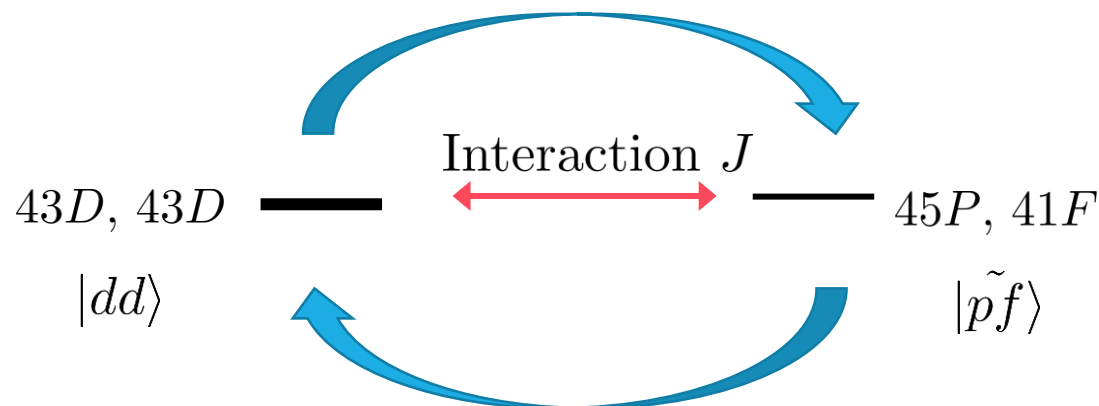
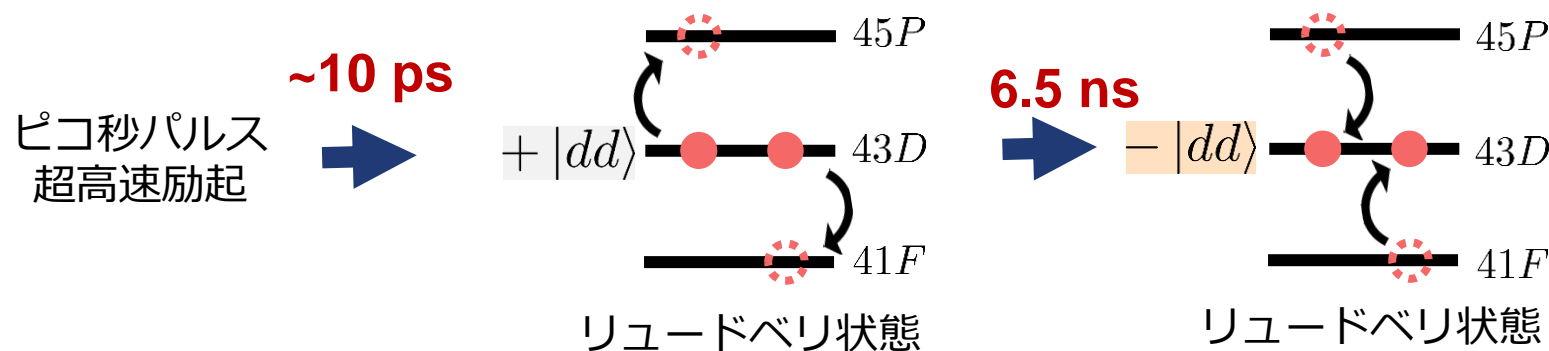


+ リュードベリ状態にいる間に生じるノイズ (緩和過程・電磁場ノイズ) から解放

ナノ秒スケールの超高速相互作用

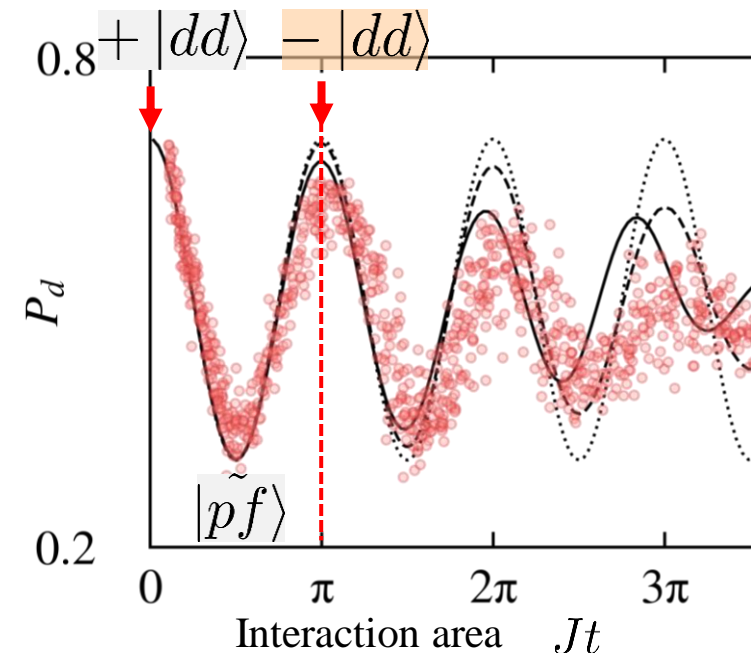
59

[Ohmori group, Y. Chew et al., Nature Photonics **16**, 724 (2022)]



$$|\Psi(t)\rangle = \cos(Jt) |dd\rangle - i \sin(Jt) |\tilde{p}f\rangle \quad \text{Förster振動}$$

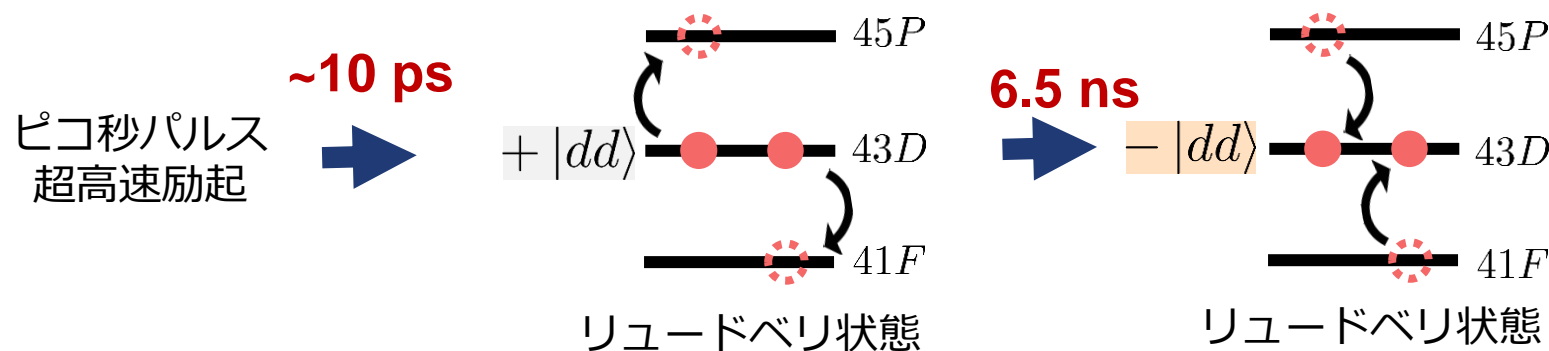
$$|\Psi(Jt = 0)\rangle = |dd\rangle \implies |\Psi(Jt = \pi)\rangle = \cos \pi |dd\rangle - i \sin \pi |\tilde{p}f\rangle = -|dd\rangle$$



ナノ秒スケールの超高速相互作用

60

[Ohmori group, Y. Chew et al., Nature Photonics **16**, 724 (2022)]



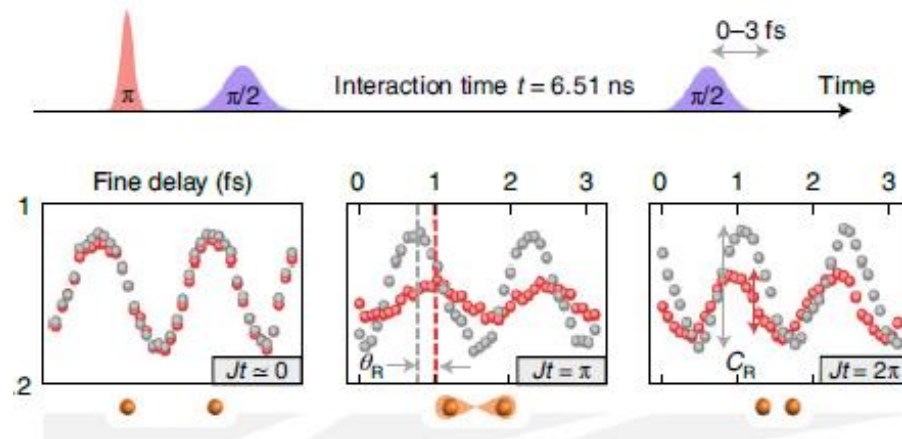
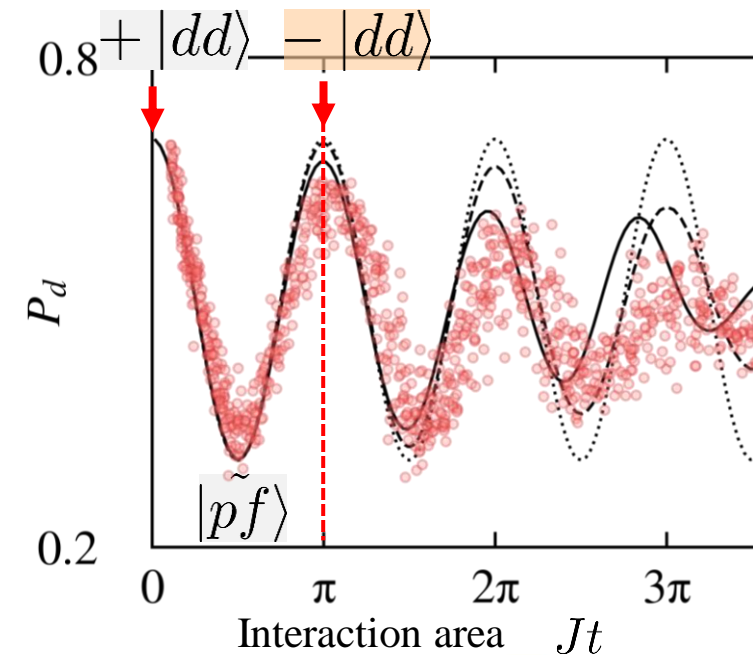
$$(|g\rangle + |d\rangle) \otimes (|g\rangle + |d\rangle) = |gg\rangle + |dg\rangle + |gd\rangle + |dd\rangle$$

$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle &\rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle &\rightarrow |10\rangle \\ |11\rangle &\rightarrow -|11\rangle \end{aligned}$$

$$\rightarrow |gg\rangle + |dg\rangle + |gd\rangle - |dd\rangle$$

CZゲート!

これまでの冷却原子型CZゲートより2桁高速
→ リユードベリ状態滞在時間短縮,
エラー低減の新しい方向性



ムーンショット目標6：誤り耐性型汎用量子コンピュータ

61



ムーンショット目標6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

プログラムディレクター (PD) 北川 勝浩
大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授



目標6 研究開発プロジェクト

大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ




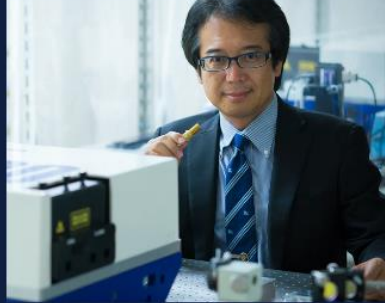




プロジェクトマネージャー (PM) 大森 賢治
自然科学研究機構 分子科学研究所 教授／研究主幹

 プロジェクト・サイト [🔗](#)

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/69_ohmori.html

大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ

 <p>自然科学研究機構 分子科学研究所 教授／研究主幹</p> <p>大森 賢治</p> <p>大規模冷却原子型量子コンピュータプラットフォームの開発および統合</p>	 <p>自然科学研究機構 分子科学研究所 助教</p> <p>Sylvain de Léséleuc</p> <p>Novel techniques and tools for high-fidelity operation of a cold-atom based, fault-tolerant, quantum computer</p>	 <p>自然科学研究機構 分子科学研究所 助教</p> <p>富田 隆文</p> <p>高忠実度ゲート操作および誤り訂正のための光による量子制御技術の開発</p>	 <p>理化学研究所 放射光科学研究センター / 分子科学研究所 グループディレクタ／特任教授</p> <p>平等 拓範</p> <p>高安定・高強度小型集積レーザーシステムの研究開発</p>
 <p>京都大学 大学院理学研究科 教授</p> <p>高橋 義朗</p> <p>イッテルビウム原子アレー型誤り耐性量子コンピュータ開発</p>	 <p>理化学研究所 量子コンピュータ研究センター チームリーダー</p> <p>福原 武</p> <p>ストロンチウム原子アレーを用いた量子ビットの開発</p>	 <p>株式会社日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ リーダー主任研究員</p> <p>吉村 地尋</p> <p>アレー型量子コンピュータのオペレーティングシステム</p>	 <p>Infleqion (ColdQuanta) Vice President for Quantum Computing</p> <p>Thomas Noel</p> <p>パッケージ化された大規模原子アレー用小型光学系の開発</p>

学生・研究者募集！

大森賢治グループ@ 分子科学研究所



- ソフトウェア・電気回路・システムアーキテクチャ・メカニクス・光学...
- ポスドク・学生・技術者・サポートメンバー...



QEdプロジェクト 第5回光格子量子シミュレーション 実験室ツアー@分子科学研究所

授業動画@youtube

量子技術教育プログラム（QEdプロジェクト）

【News!】さらなる発展に向けて...

→ **スタートアップ企業設立**に向けて活動中

富田まで... **Contact : tomita@ims.ac.jp**

冷却原子型量子コンピュータ

- 近年のいくつかのブレークスルーにより急速に発展をとげている
- **2次元**原子配列 ~ **数10~数100量子ビット**（さらに拡大）
- **長いコヒーレンス時間**
- **リュードベリ状態+動的光ピンセット**による量子ビットの輸送 ⇒ **全結合可能**
- 材料はそろいつつある → 統合し始めている

分子科学研究所

- **冷却原子型量子コンピュータ開発中**
- パルスレーザーによる**超高速ゲート操作**

メッセージ：

- これからやるべきことはたくさんある
- 基礎研究（実験/理論）+ エンジニアリング 両方
- 人材・環境・エコシステムの構築