

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

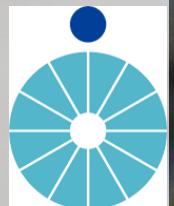
富田 隆文



科学技術振興機構



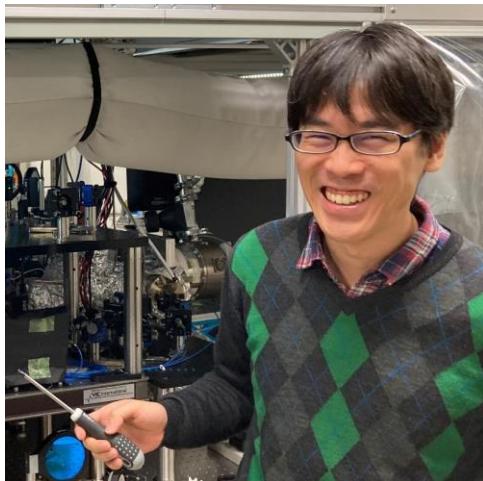
ここから、新・未来へ



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

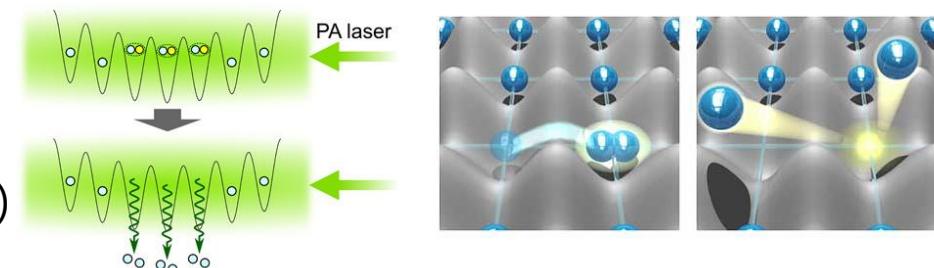


分子科学研究所 助教
(大森賢治グループ)

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**

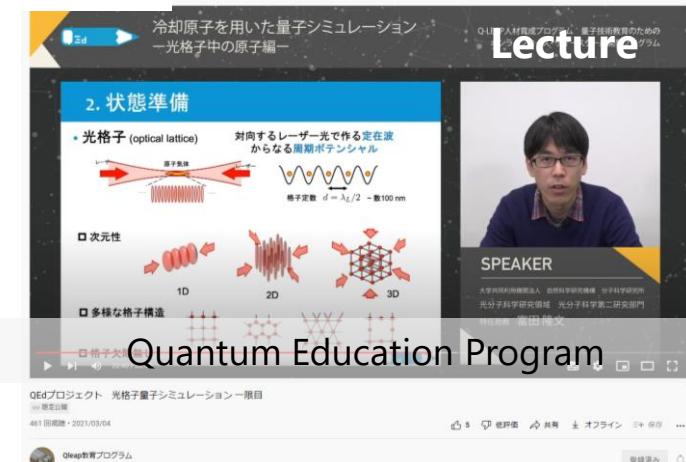
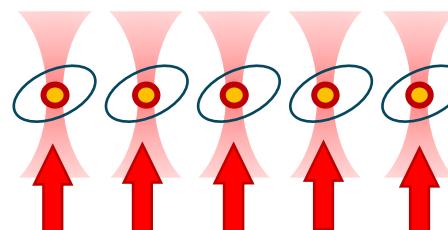
実験

➤ 2014 – 2019 京大 理物 修士・博士 高橋義郎 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



Scan the QR code to discover more Aichi



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

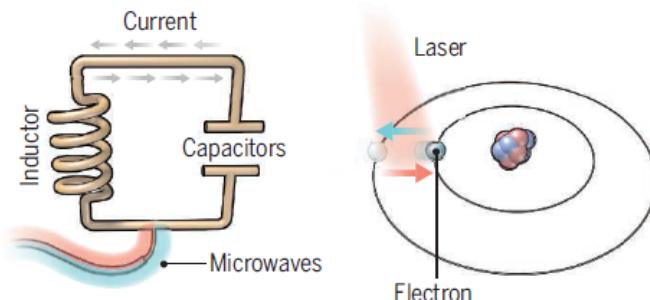
QUEST FOR QUBITS

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

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

A bit of the action

In the race to build a quantum computer, companies are pursuing many types of quantum bits, or qubits, each with its own strengths and weaknesses.



Superconducting loops

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

Longevity (seconds)
0.00005

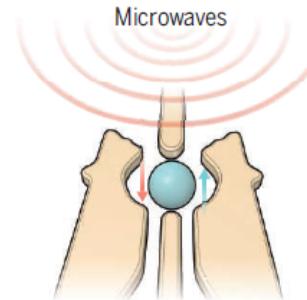
Logic success rate
99.4%

Number entangled

9

Company support

Google, IBM, Quantum Circuits



Trapped ions

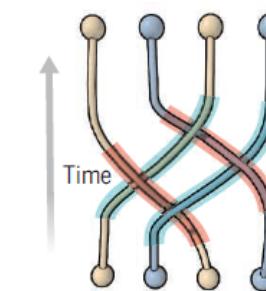
Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and put them in superposition states.

>1000

99.9%

14

ionQ



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.

0.03

~99%

2

Intel

Topological qubits

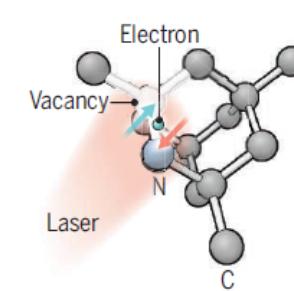
Quasiparticles can be seen in the behavior of electrons channeled through semiconductor structures. Their braided paths can encode quantum information.

N/A

N/A

N/A

Microsoft,
Bell Labs



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.

10

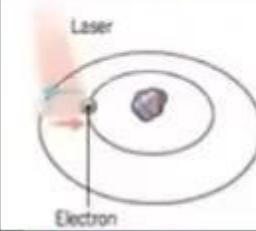
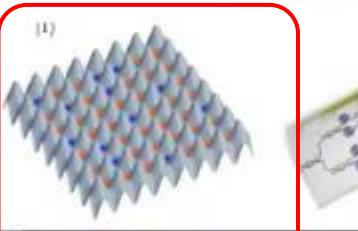
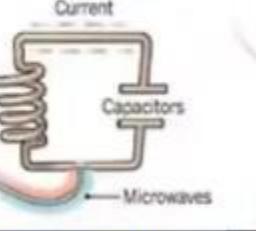
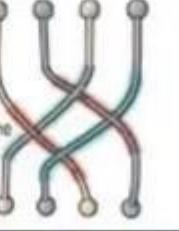
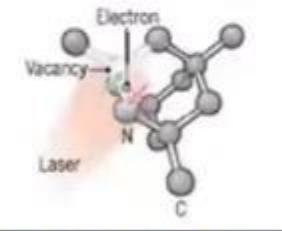
99.2%

6

Quantum Diamond
Technologies

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

Quantum Computer Technologies

Natural Qubits		Synthetic Qubits		Others	
					
Trapped Ions A laser beam traps an ion in a region of high electric field. A microwave signal is used to excite the ion's quantum state.	Neutral Atoms Neutral atoms, like ions, store qubits within electronic states. Laser activates the electrons to create interaction between 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.	Photronics 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.	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.
2016年	光	0.00005	0.03	N/A	10
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	Google, IBM, QCL, Rigetti	HRL, Intel, SQC	Microsoft	Quantum Diamond Technologies
Pros Very stable. Highest achieved gate fidelities.	Many qubits, 2D and maybe 3D.	Linear optical gates, integrated 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 computer capacity.



Christopher M...

Source: Science, Dec. 2016

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

量子コンピュータハードウェア - 2023年 -

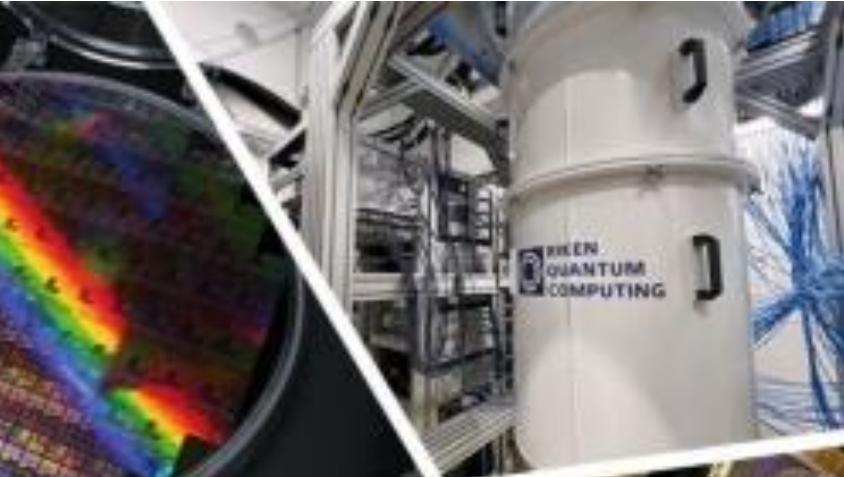
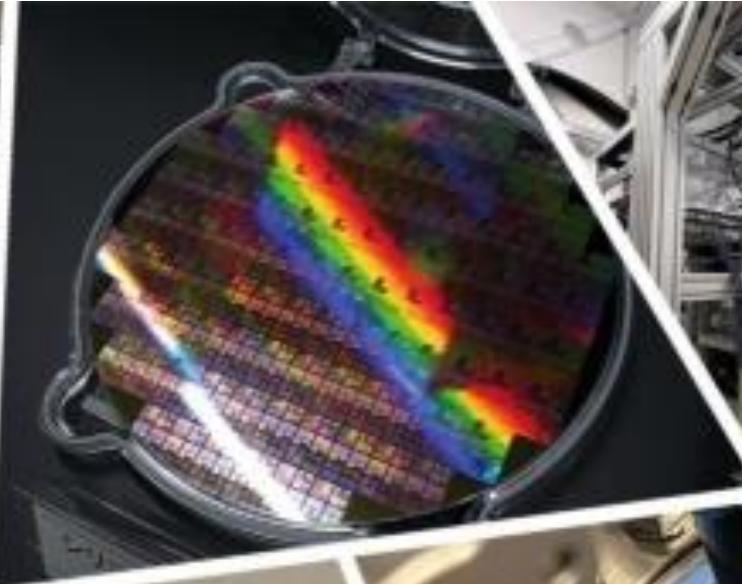
6

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)

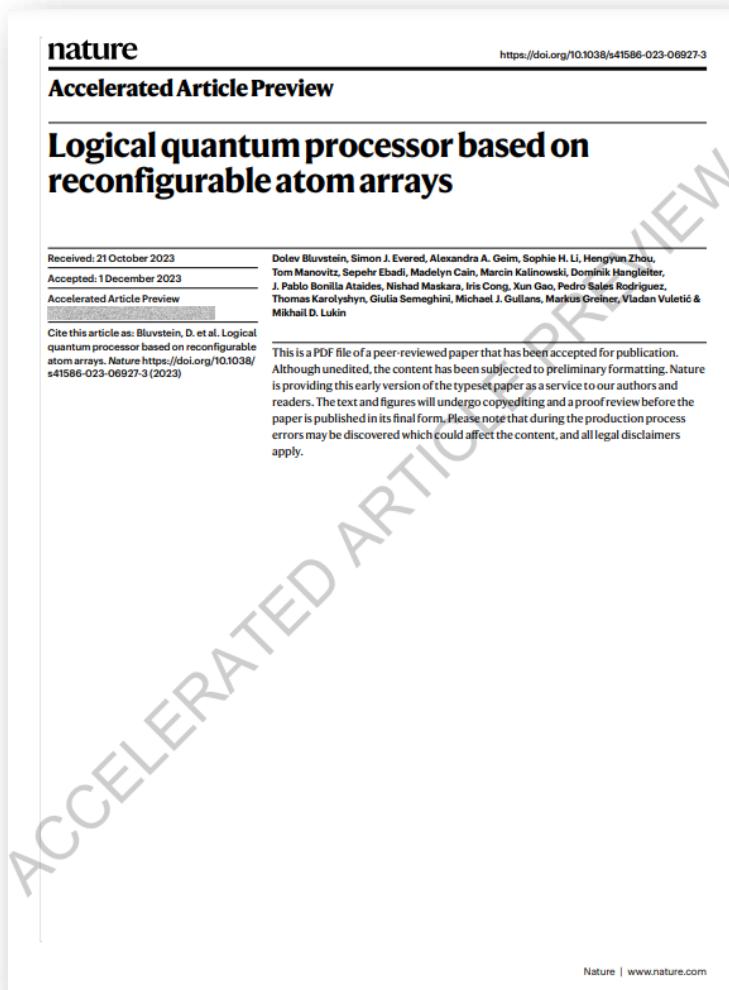


イオントラップ

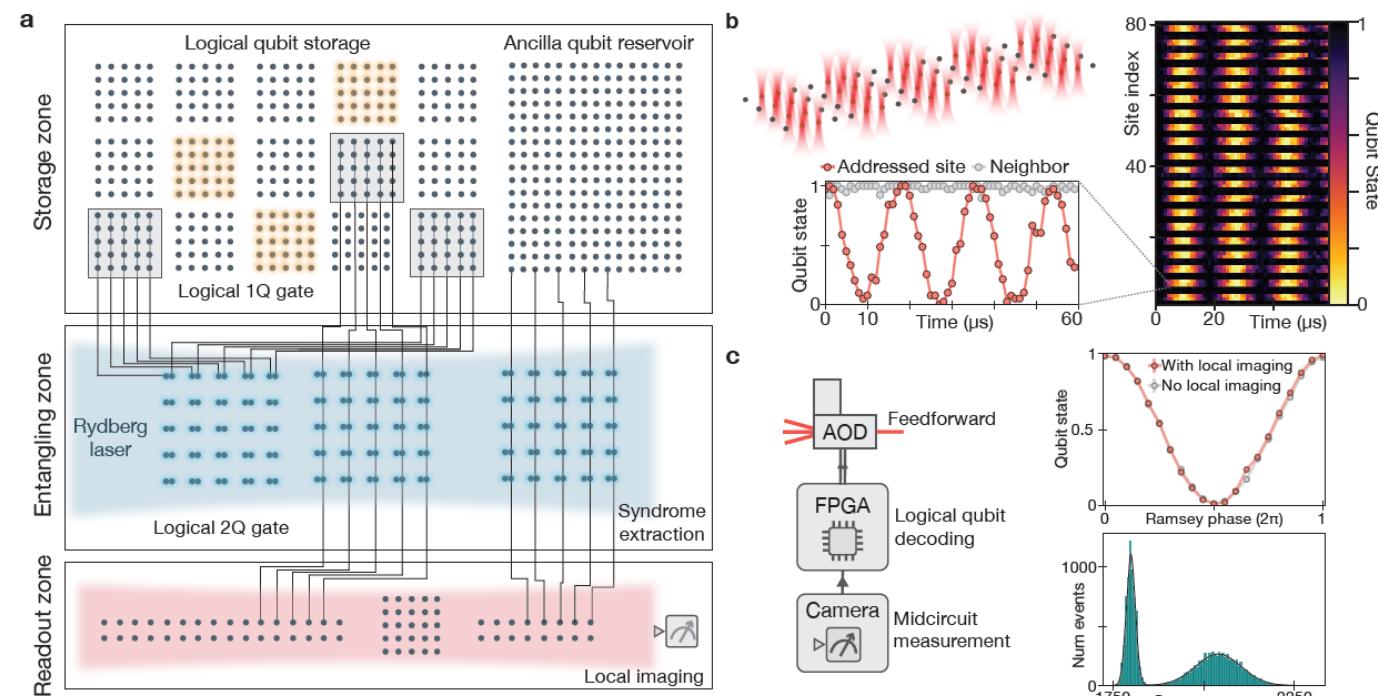
Breaking News!!! Logical quantum processor

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. ...

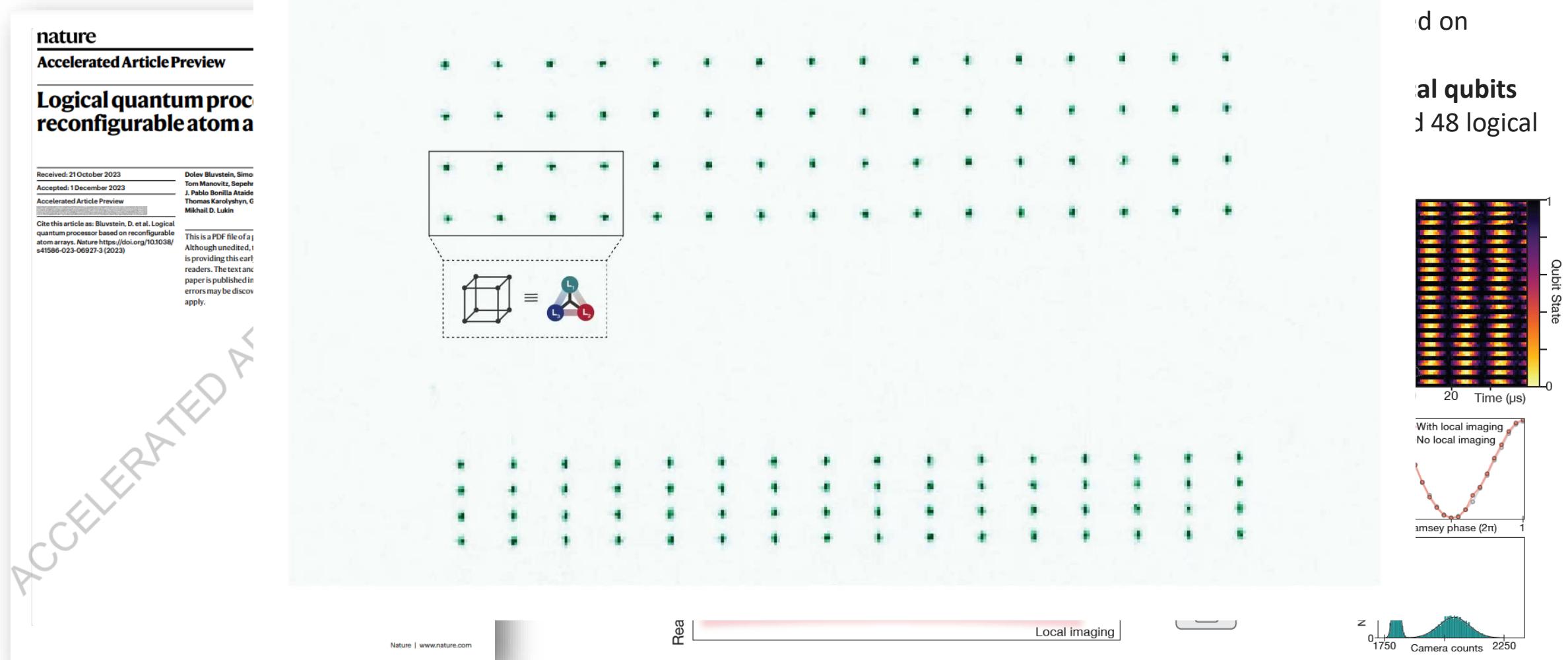


→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).

Breaking News!!! Logical quantum processor

2023年12月

Supplementary video



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

おそらく皆さん気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

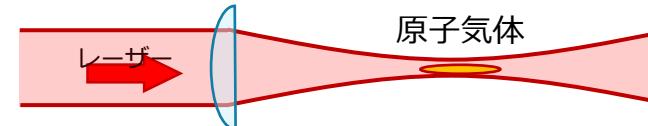
冷却原子とは？

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气体

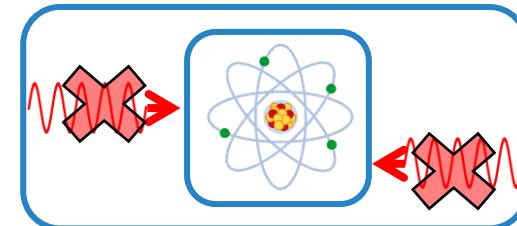
$\sim \mu\text{K} \sim \text{nK}$
※希釈冷凍機なし

◆ 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

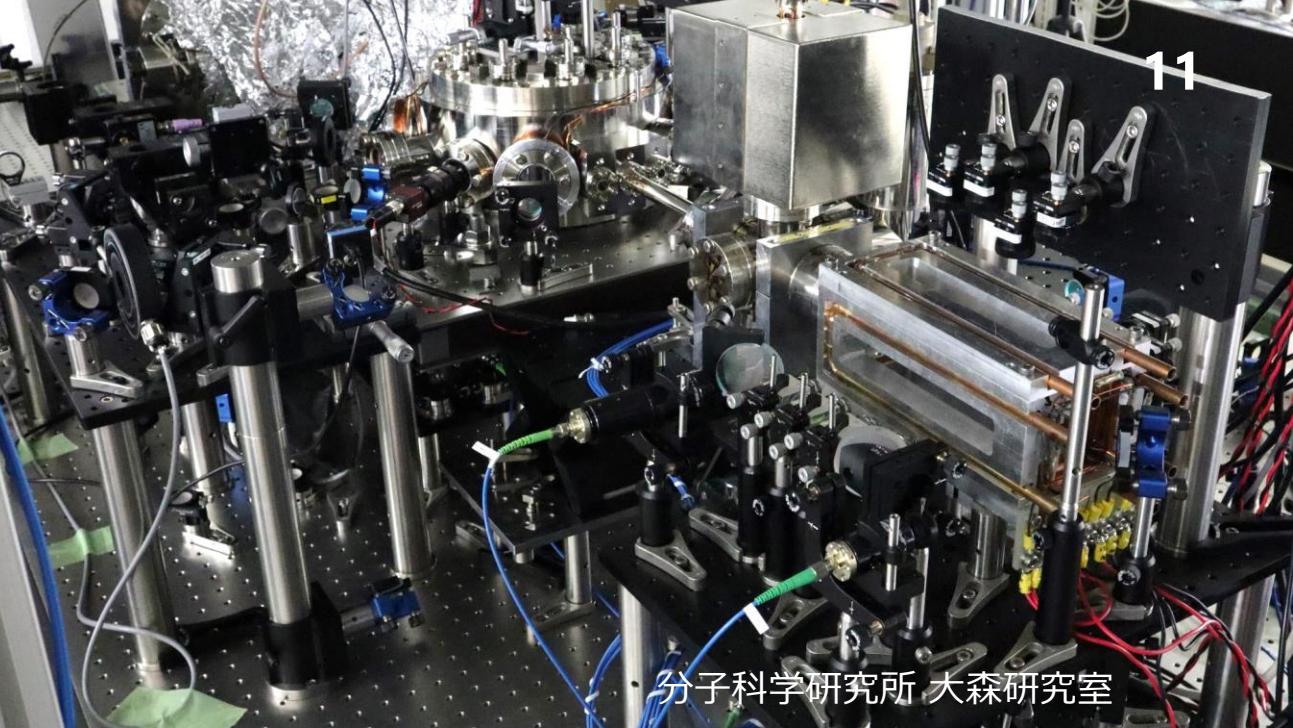
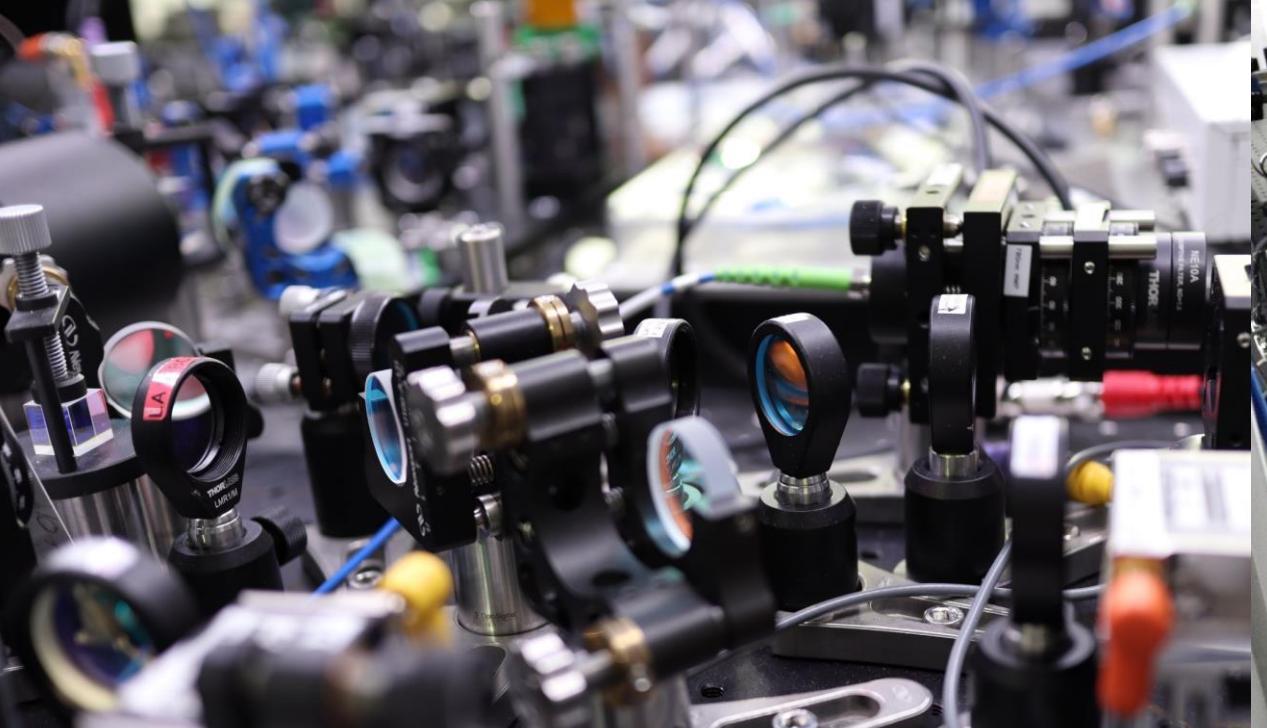


➤ 均質：原子はすべて同じ

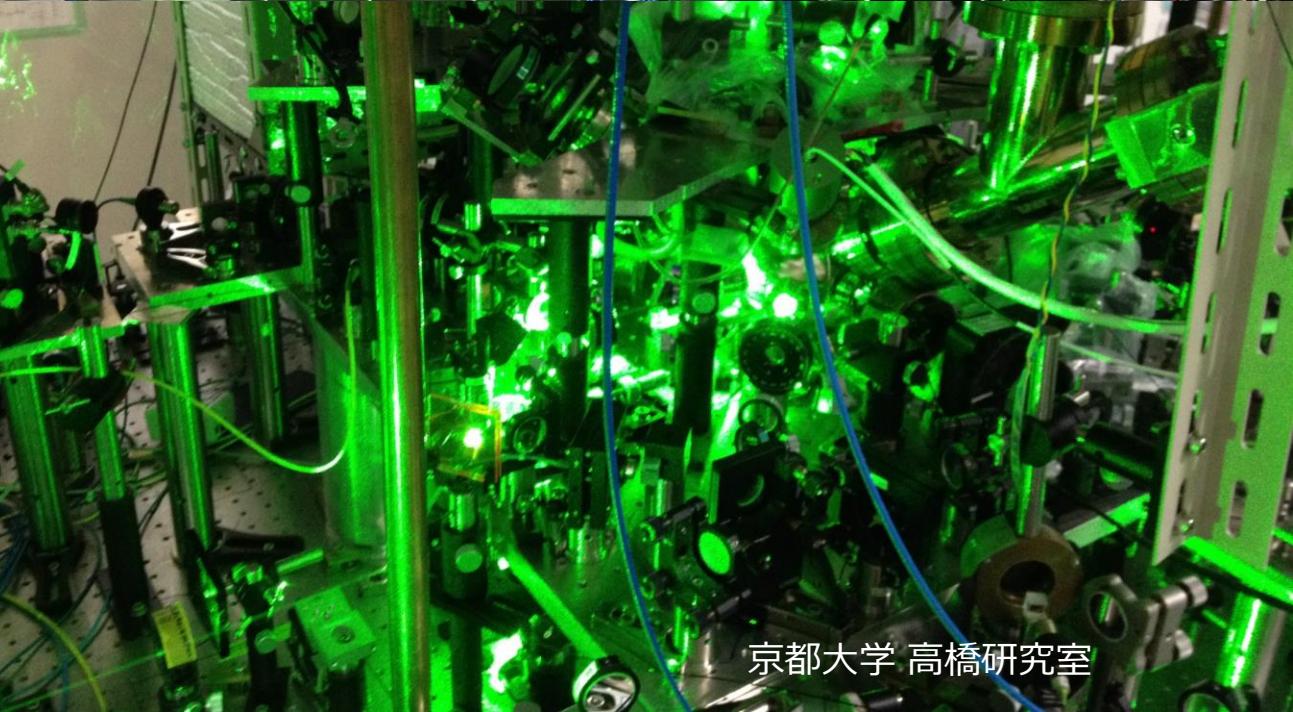
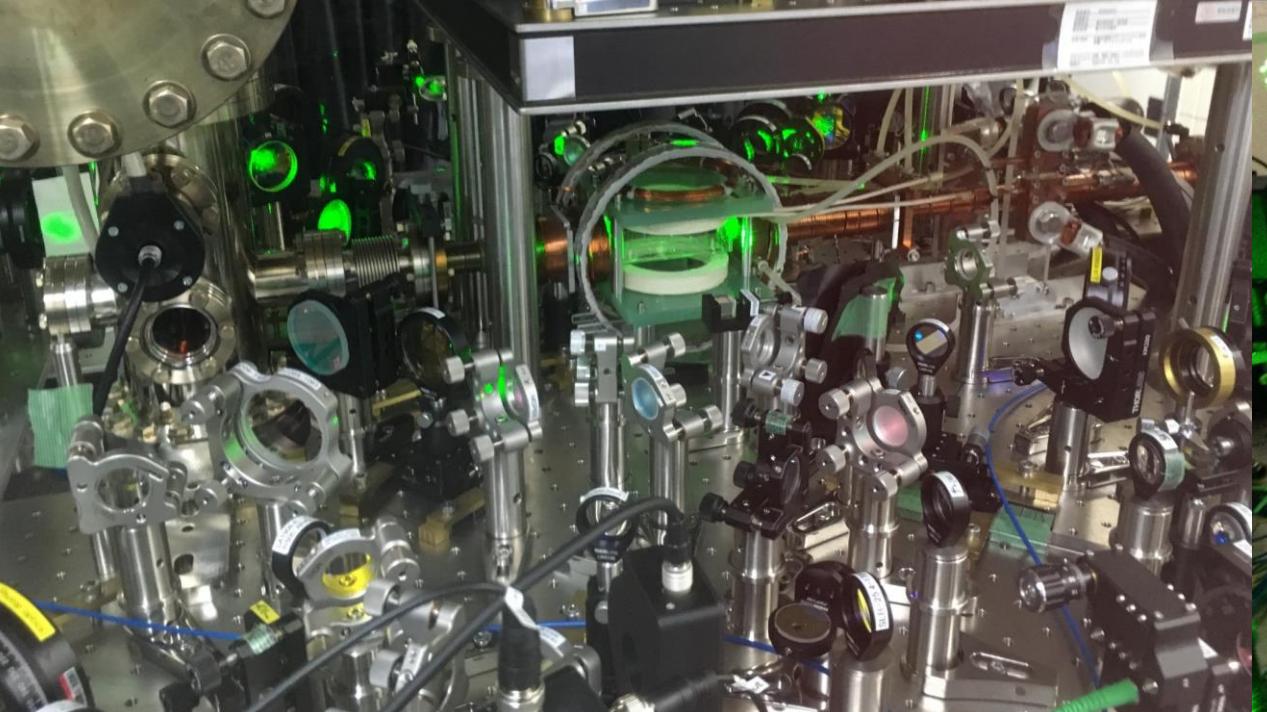


$$\begin{array}{c} |e\rangle \\ \hline |g\rangle \end{array}$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|g\rangle + |e\rangle)$$

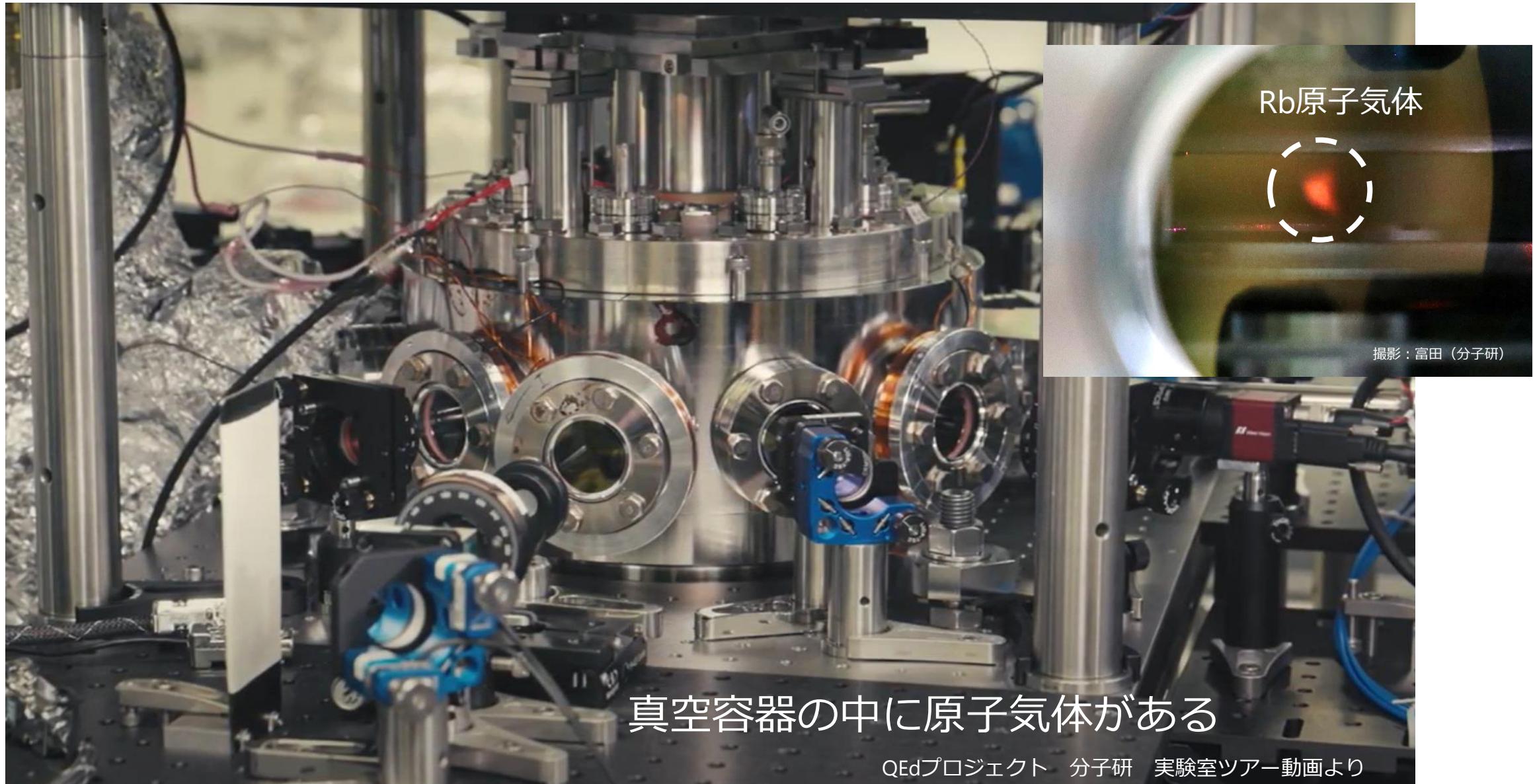


分子科学研究所 大森研究室



京都大学 高橋研究室

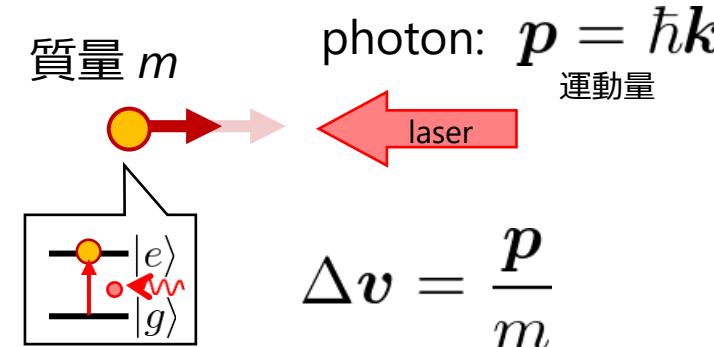
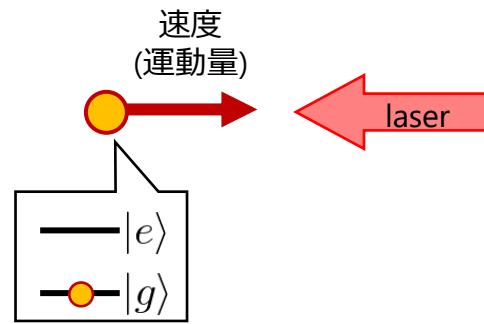
原子の冷却



原子の冷却

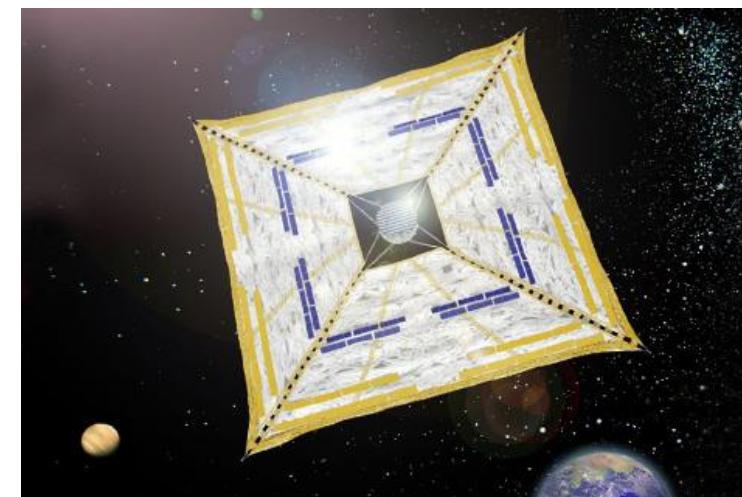
13

◆ 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



$$\Delta v = \frac{p}{m}$$

光子を吸収 ⇒ **減速** (輻射圧)

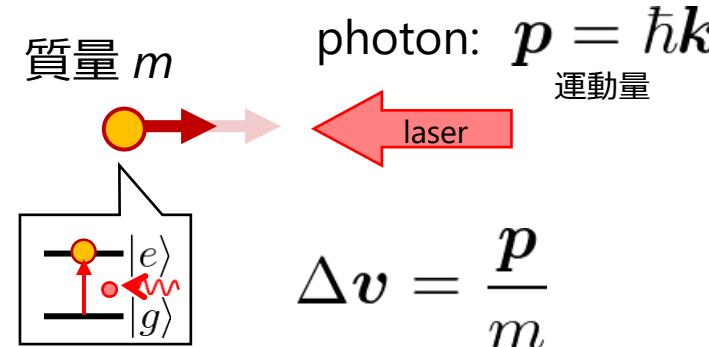
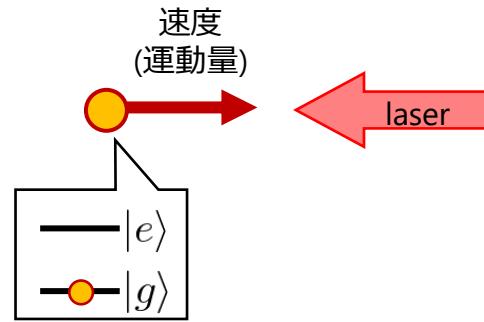


ソーラーセイル
IKAROS
(JAXA)

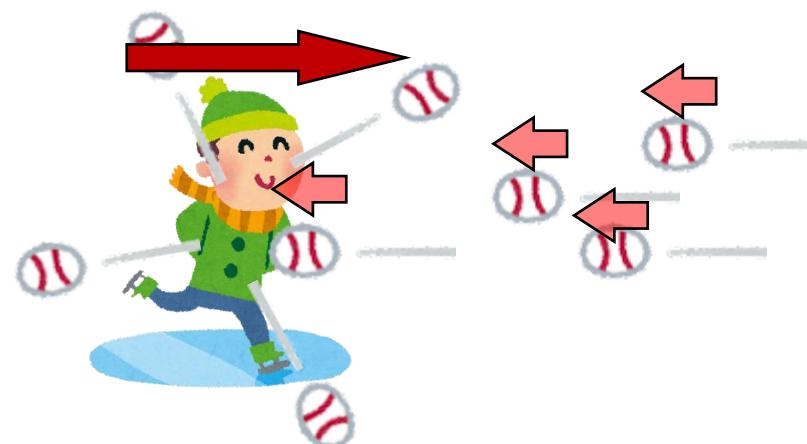
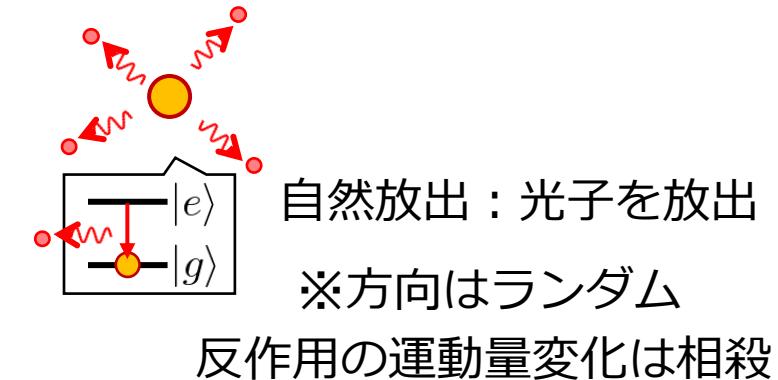
https://www.jaxa.jp/projects/sas/ikaros/index_j.html

原子の冷却

◆ 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



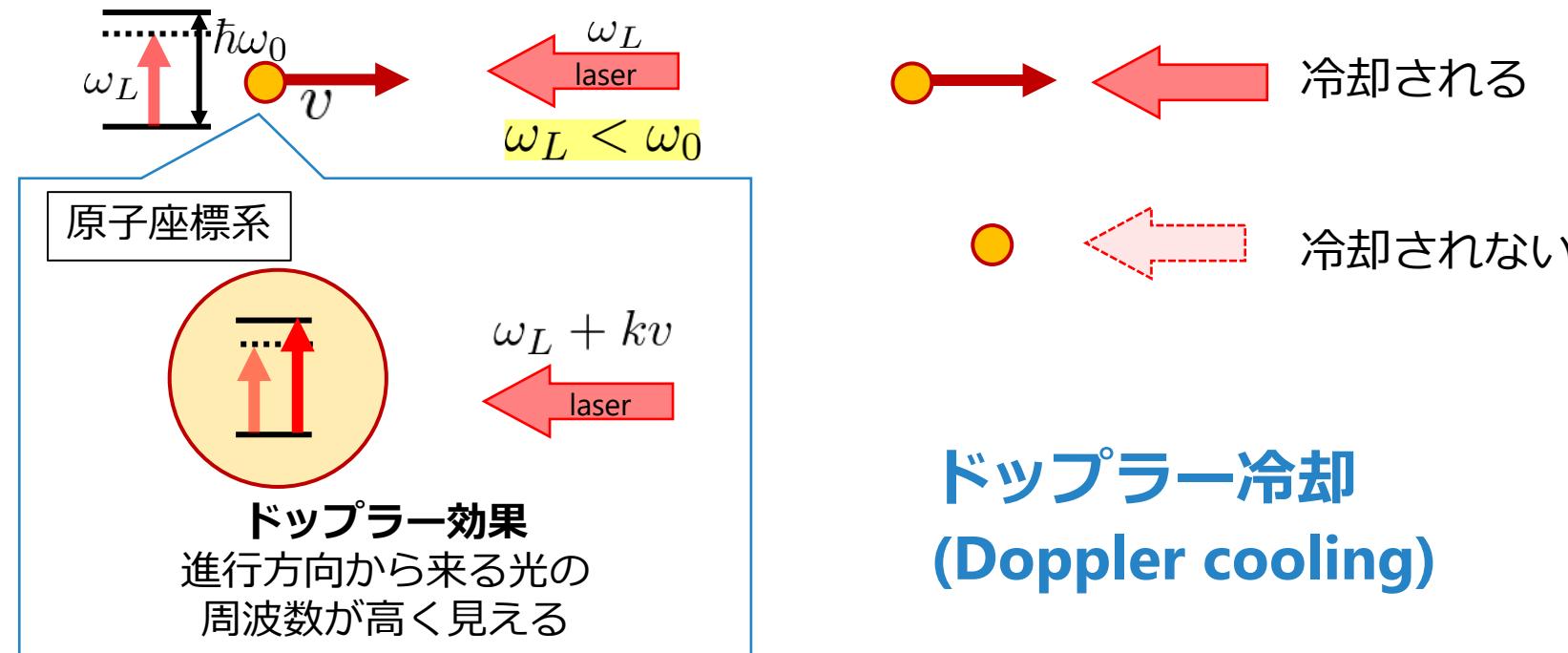
光子を吸収 ⇒ 減速 (輻射圧)



原子の冷却

15

◆ 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

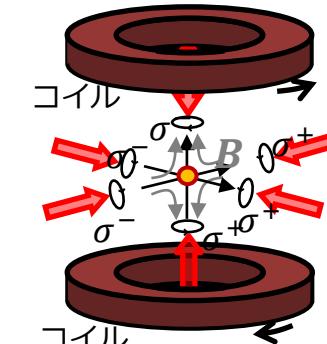


ドップラー冷却
(Doppler cooling)

► 磁気光学トラップ
Magneto-Optical Trap (MOT)

Rbの場合 : $T \sim 100 \mu\text{K}$

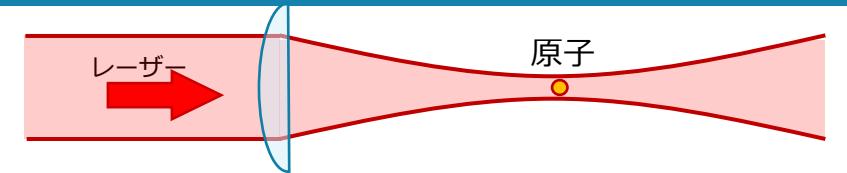
速度 $v \sim \text{cm/s}$



光で原子をトラップする：光双極子トラップ(optical dipole trap)

16

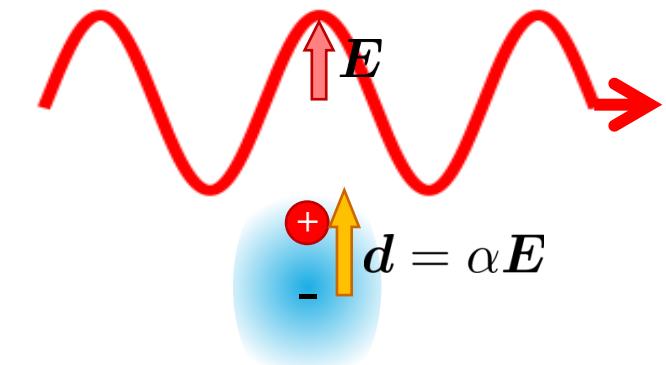
レーザー光を集光→集光点に原子をトラップ



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

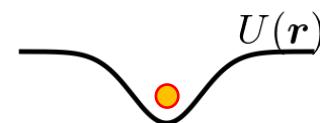
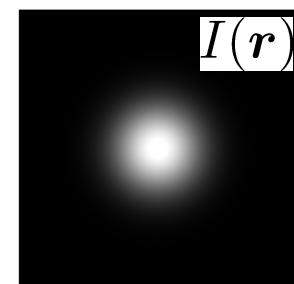
② 共鳴周波数より低周波側 $\omega_L < \omega_0$ d と E の向きが揃う

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

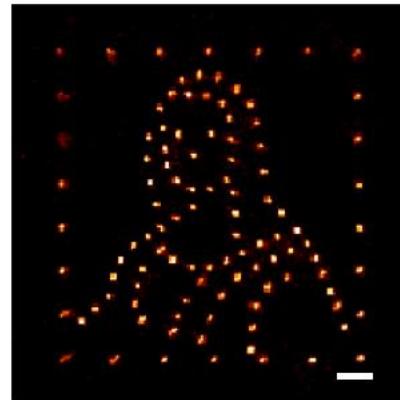
$$U(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2} \alpha(\omega) \langle |\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)|^2 \rangle_t \propto I(\mathbf{r}) \quad \text{光強度に比例}$$



光で原子をトラップする

17

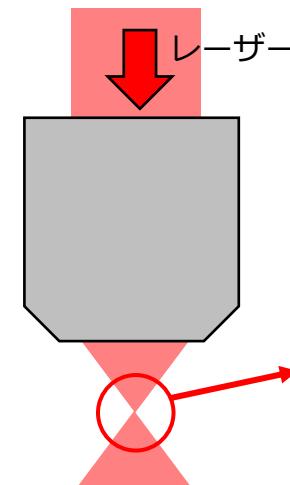
例：光ピンセット



対物レンズ



[Olympus HPより]



ビーム径~1 μm

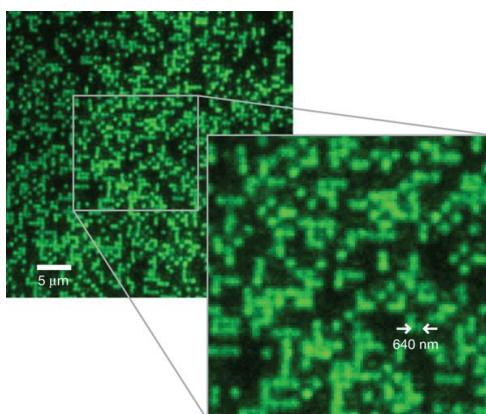
单一原子

レーザー

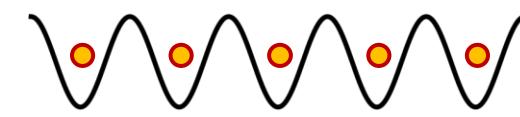
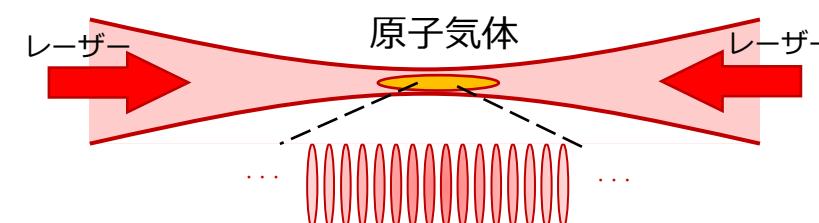
~数 μm

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

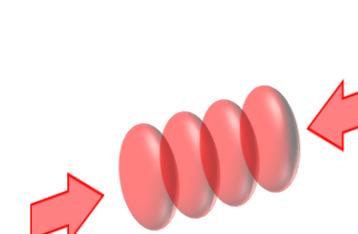
例：光格子



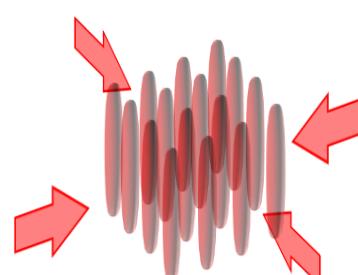
[W. S. Bakr et al. Nature 462, 74-77 (2009)]



格子定数 $a = \lambda/2$ ~数100 nm



2D



3D

冷却原子を用いた量子シミュレーション

18

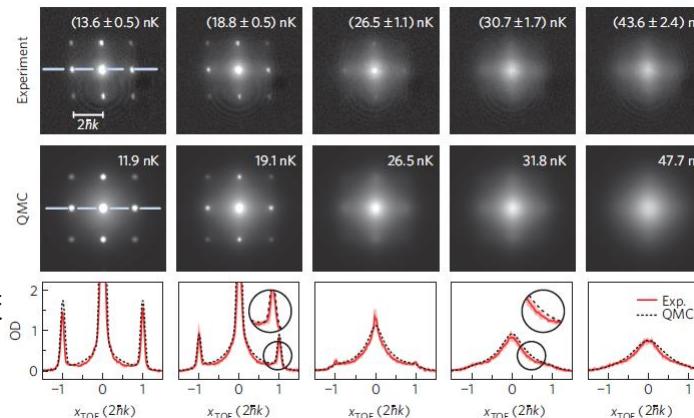
ボース・ハバードモデル

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

モデルの再現、パラメータ制御性

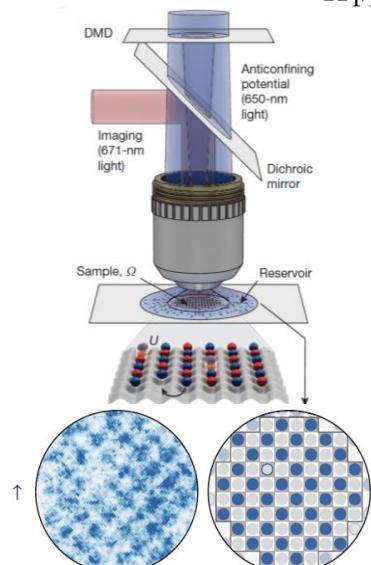
量子モンテカルロ計算との比較

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

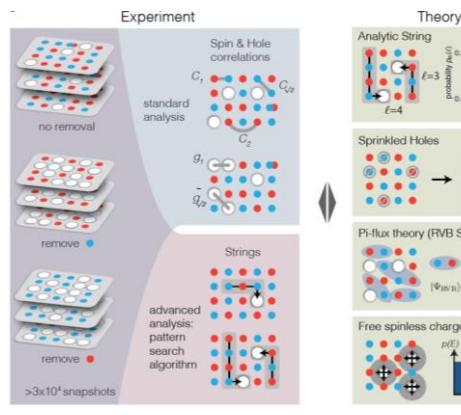


フェルミ・ハバードモデル 基底/励起状態、相構造

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

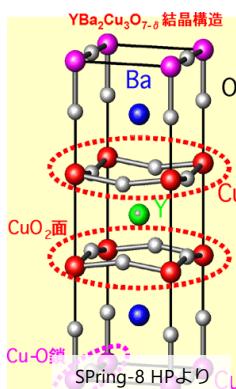


[A. Mazurenko et al., Nature 545, 462 (2017)]

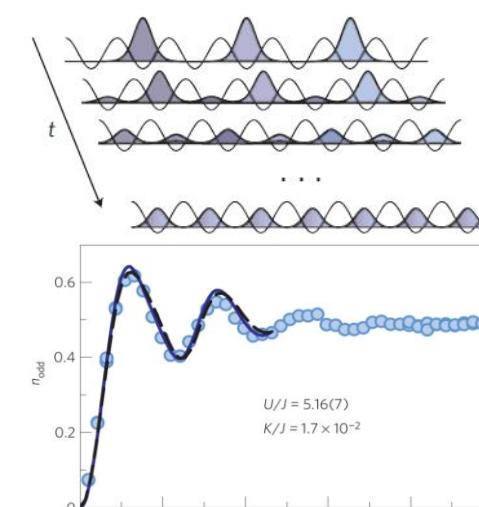


[C. Chiu et al., Science 365, 251-256 (2019)]

高温超伝導 (銅酸化物)



非平衡ダイナミクス

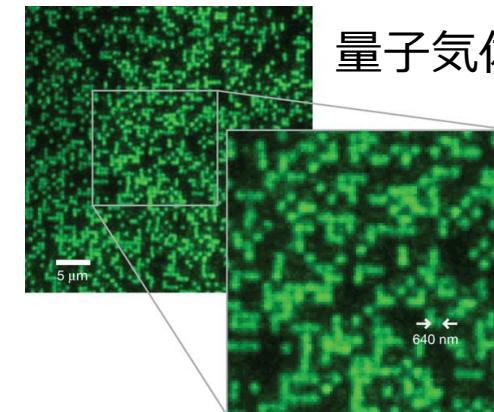


[S. Trotzky et al., Nat. Phys. 8, 325-330 (2012)]

量子気体顕微鏡

個別観測・制御

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



孤立量子系の緩和過程

光格子系

今日はこの話はしない

冷却原子を用いた量子シミュレーション

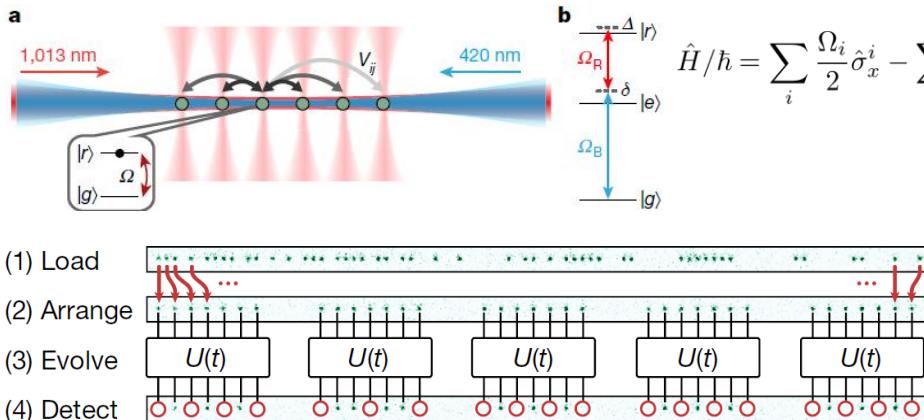
19

◆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)]

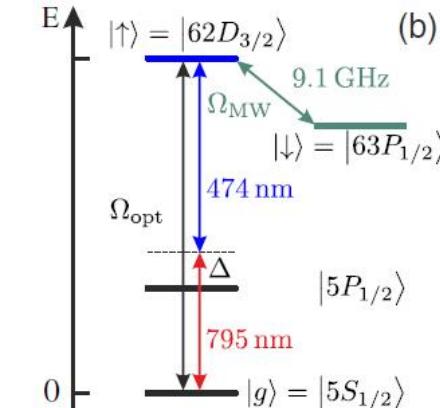
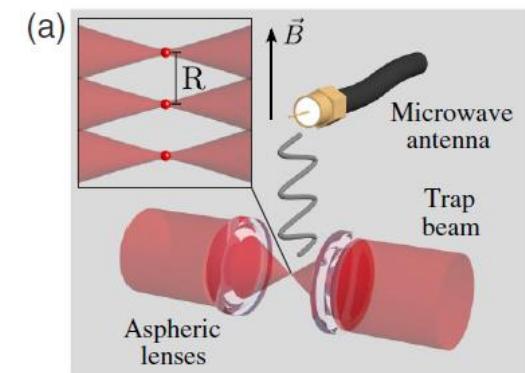


[H. Bernien *et al.*, *Nature* **551**, 579 (2017)]

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

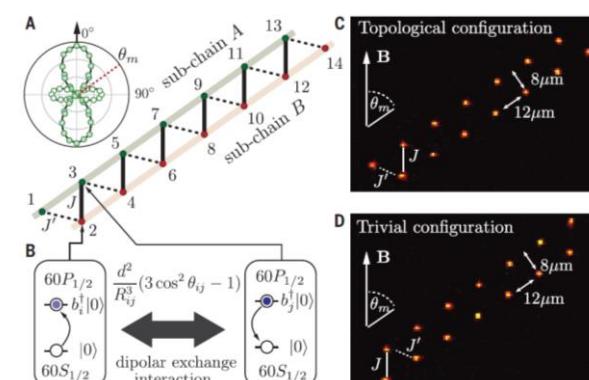
◆量子XYモデル

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



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

◆Su-Schrieffer-Heegerモデル



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

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

光ピンセット系

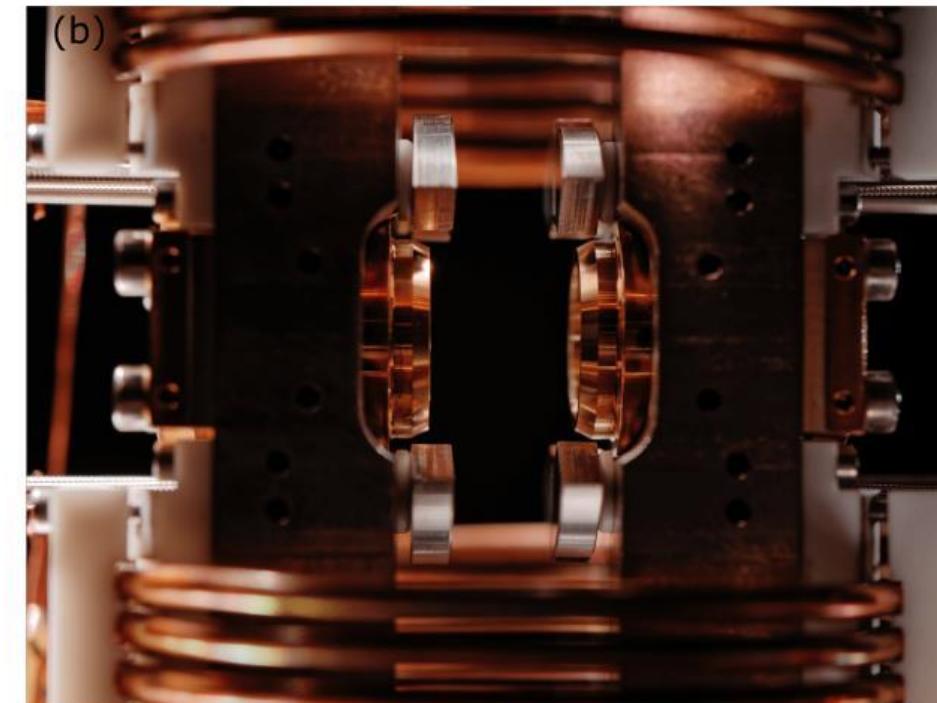
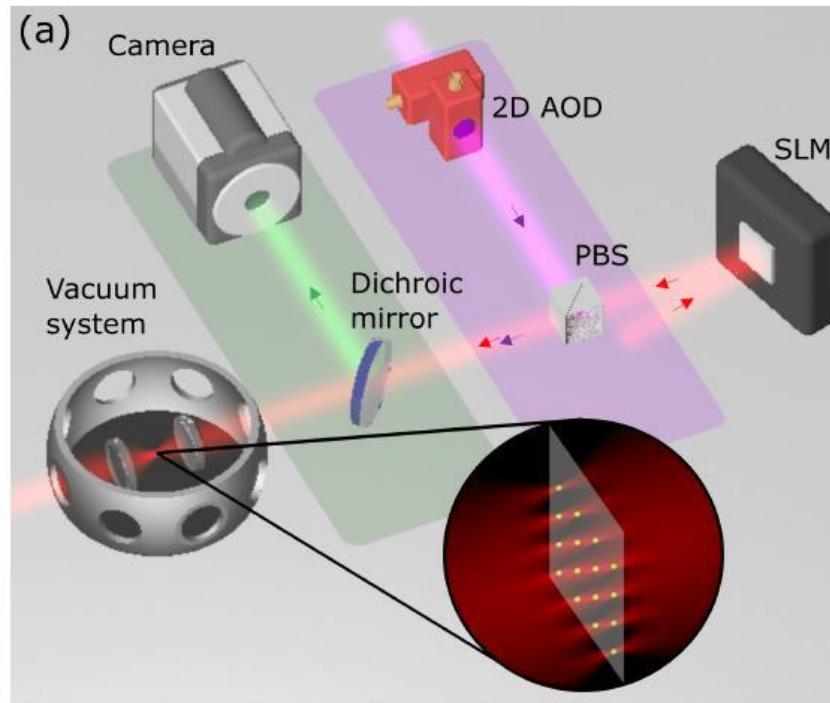
今日はこの話もしない

冷却原子型量子コンピュータ

20

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

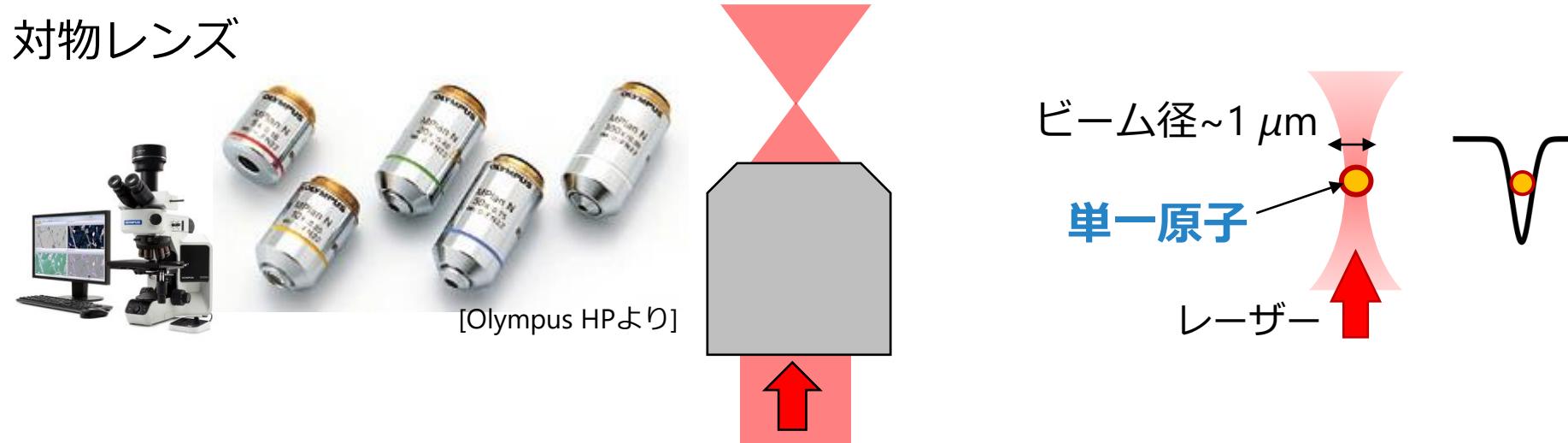


冷却原子型量子コンピュータ企業PASQAL 白書 “Quantum computing with neutral atoms”
arXiv: 2006.12326

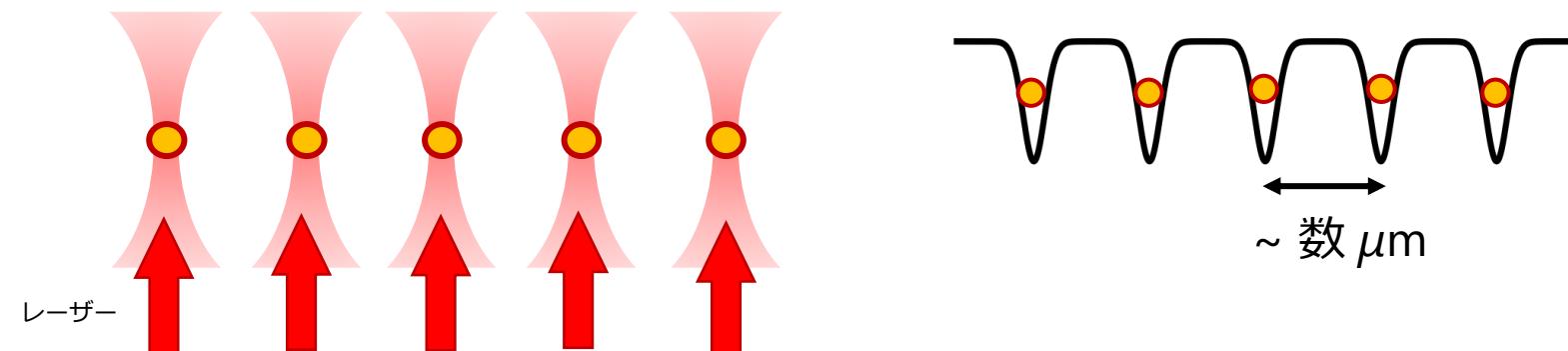
原子量子ビット配列

◆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



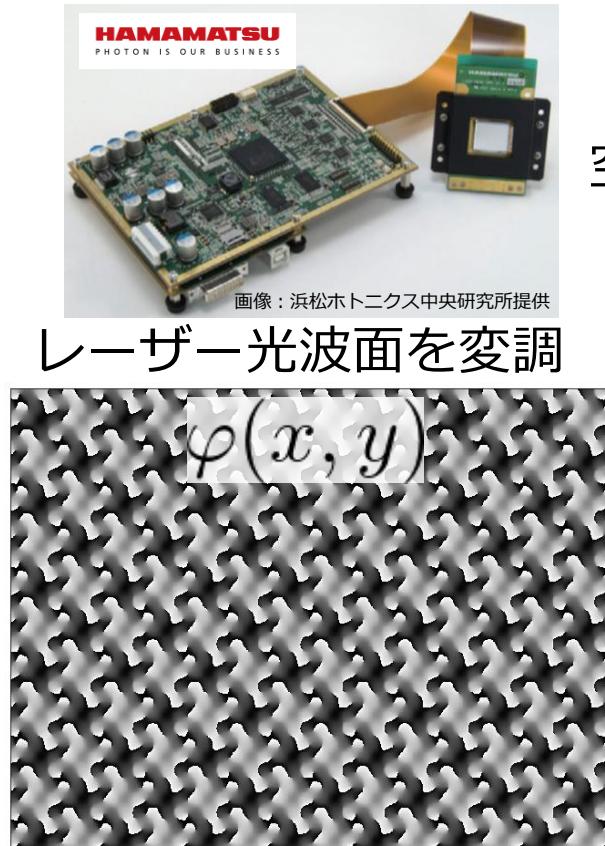
◆光ピンセット配列 optical tweezers array



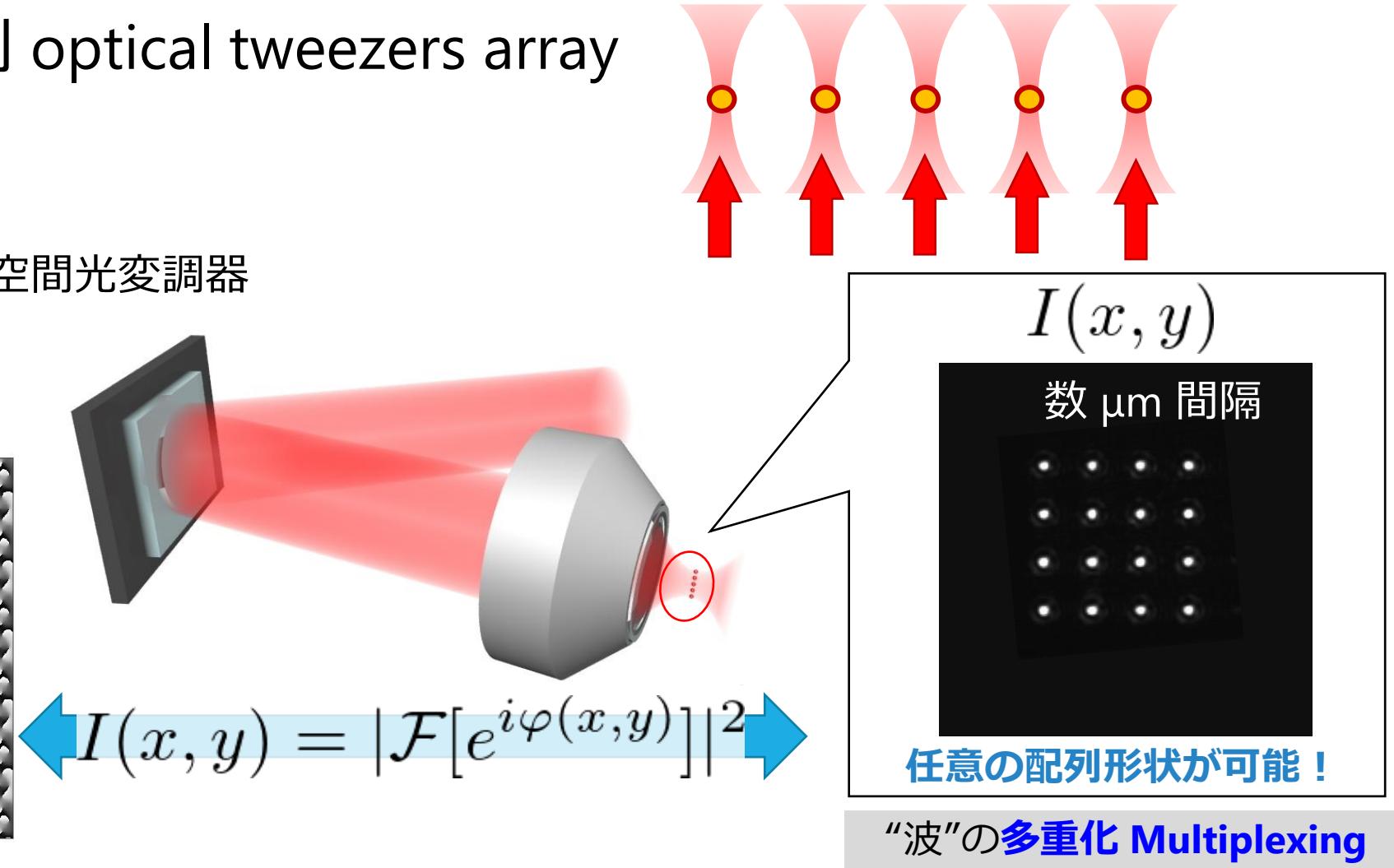
原子量子ビット配列

22

◆光ピンセット配列 optical tweezers array



空間光変調器

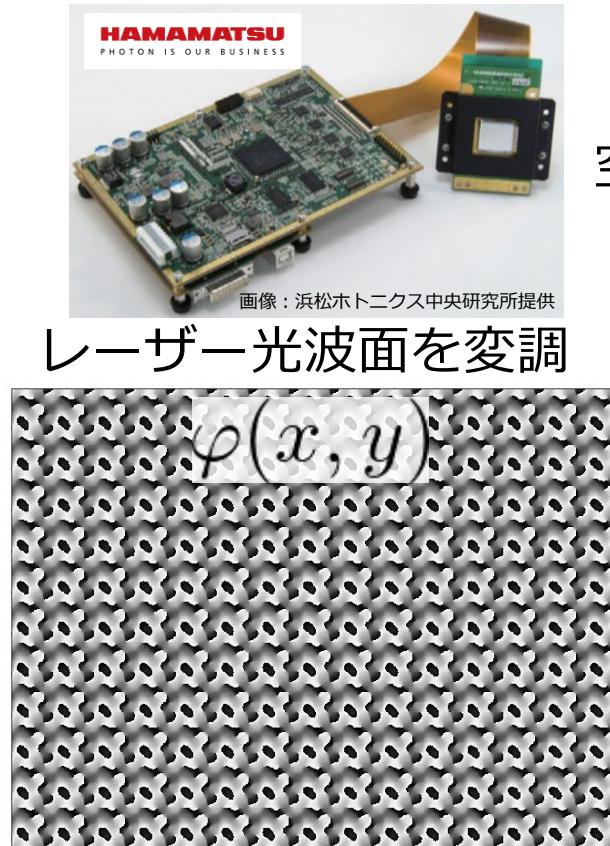


詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

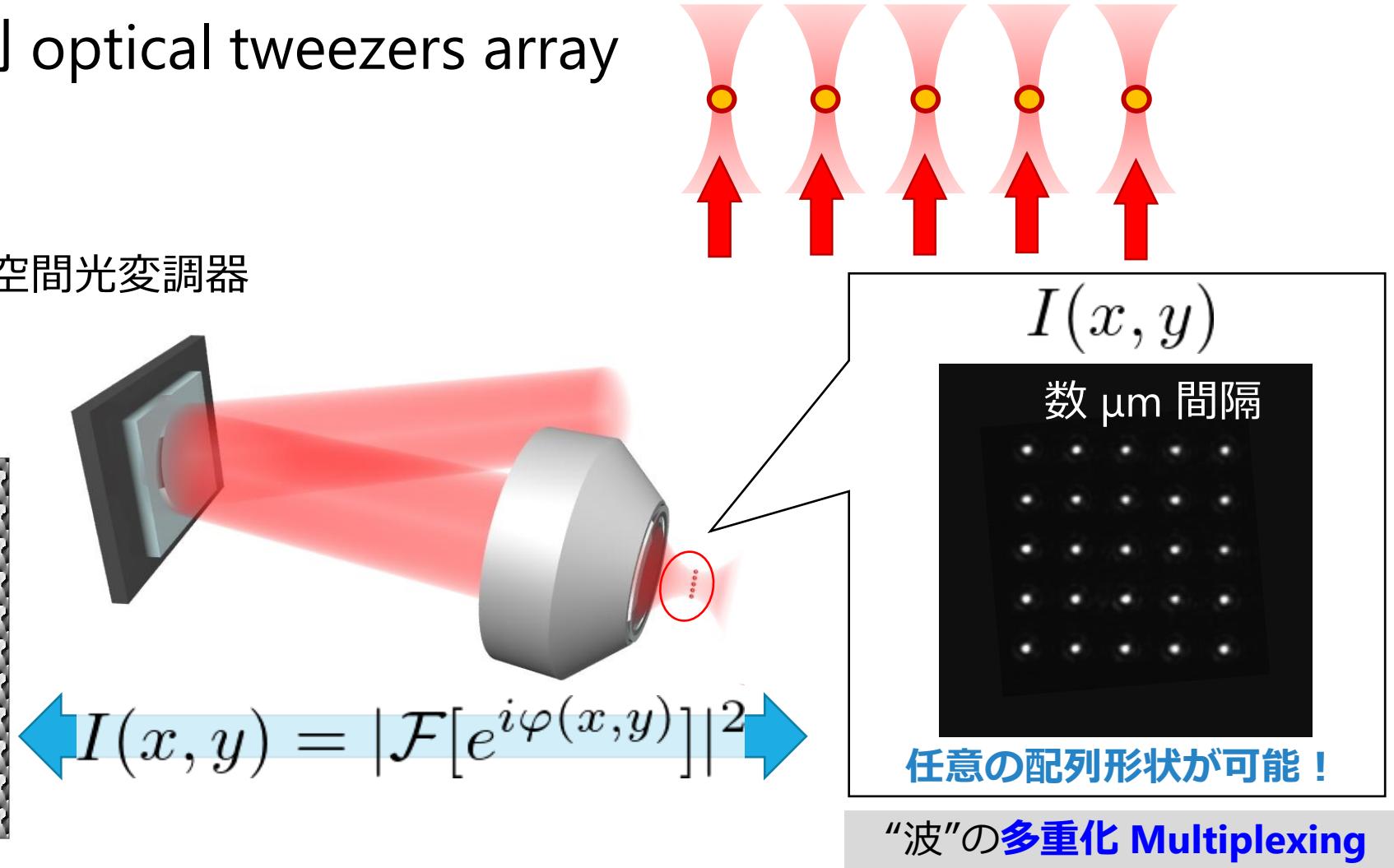
原子量子ビット配列

23

◆光ピンセット配列 optical tweezers array



空間光変調器



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

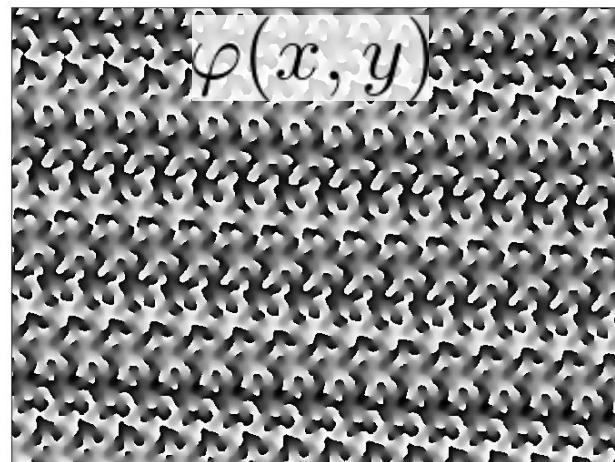
原子量子ビット配列

24

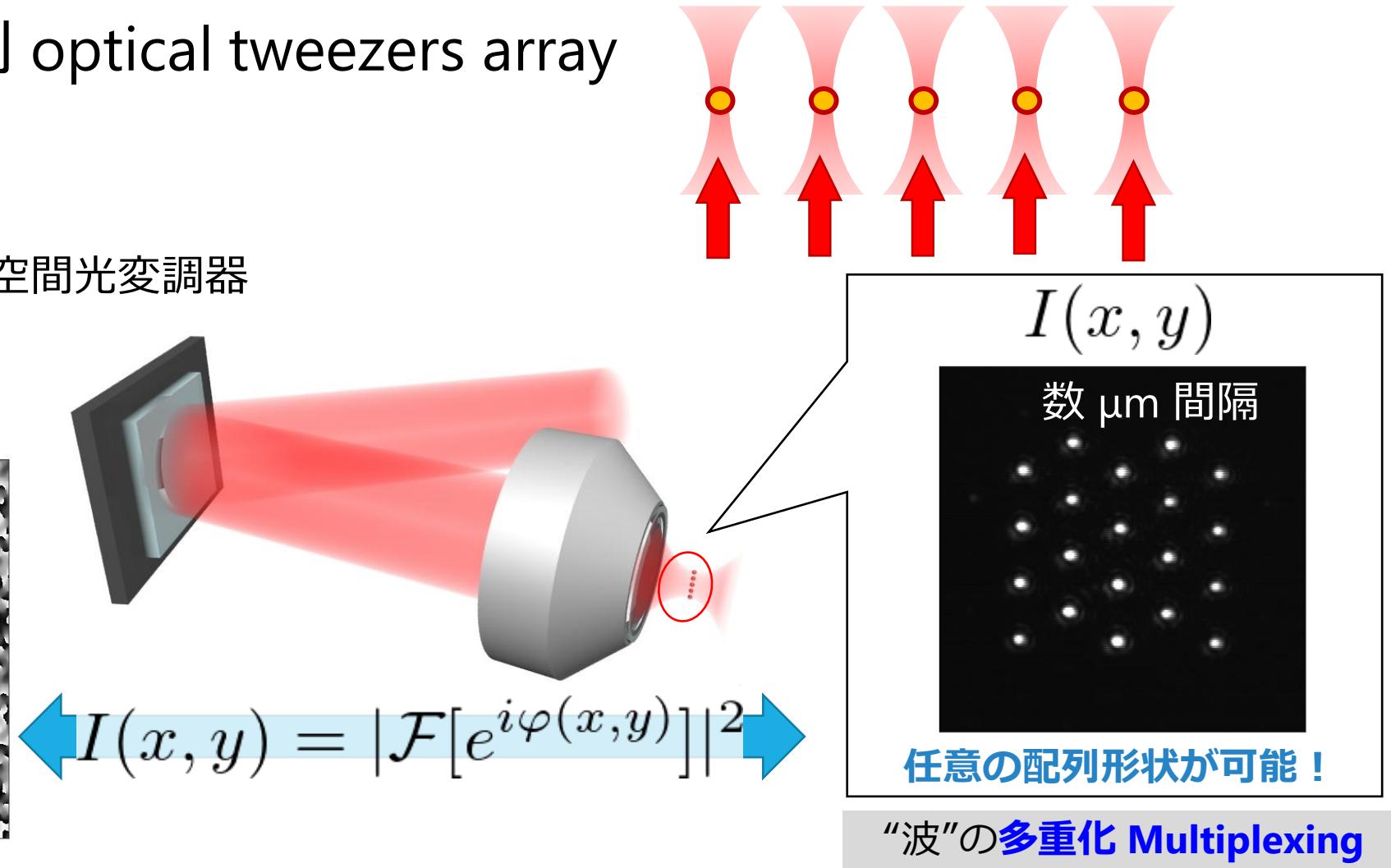
◆光ピンセット配列 optical tweezers array



レーザー光波面を変調



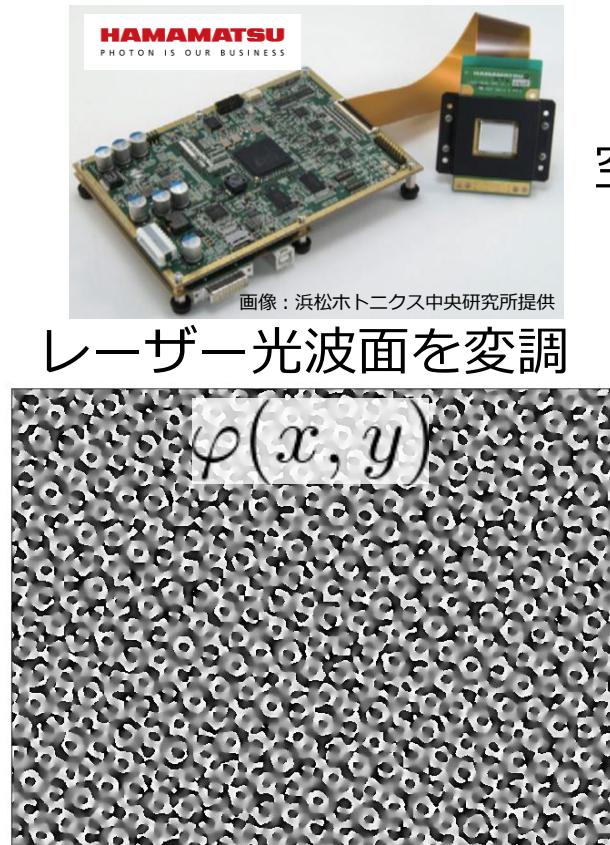
空間光変調器



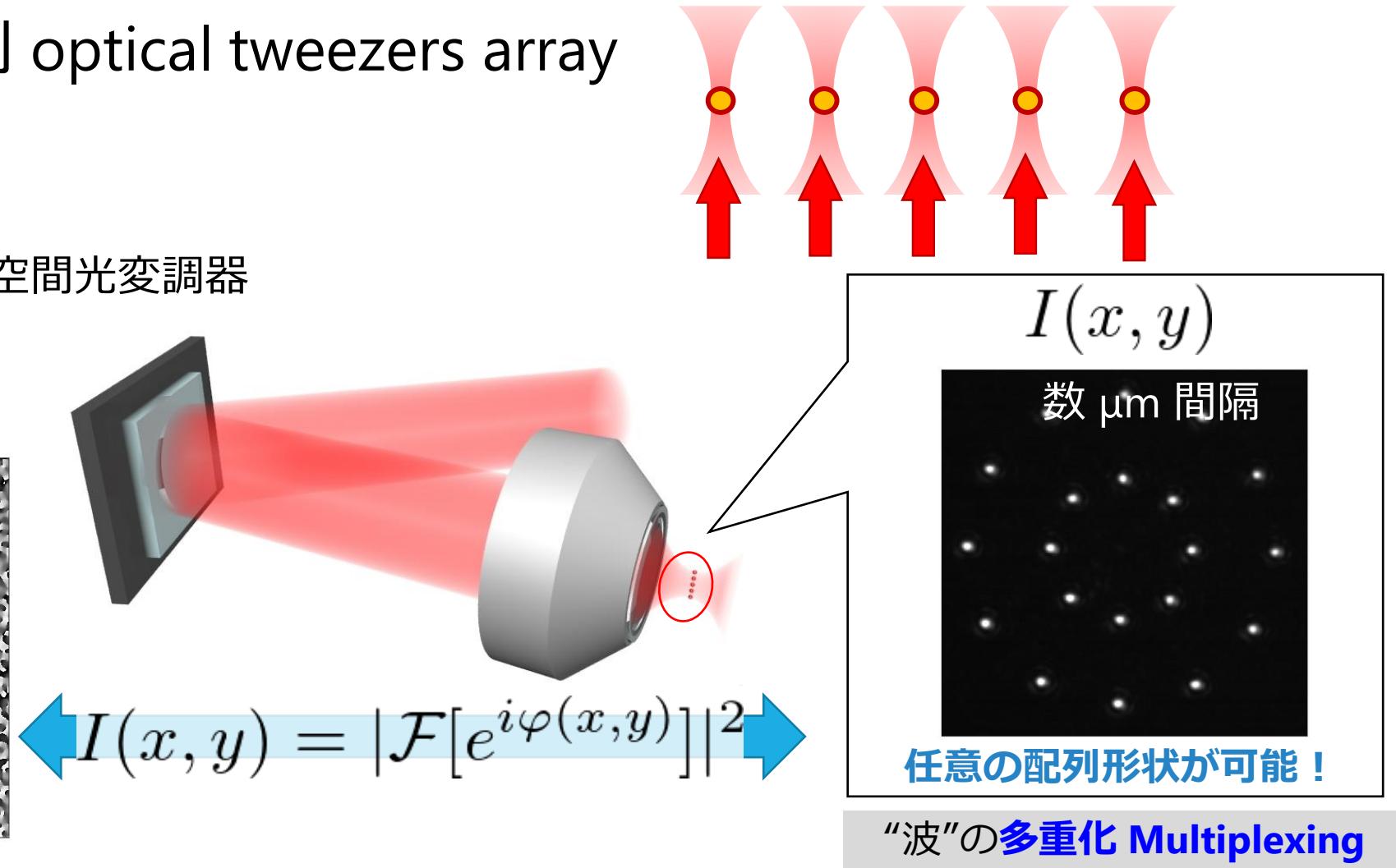
詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

原子量子ビット配列

◆光ピンセット配列 optical tweezers array

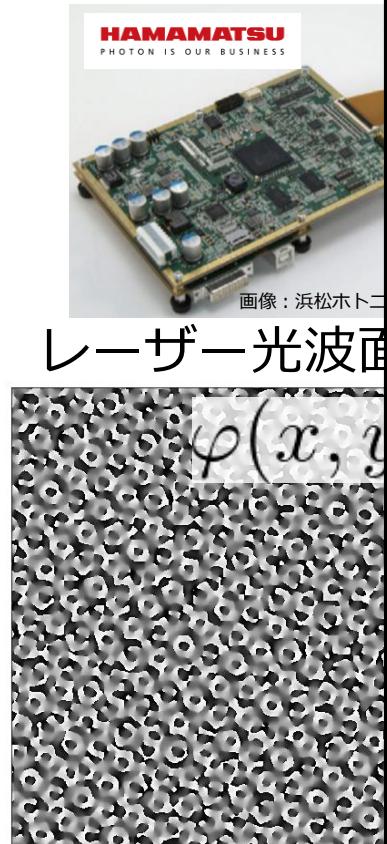


空間光変調器

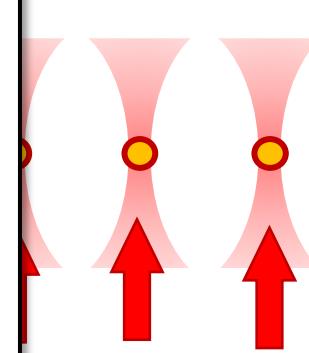
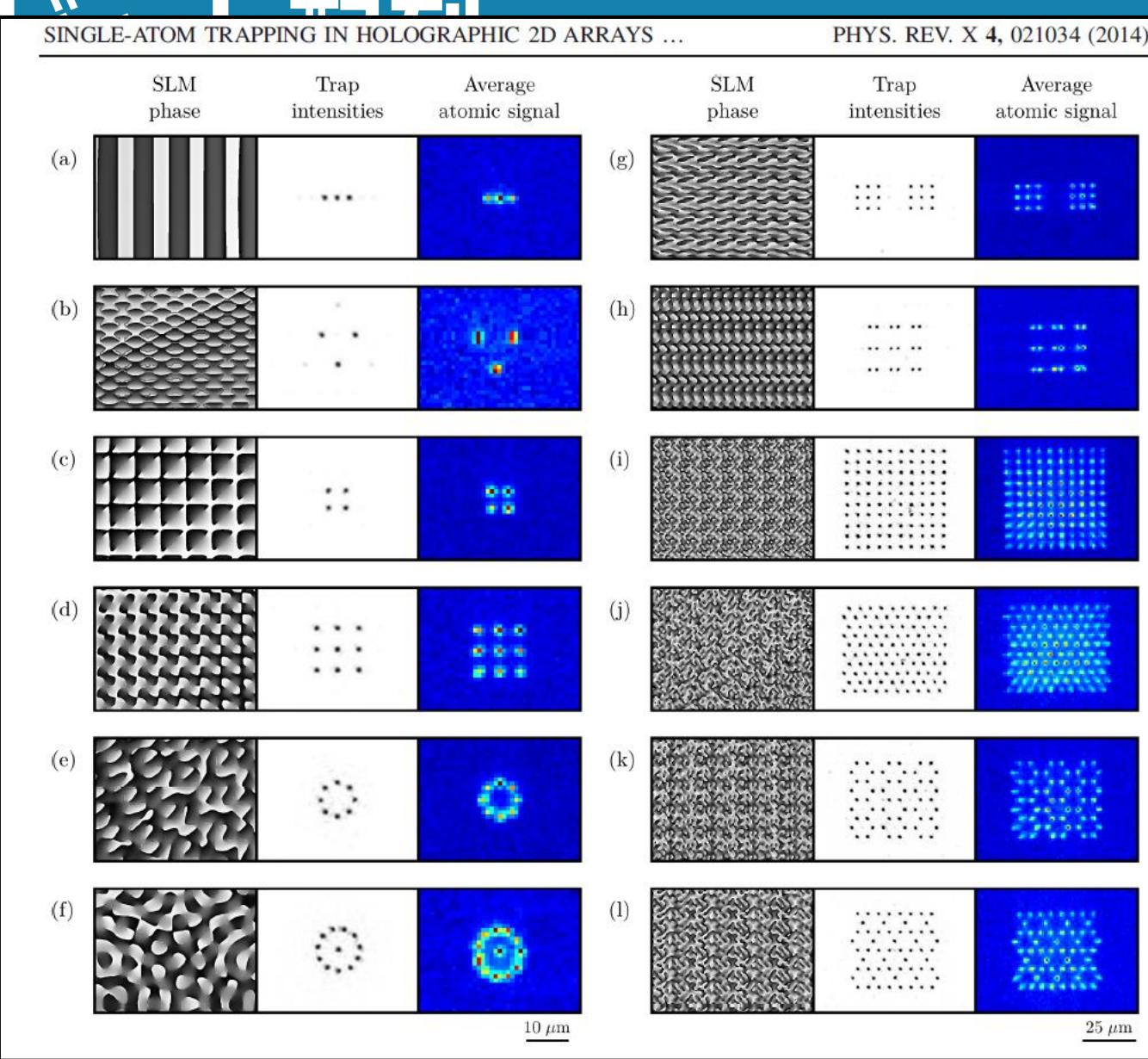


詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX **4**, 021034 (2014)]

◆光ピンセット



レーザー光波面



$I(x, y)$

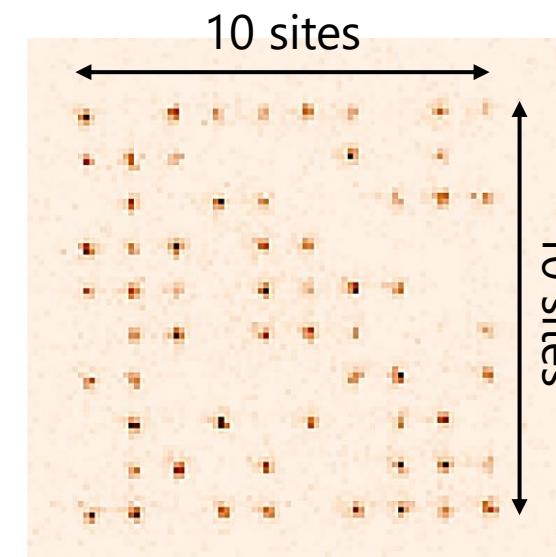
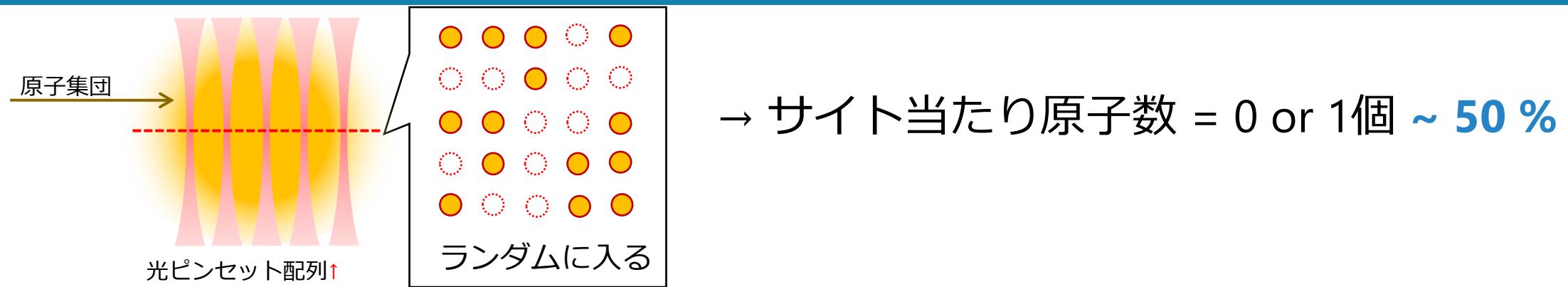
数 μm 間隔

任意の配列形状が可能 !

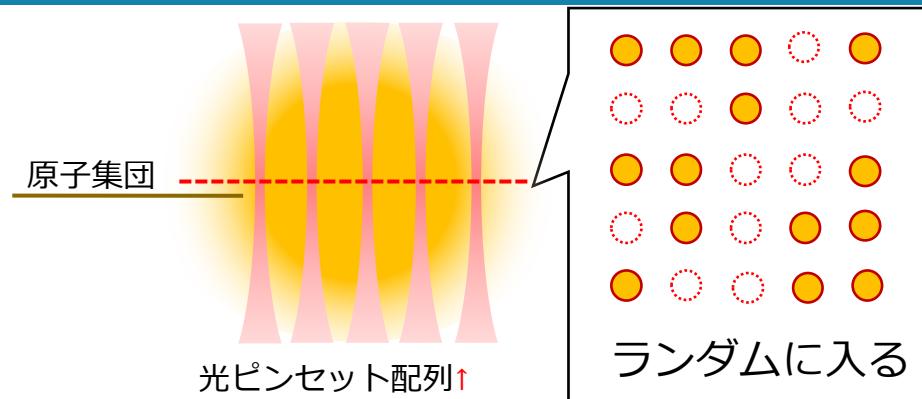
”の多重化 Multiplexing

[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



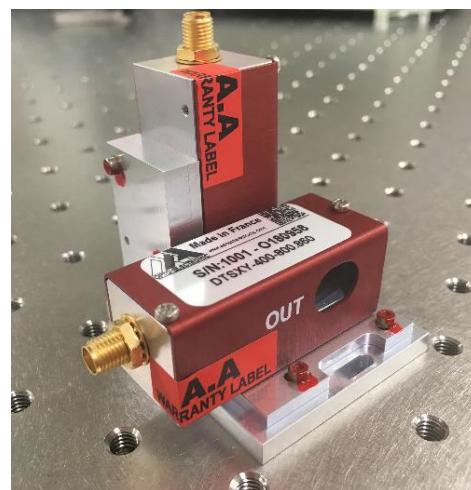
原子量子ビットの再配列



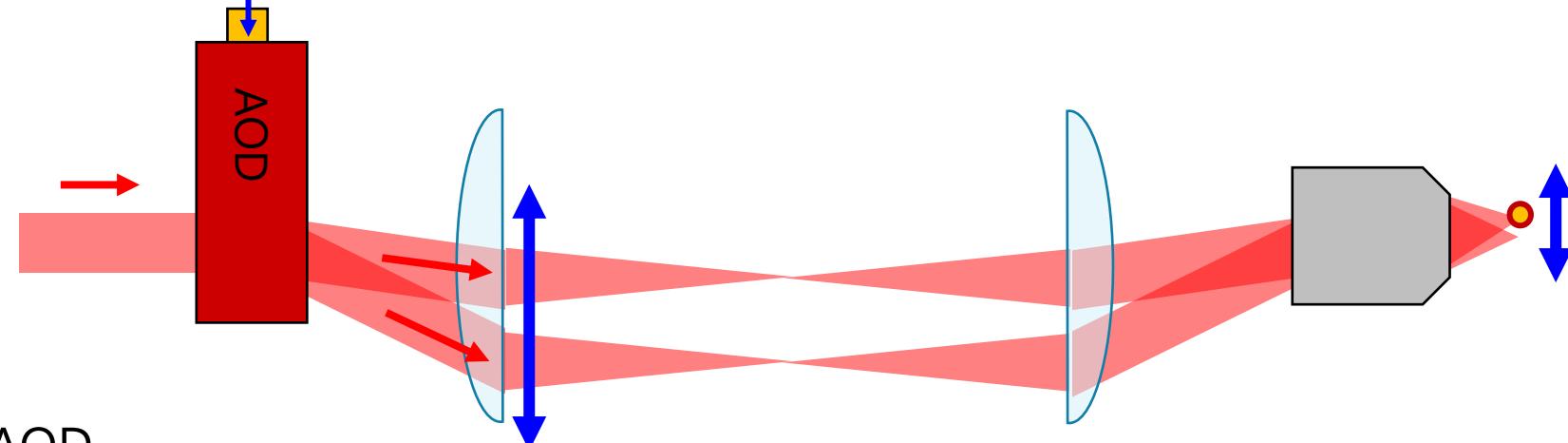
→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 $\sim 50\%$

2016年ブレークスルー

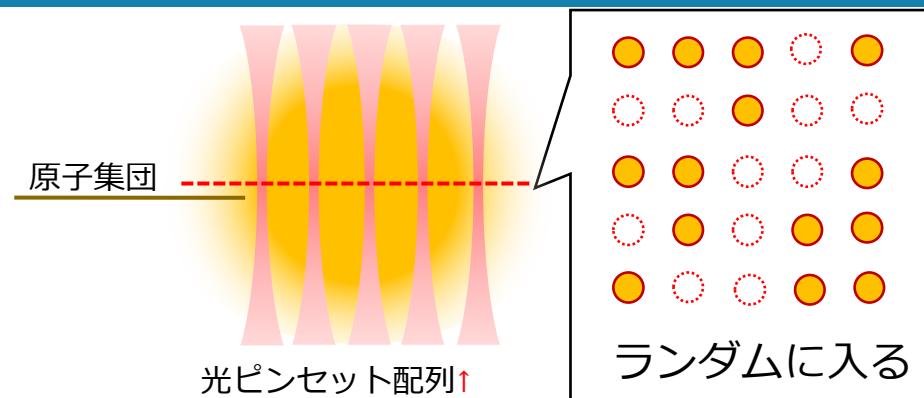
➤ 動的光ピンセット



RF (Radio Frequency signal)



原子量子ビットの再配列

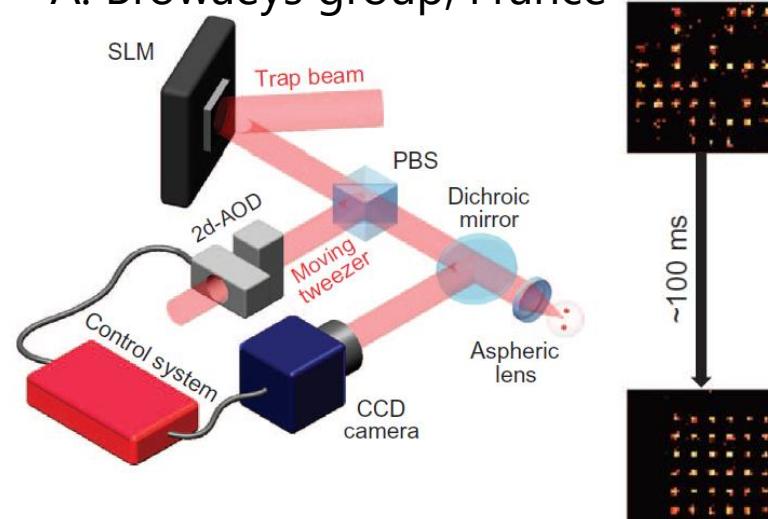


→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 $\sim 50\%$

2016年ブレークスルー

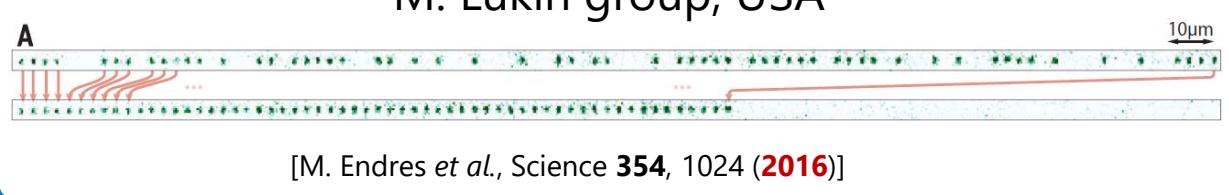
配列中の原子を撮影 → 再配列 欠陥無し任意配列が可能に

A. Browaeys group, France



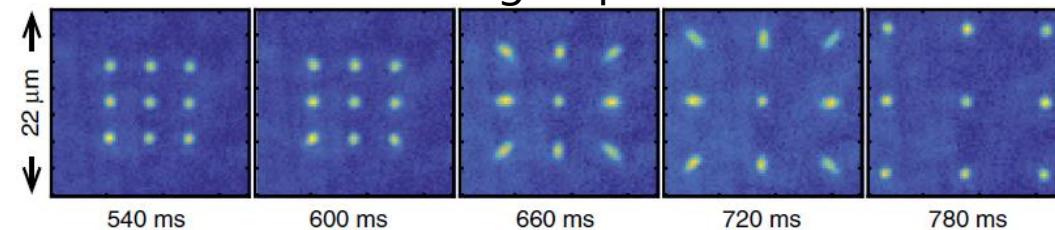
[D. Barredo, S. de Léséleuc *et al.*, Science 354, 1021 (2016)]

M. Lukin group, USA



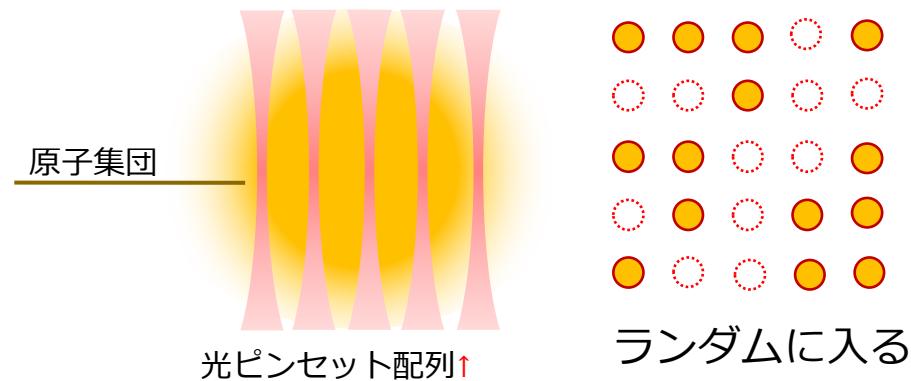
[M. Endres *et al.*, Science 354, 1024 (2016)]

J. Ahn group, Korea



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

原子量子ビットの再配列

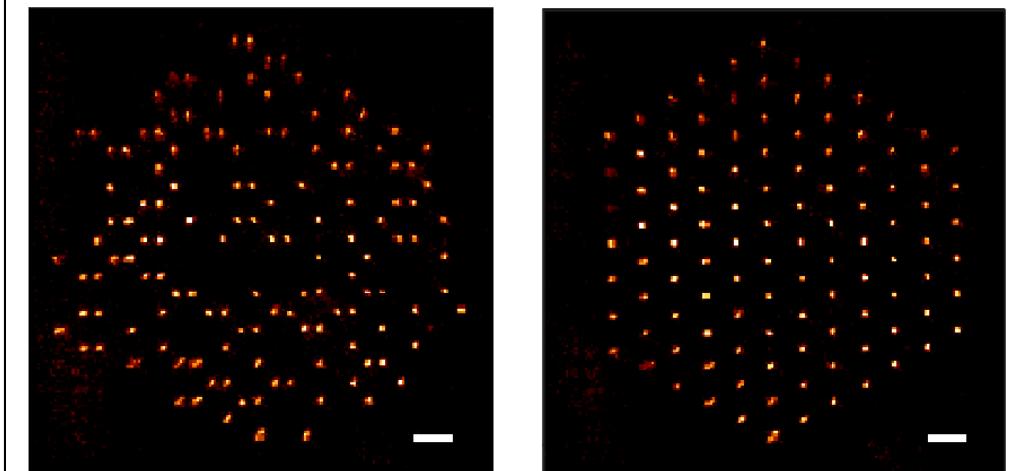


→ サイト当たり原子数 = 0 or 1個 ~ 50 %

2016年ブレークスルー

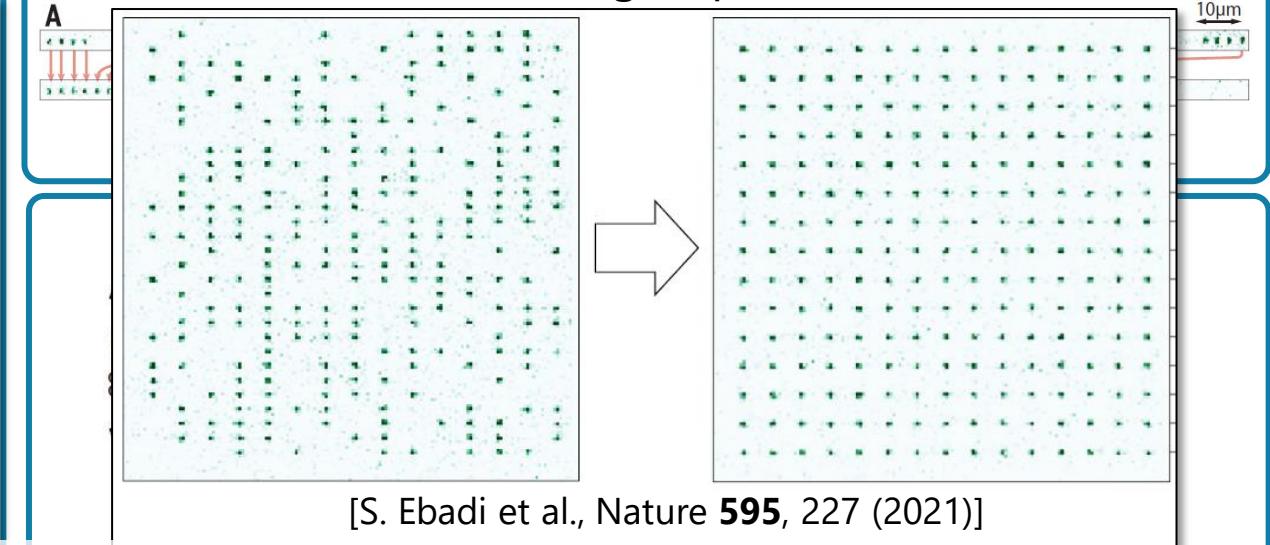
配列中の原子を撮影 → 再配列 欠陥無し任意配列が可能に

A. Browaeys group, France



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

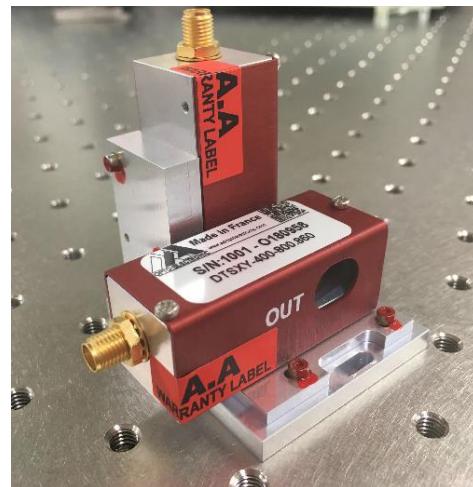
M. Lukin group, USA



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

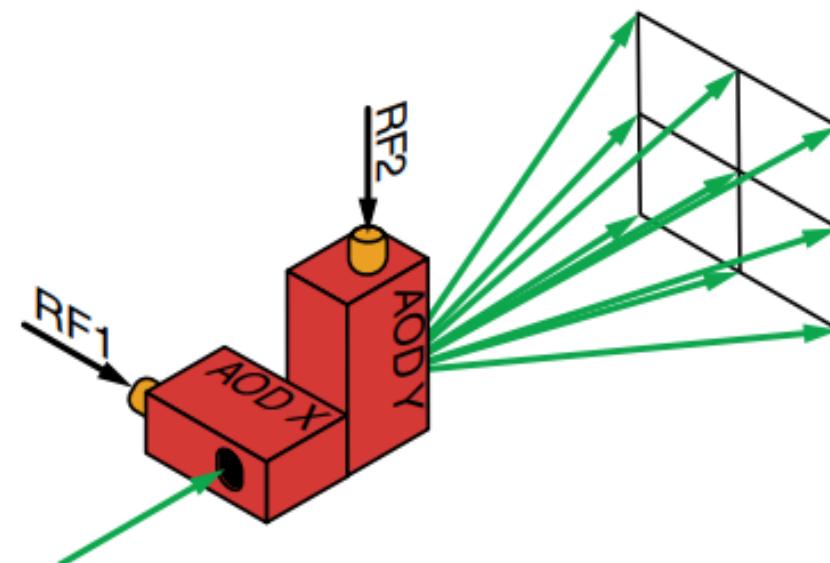
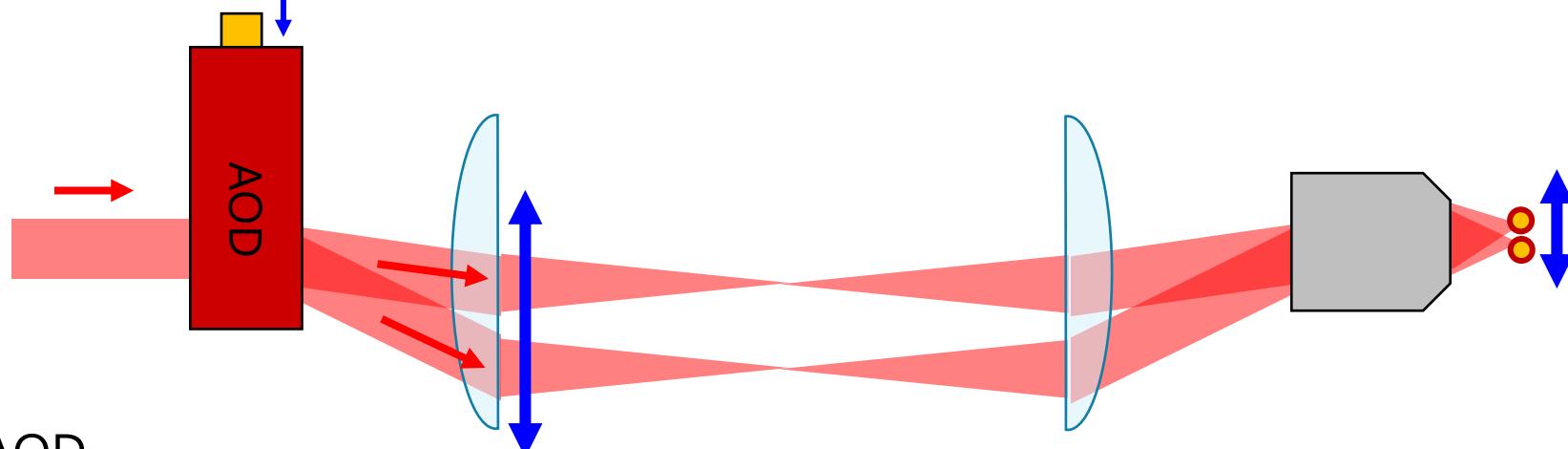
2次元, 数100~1000原子, 個別観測・制御できる間隔

Local addressing/Parallel addressing



Acousto-Optic Deflector: AOD

RF (Radio Frequency signal)



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

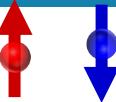
“波”の多重化 Multiplexing

Multitone signal : Arbitrary waveform generator

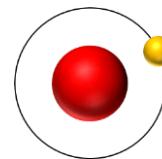
量子ビット

32

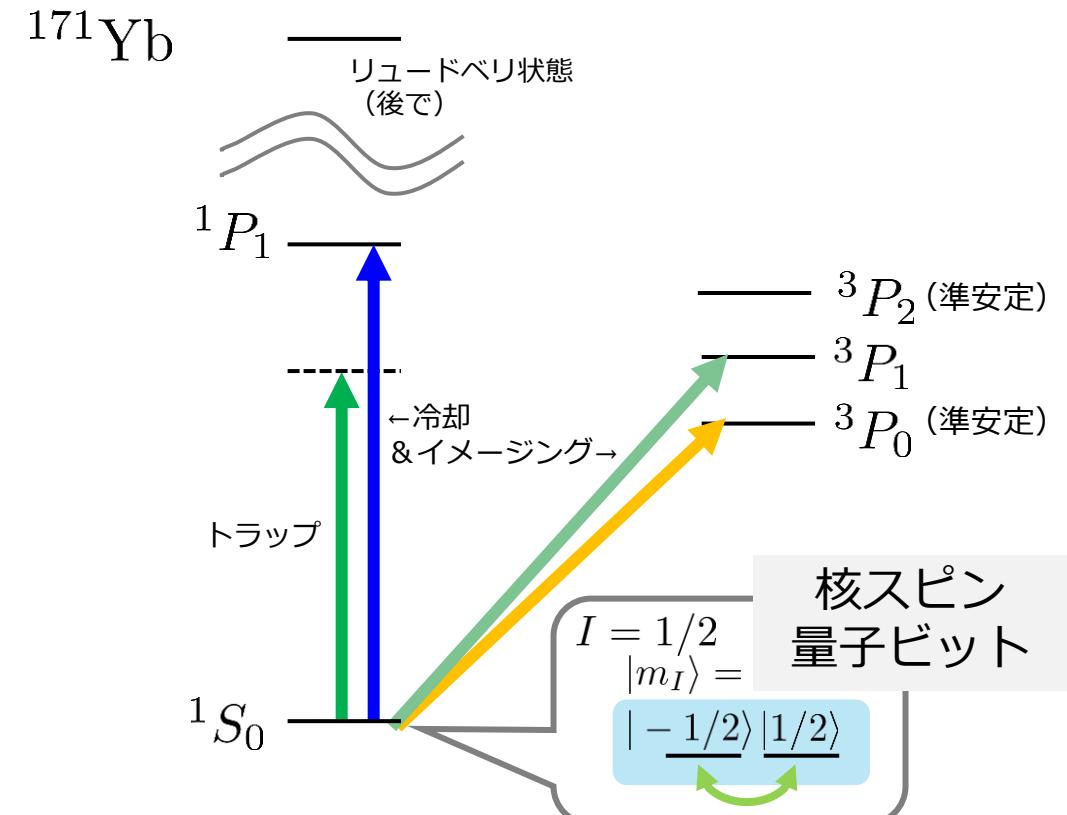
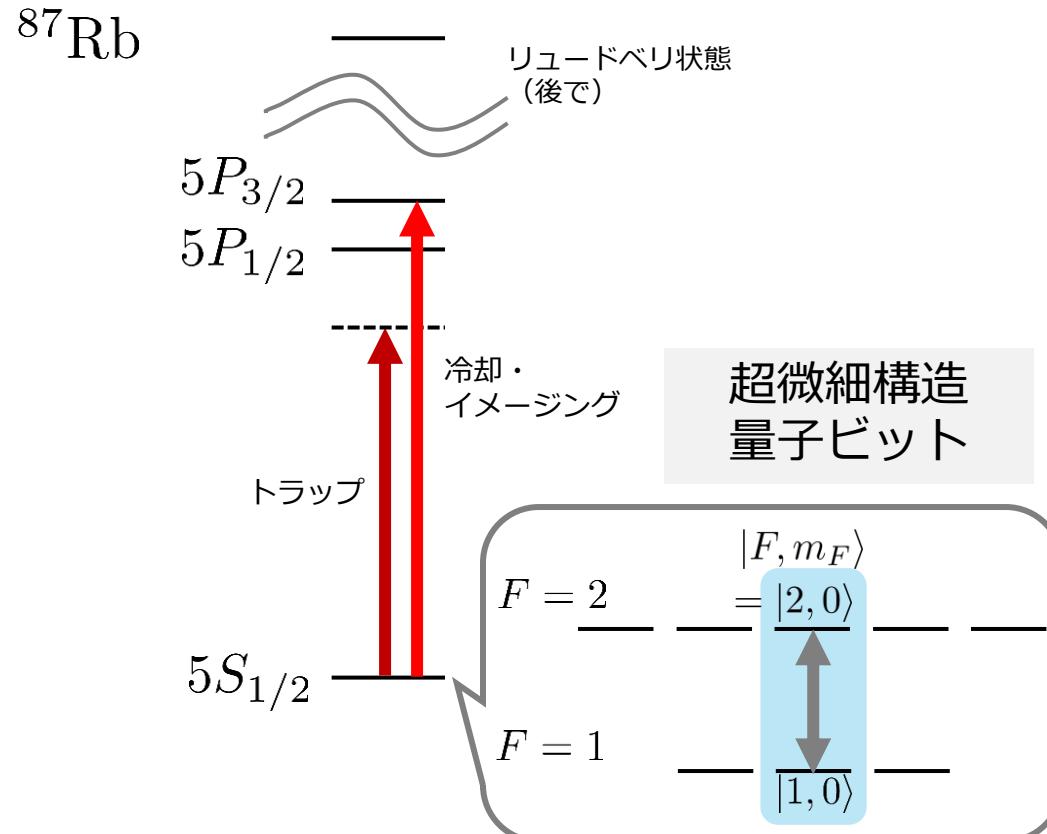
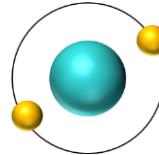
量子ビット = 原子の電子/核スピン状態



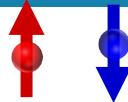
アルカリ原子
Rb, Cs



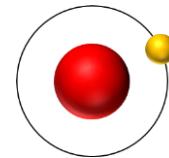
アルカリ土類（様）原子
Yb, Sr



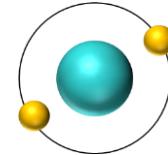
量子ビット = 原子の電子/核スピン状態



アルカリ原子
Rb, Cs

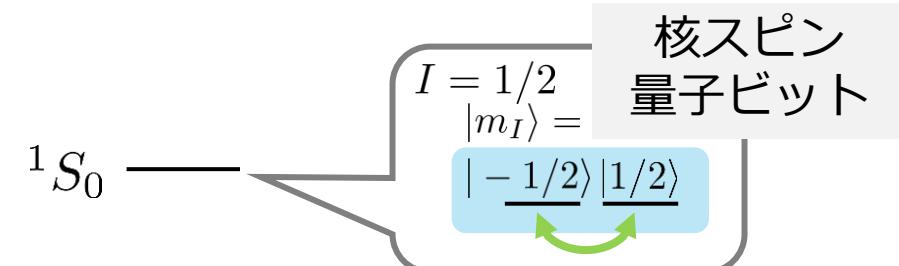
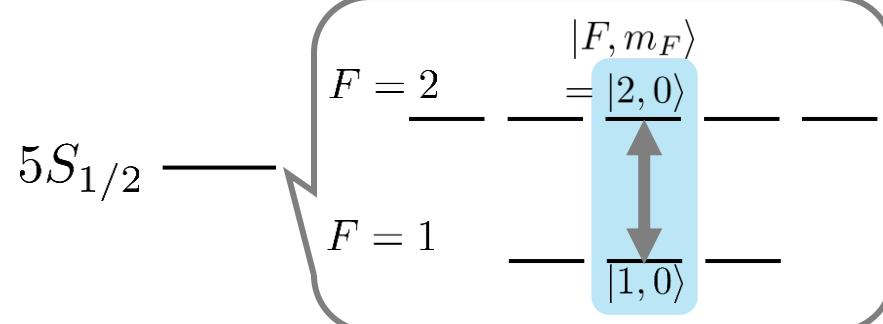


アルカリ土類（様）原子
Yb, Sr



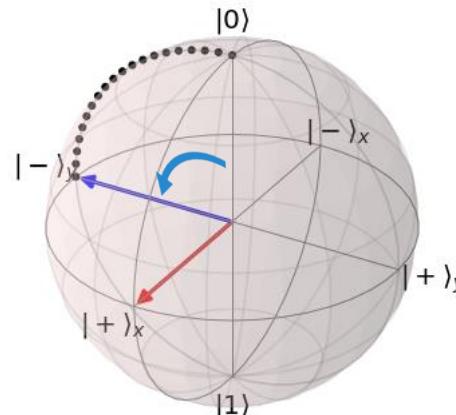
コヒーレンス時間 : $T_1 = 1 \sim 10 \text{ s}$, $T_2 \sim 1 \text{ s}$ >> ゲート操作時間 $\sim 1 \mu\text{s}$

超微細構造
量子ビット

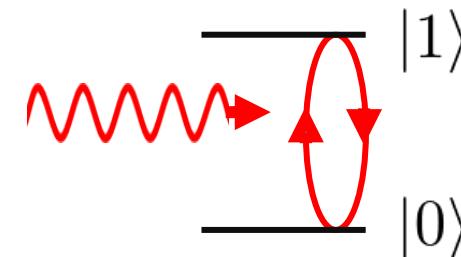


ゲート操作 : 1-qubit gate

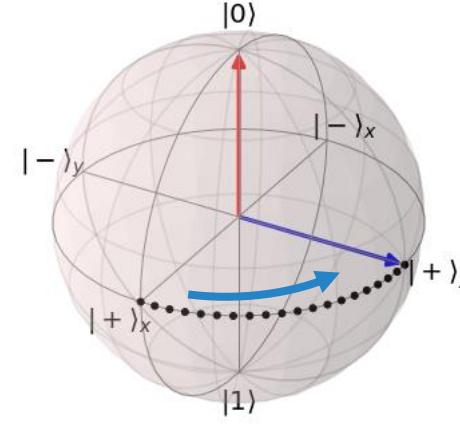
➤ X回転ゲート: 共鳴光/マイクロ波によるラビ振動



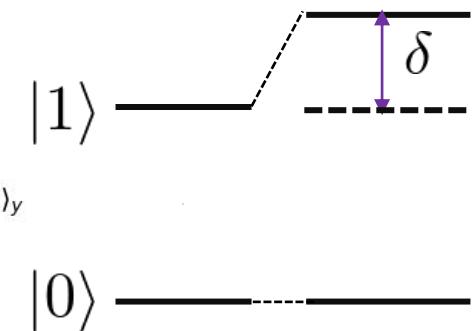
$X(\theta)$



➤ Z回転ゲート: ライトシフトによる位相獲得



$Z(\theta)$



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

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

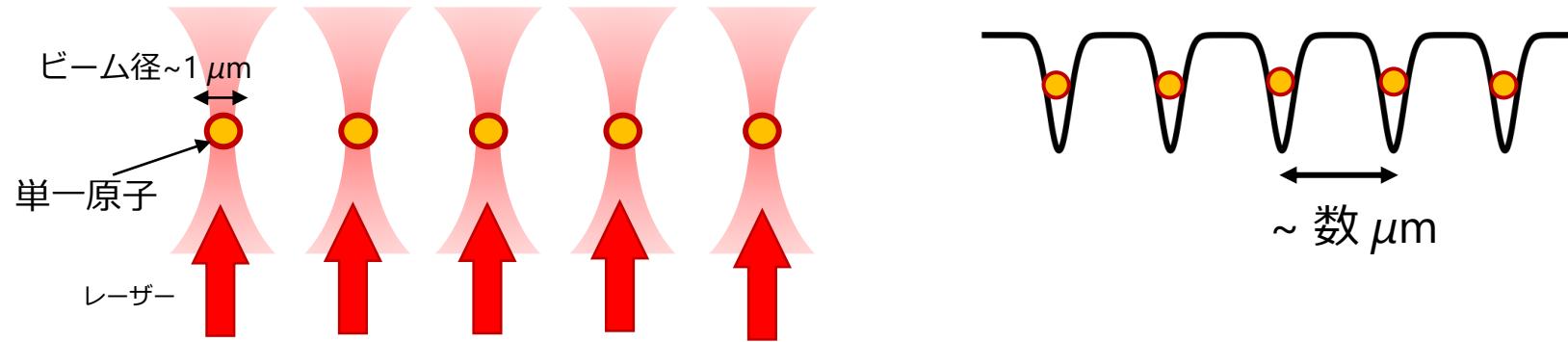
1-qubit gate fidelity ~ 99.96-99.99%

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

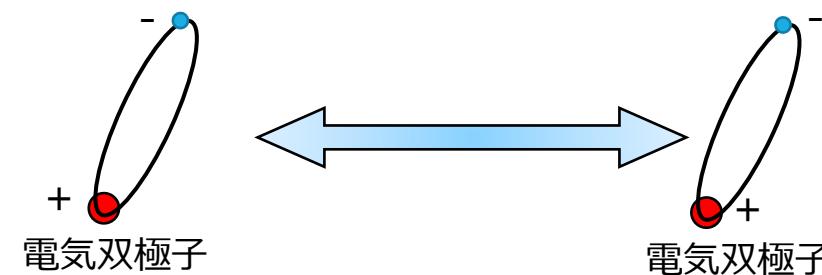
[D. Bluvstein et al., Nature 604, 451 (2022),
T. M. Graham et al., Nature 604, 457 (2022).]

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

原子間の相互作用：リュードベリ原子



中性原子 → 長距離の相互作用無し？

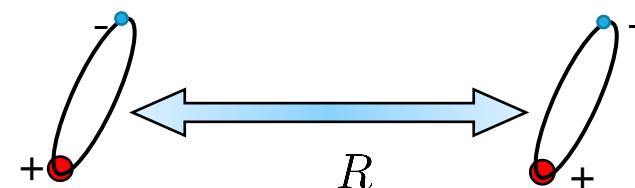
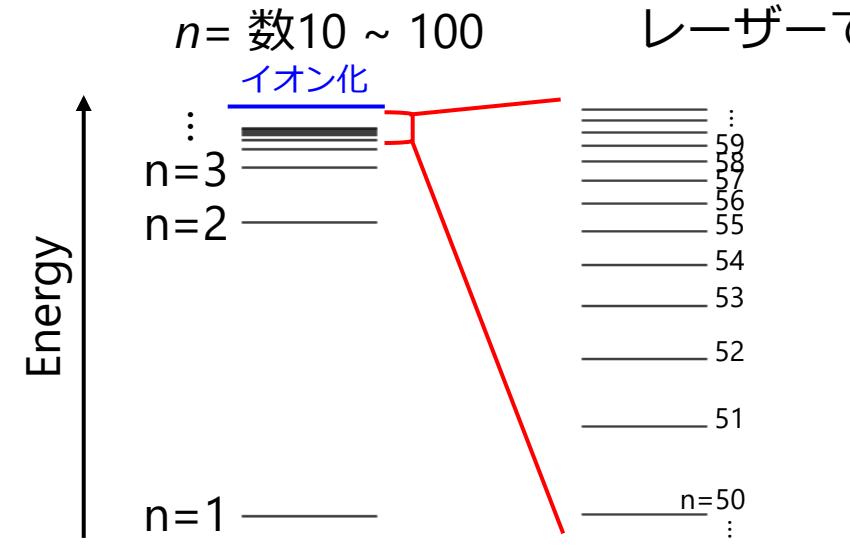
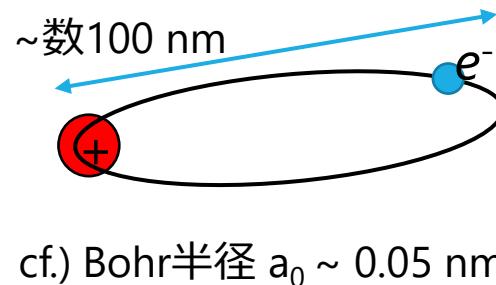


原子をリュードベリ状態 (Rydberg state) に励起する
→ 双極子双極子相互作用

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
を超えて
ゲート操作
可能

量子ゲート操作：2-qubit gate

◆ Controlled-Zゲート

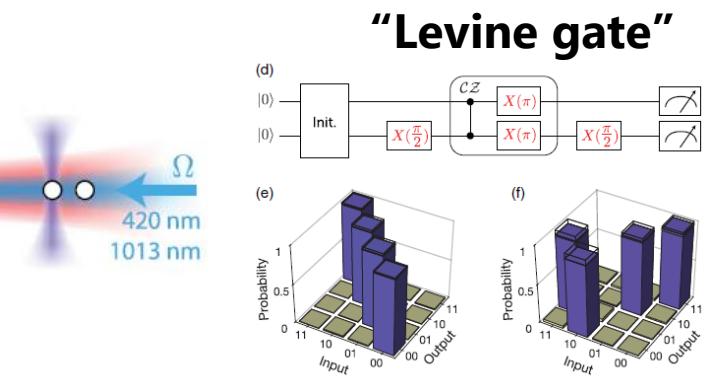
Lukin group, Harvard [H. Levine *et al.*, PRL **123**, 170503 (2019)]

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：ブレークスルー)

→ 2023年 4月 同groupにより
CZ gate fidelity (SPAM corrected) = **99.52(4)%** 達成



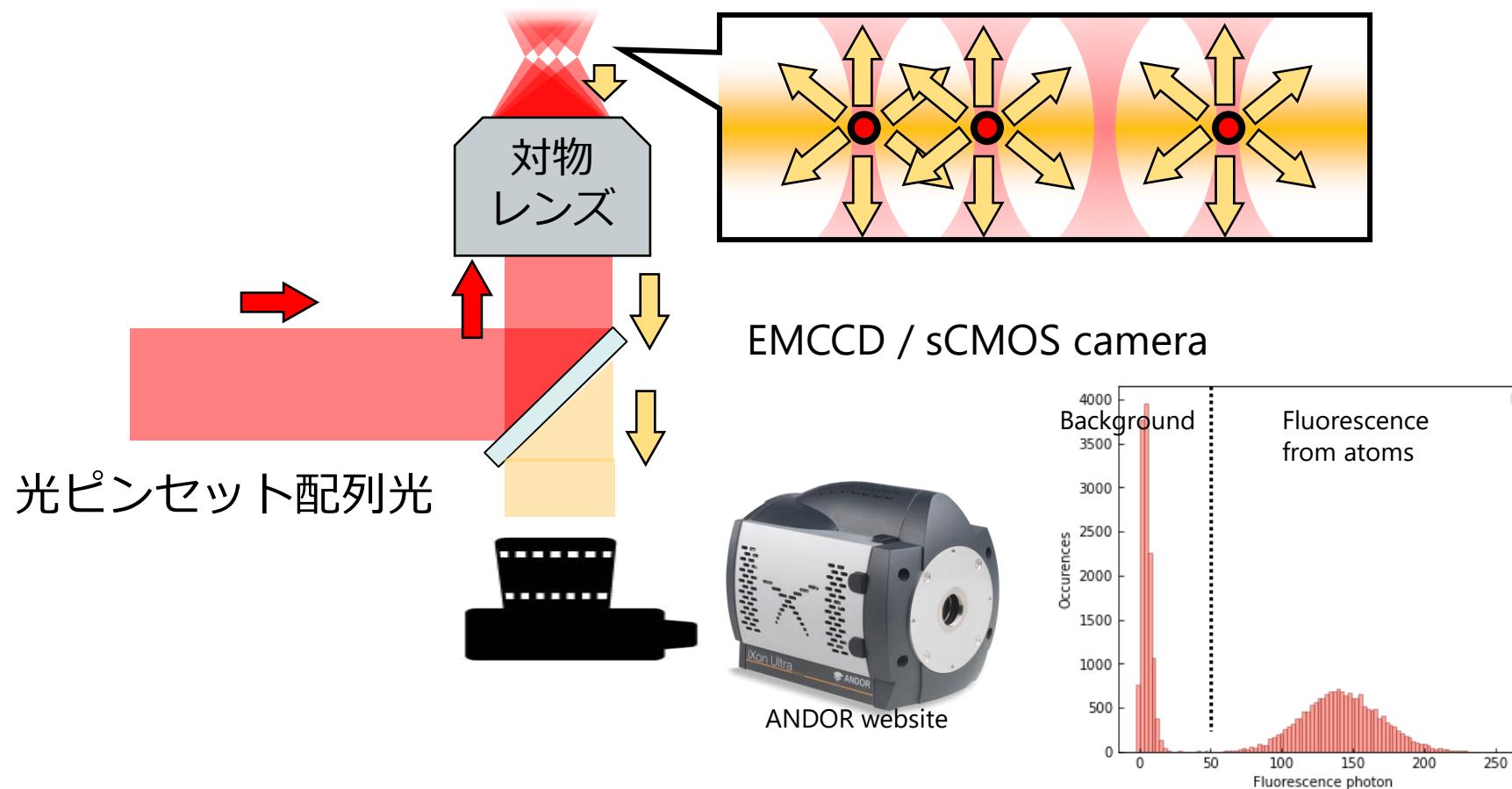
[S. J. Evered *et al.*, Nature **622**, 268 (2023)]

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

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

読み出し

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

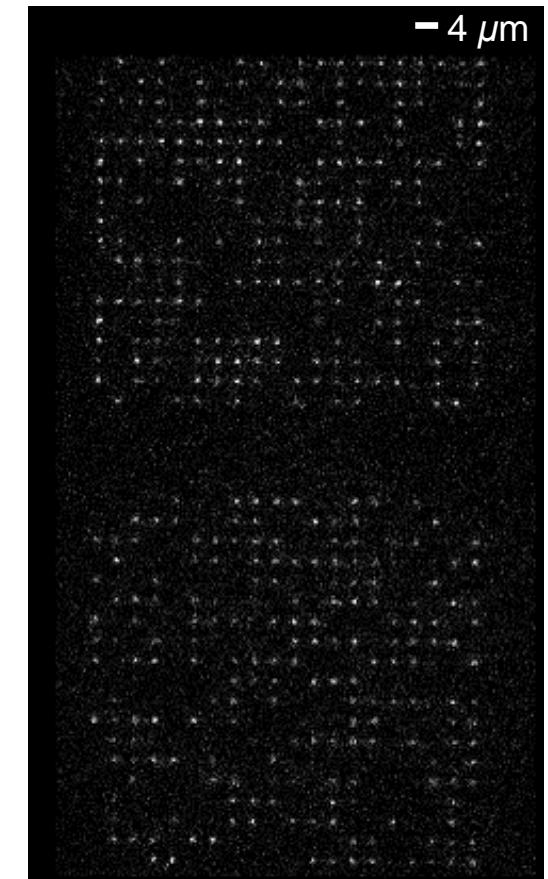


原子が 光っている/光っていない を判定

$|0\rangle$

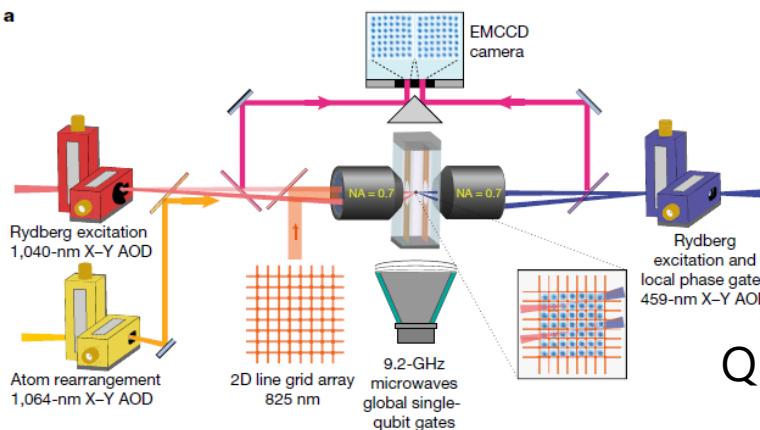
$|1\rangle$

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

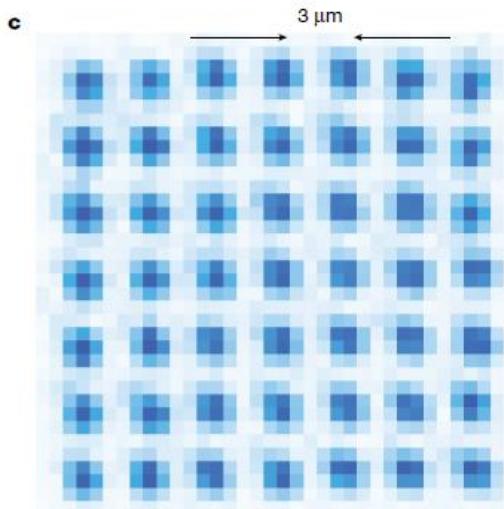


Quantum circuits

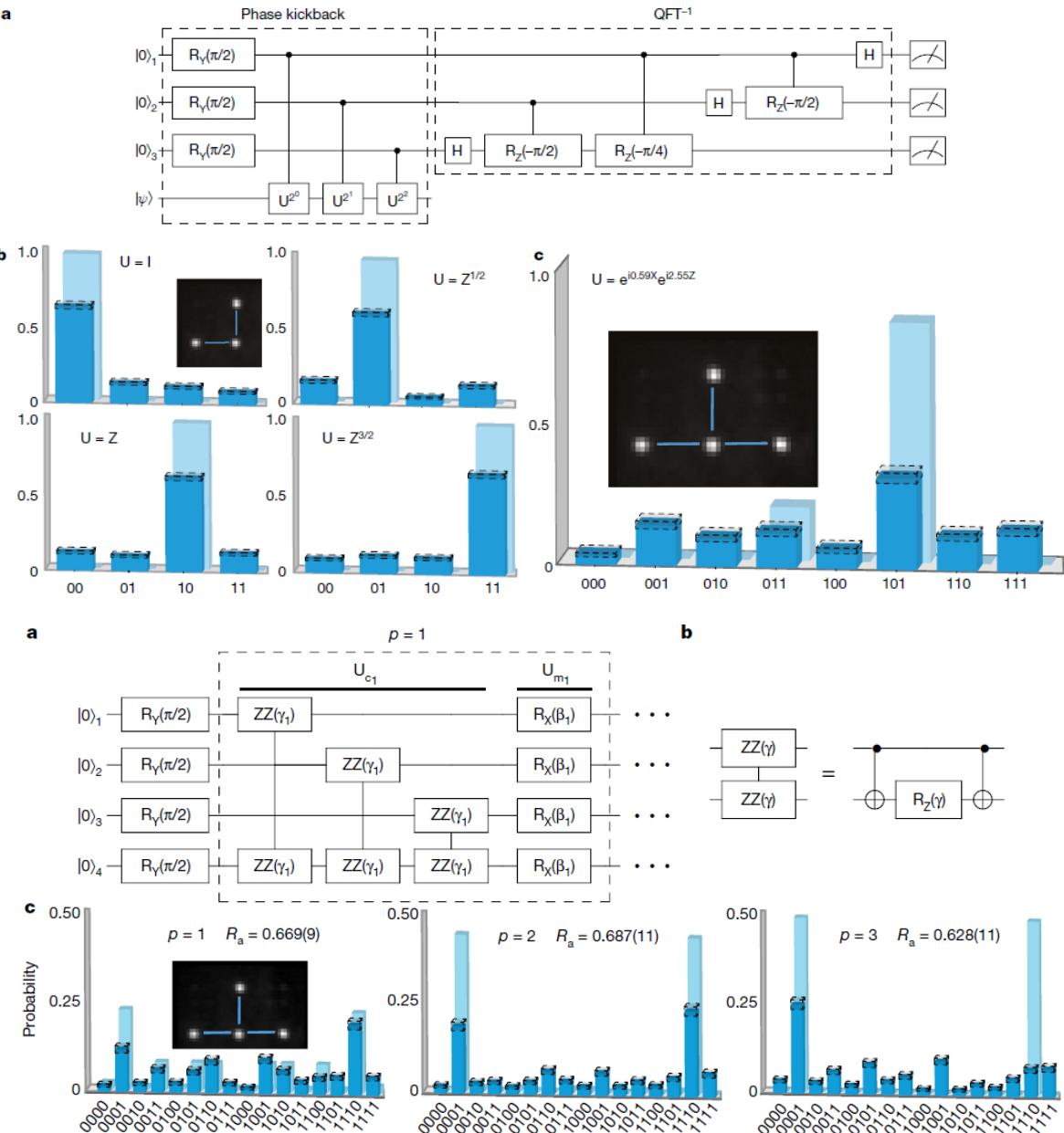
Saffman group, University of Wisconsin-Madison
+ ColdQuanta (Infleqton) [Nature **604**, 457 (2022)]



Quantum phase estimation



QAOA algorithm for solving MaxCut

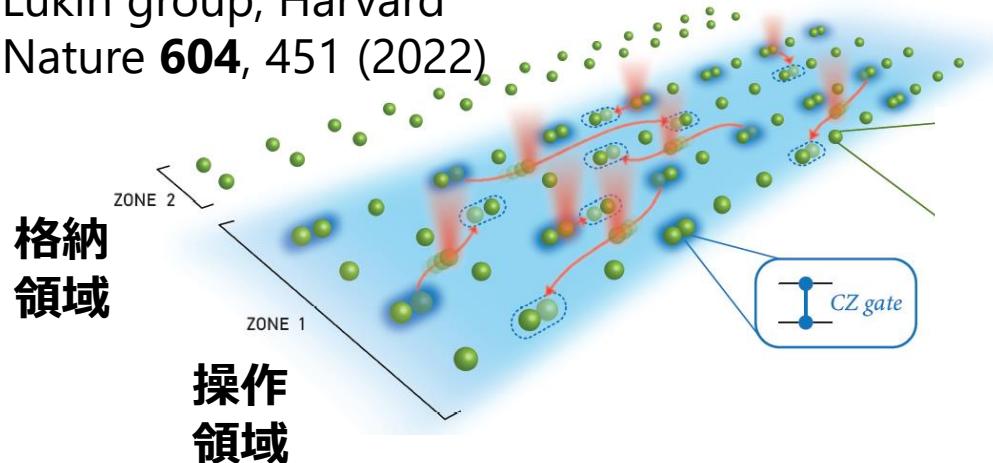


動的光ピンセットによる量子ビット輸送

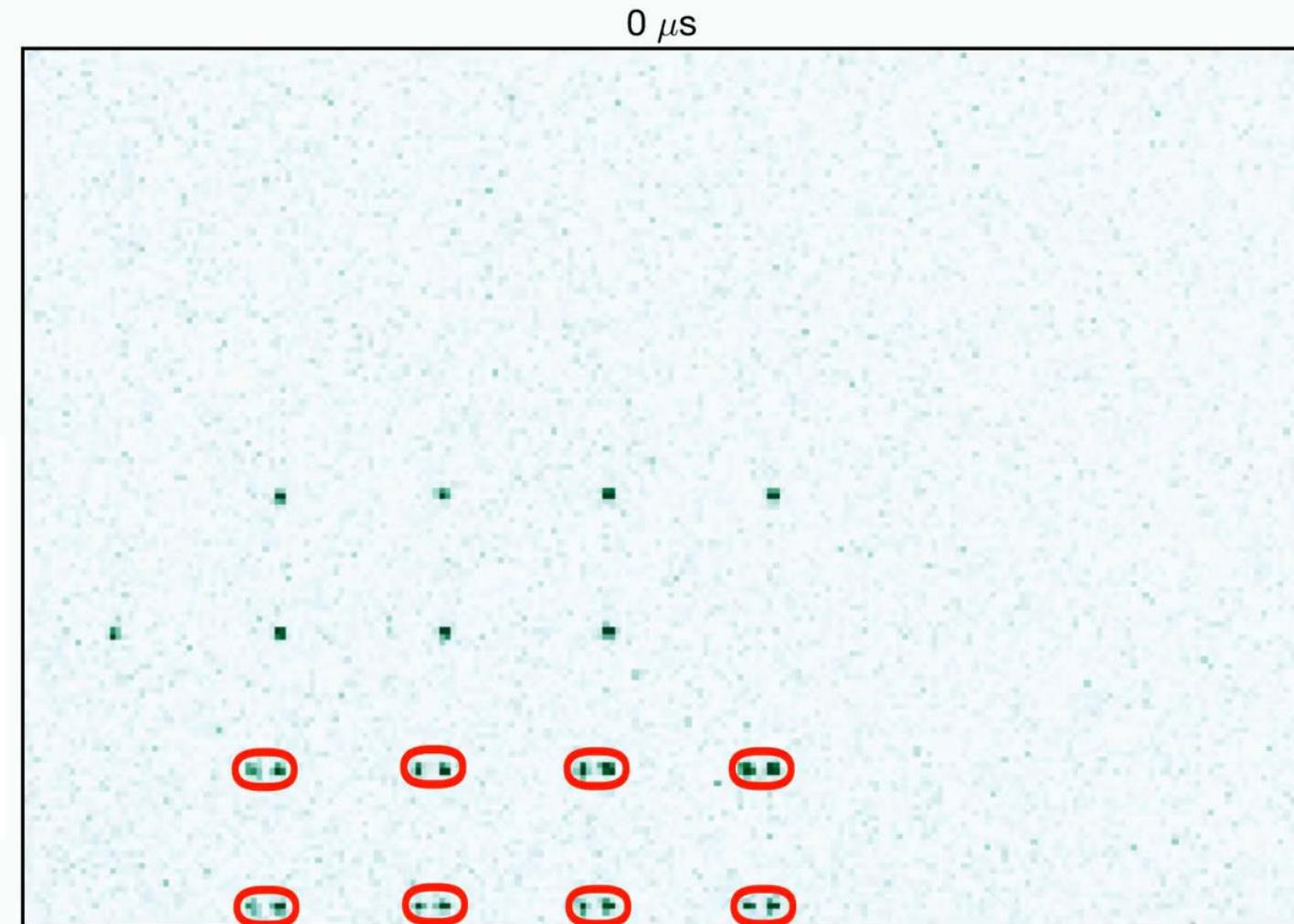
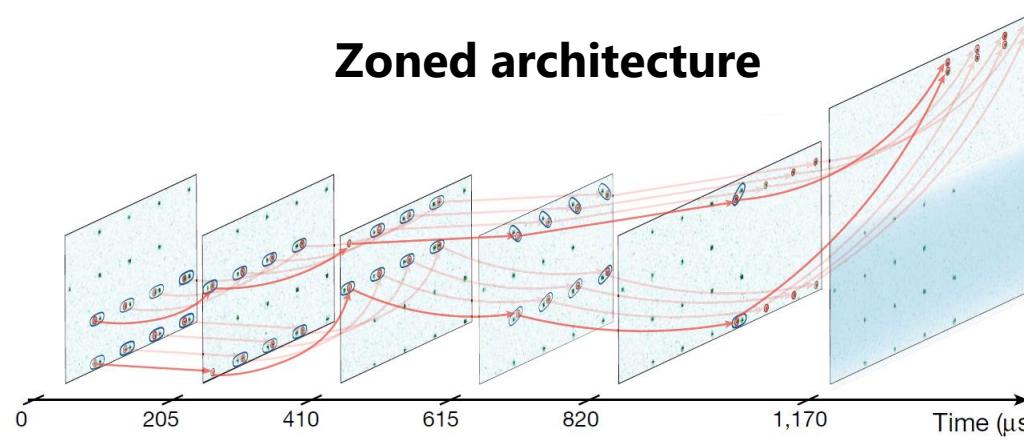
40

Lukin group, Harvard

Nature **604**, 451 (2022)



Zoned architecture

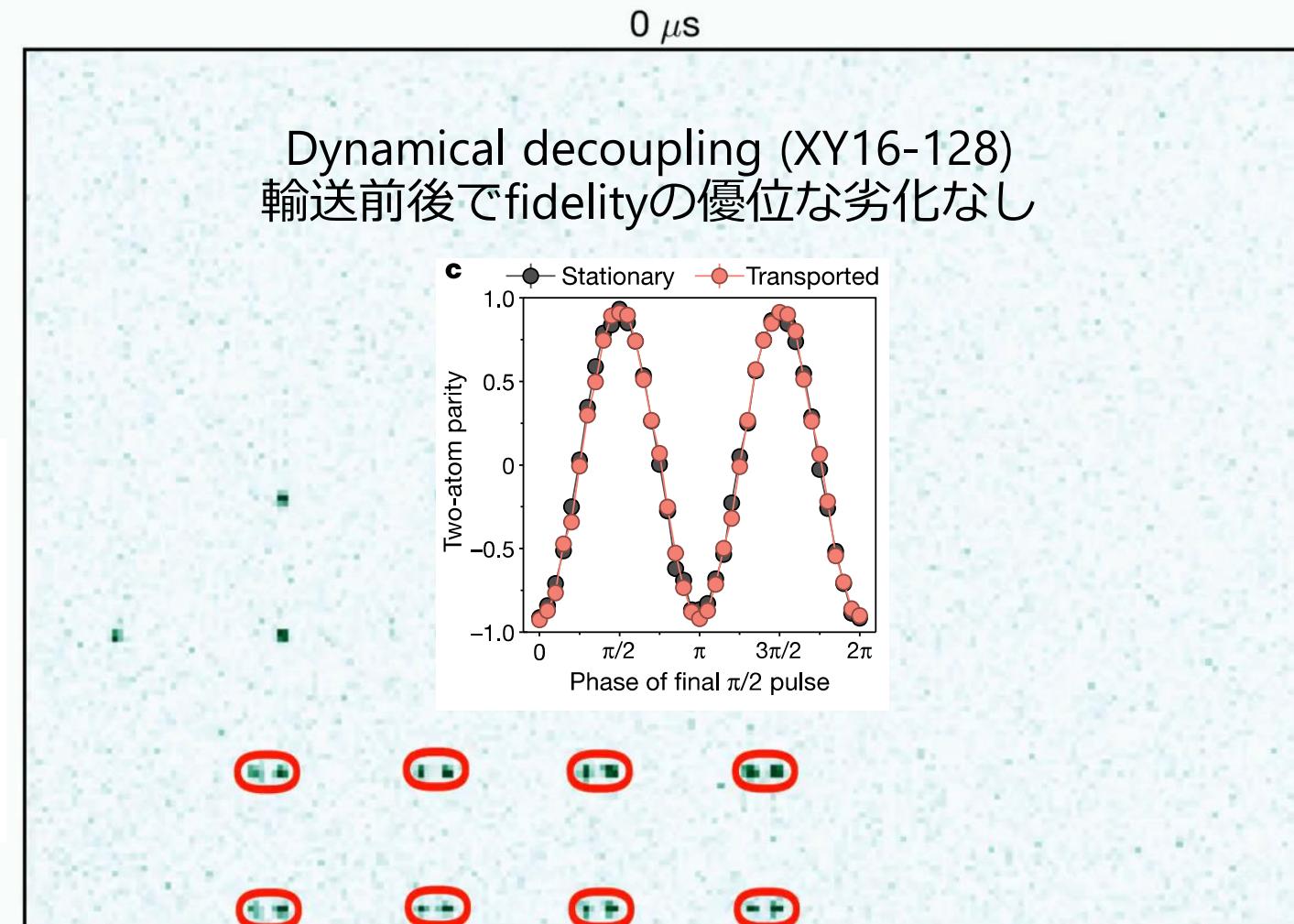
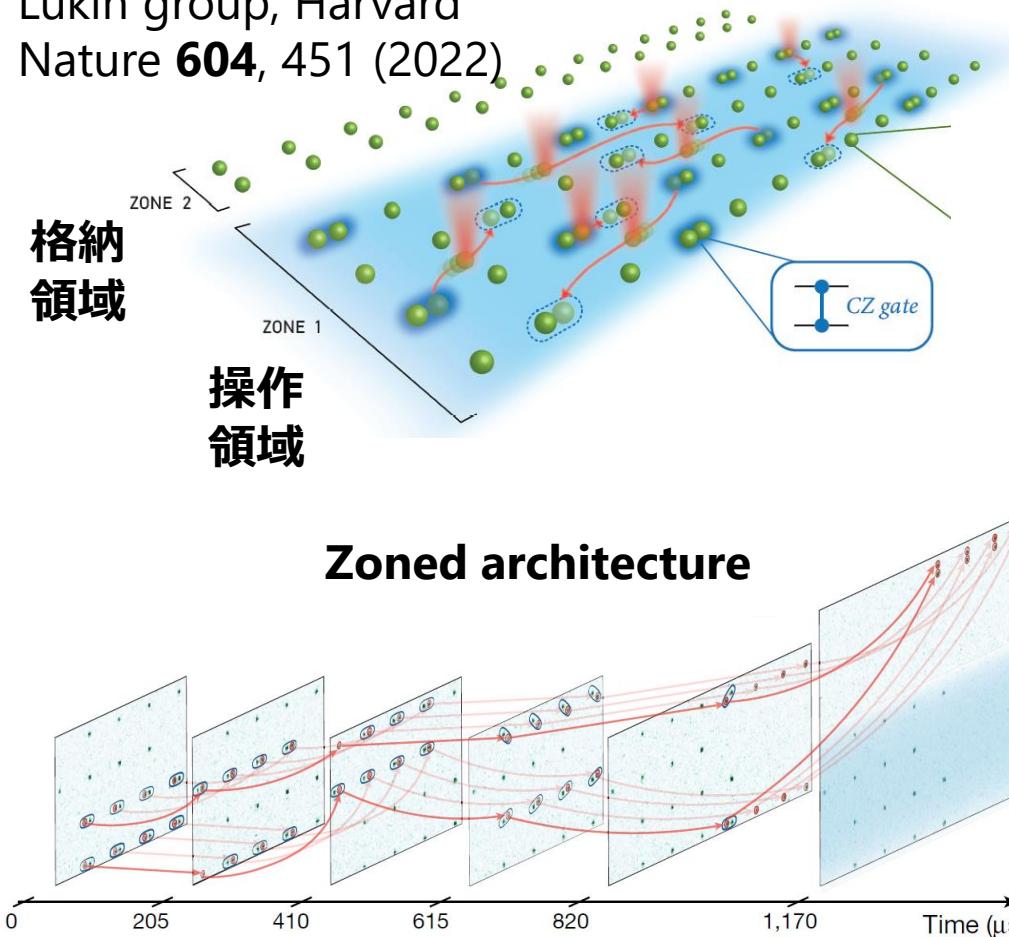


動的光ピンセットにより**全結合**が可能に！

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)



動的光ピンセットにより**全結合**が可能に！

Breaking News!!! Logical quantum processor

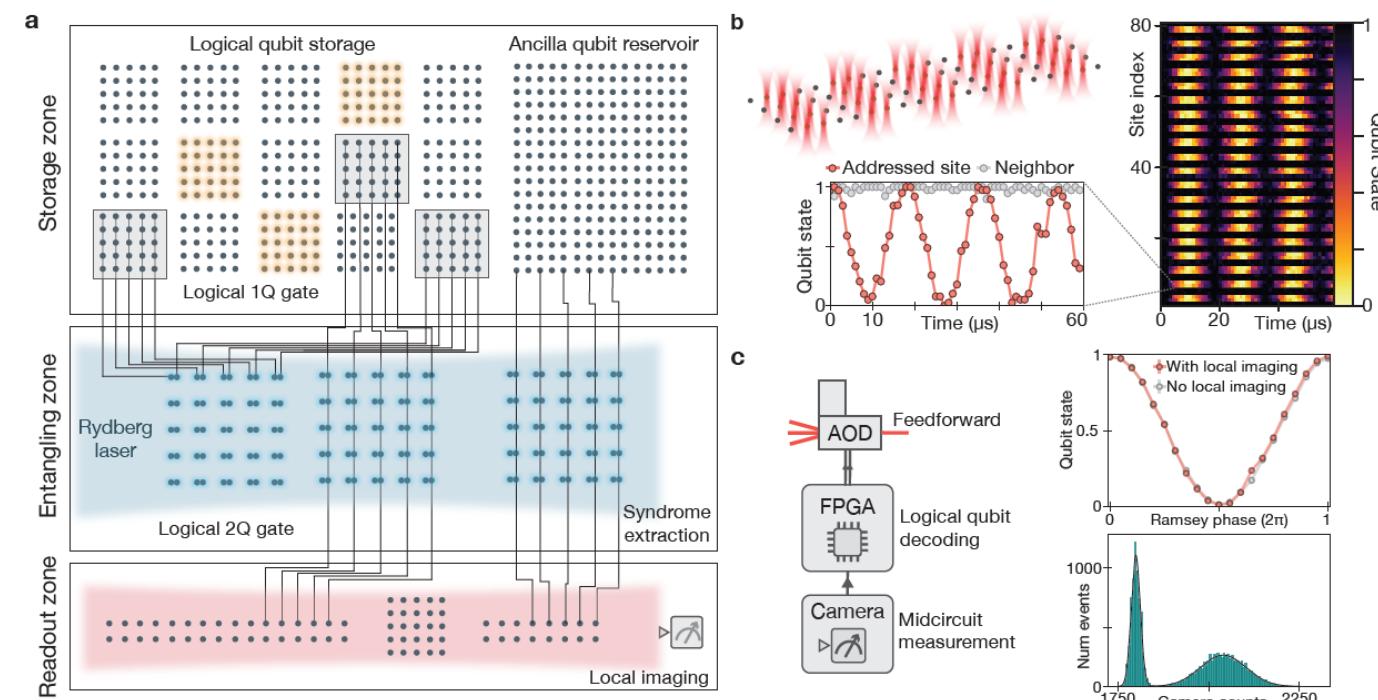
2023年12月

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. ...

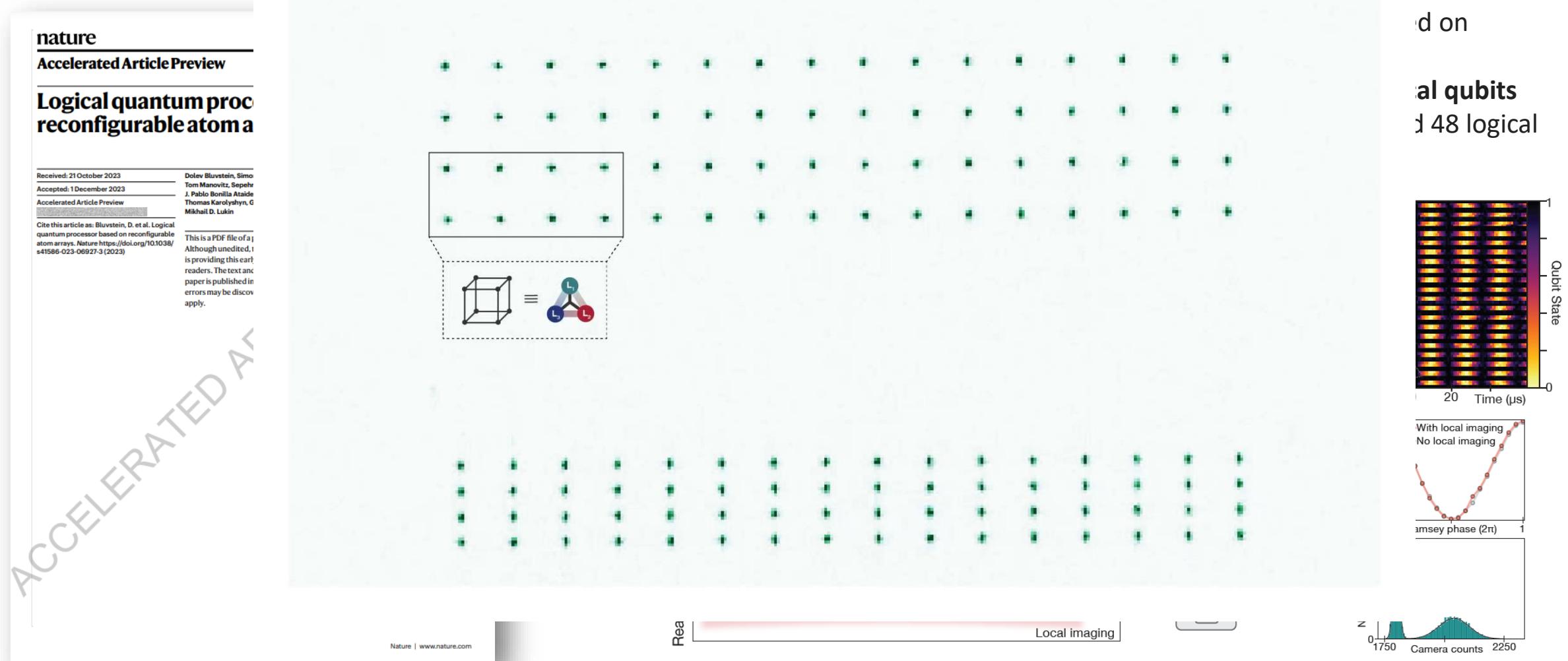


→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).

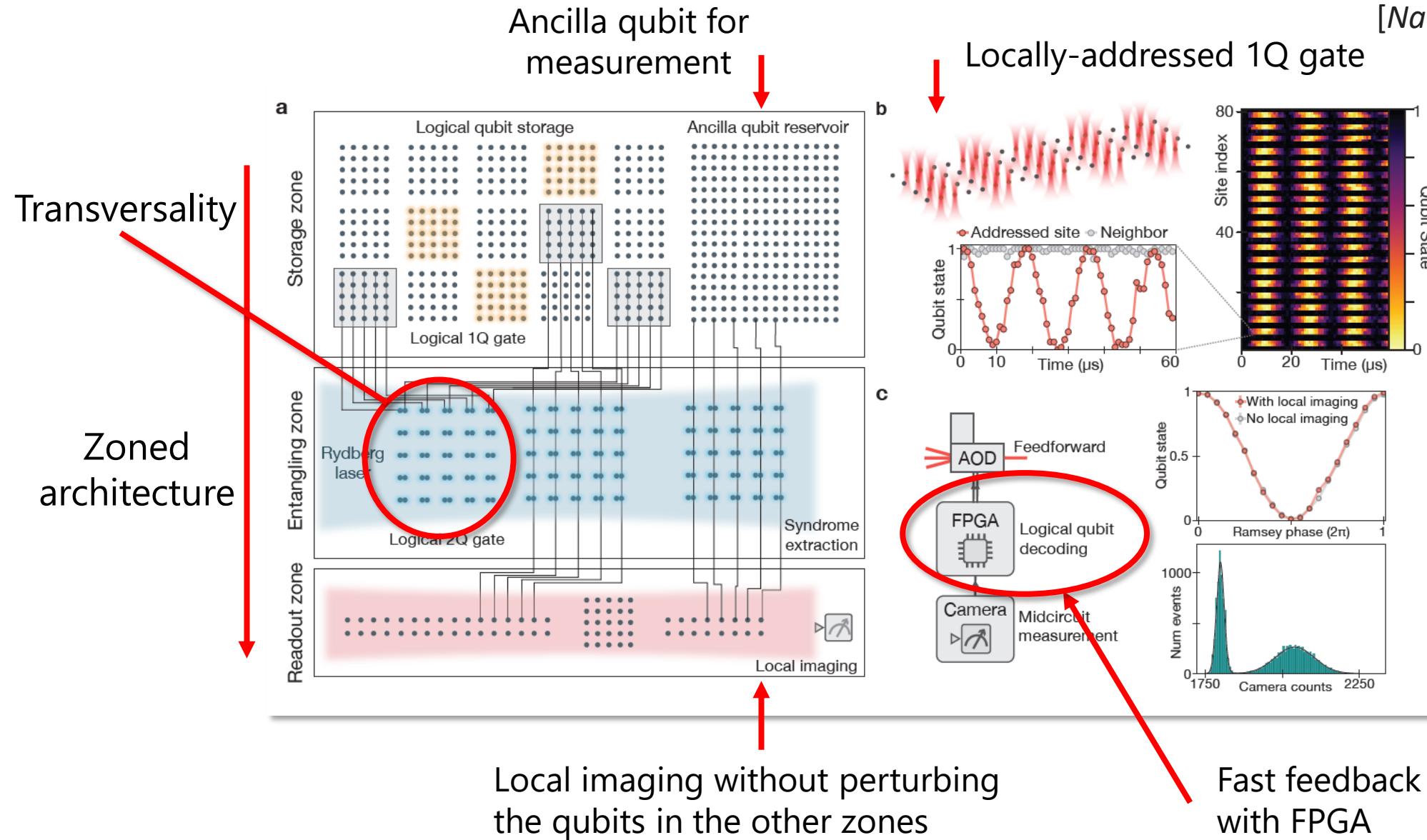
Breaking News!!! Logical quantum processor

2023年12月

Supplementary video

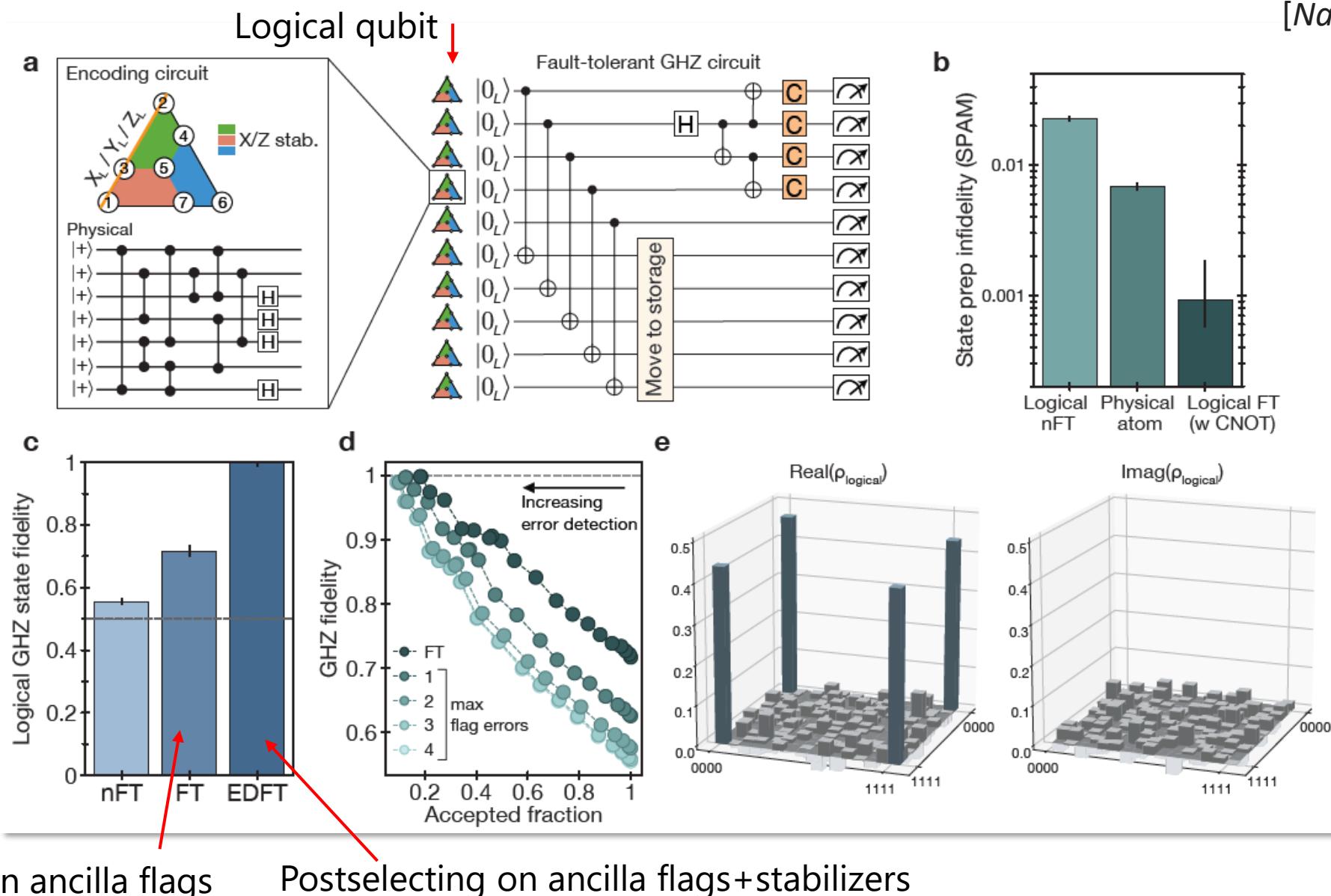


→ Published: D. Bluvstein *et al.* *Nature* **626**, 58 (2023).



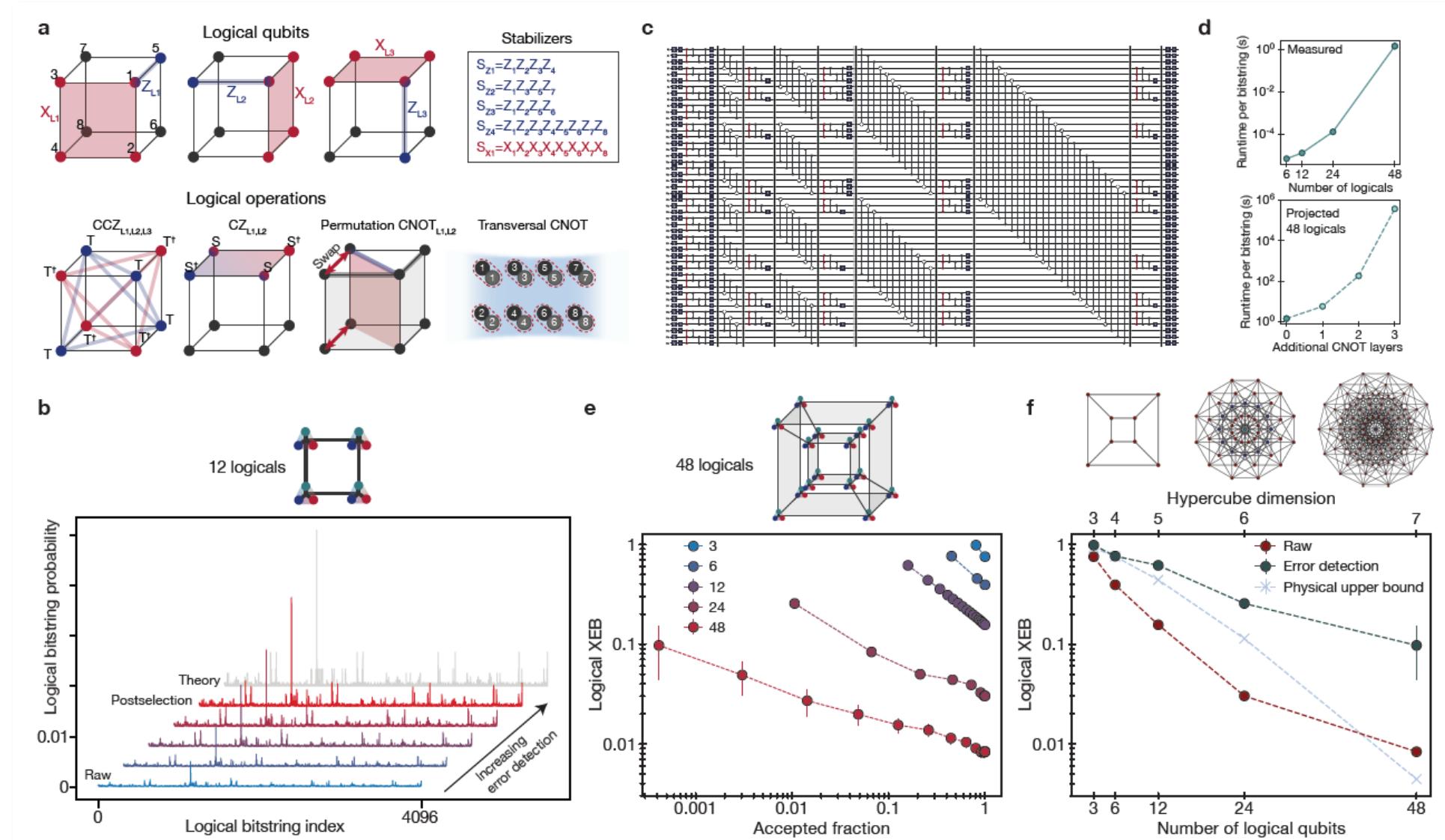
Harvard Lukin group, Bluvstein *et al.*, Nature (2023)

[*Nature* **626**, 58 (2023)]

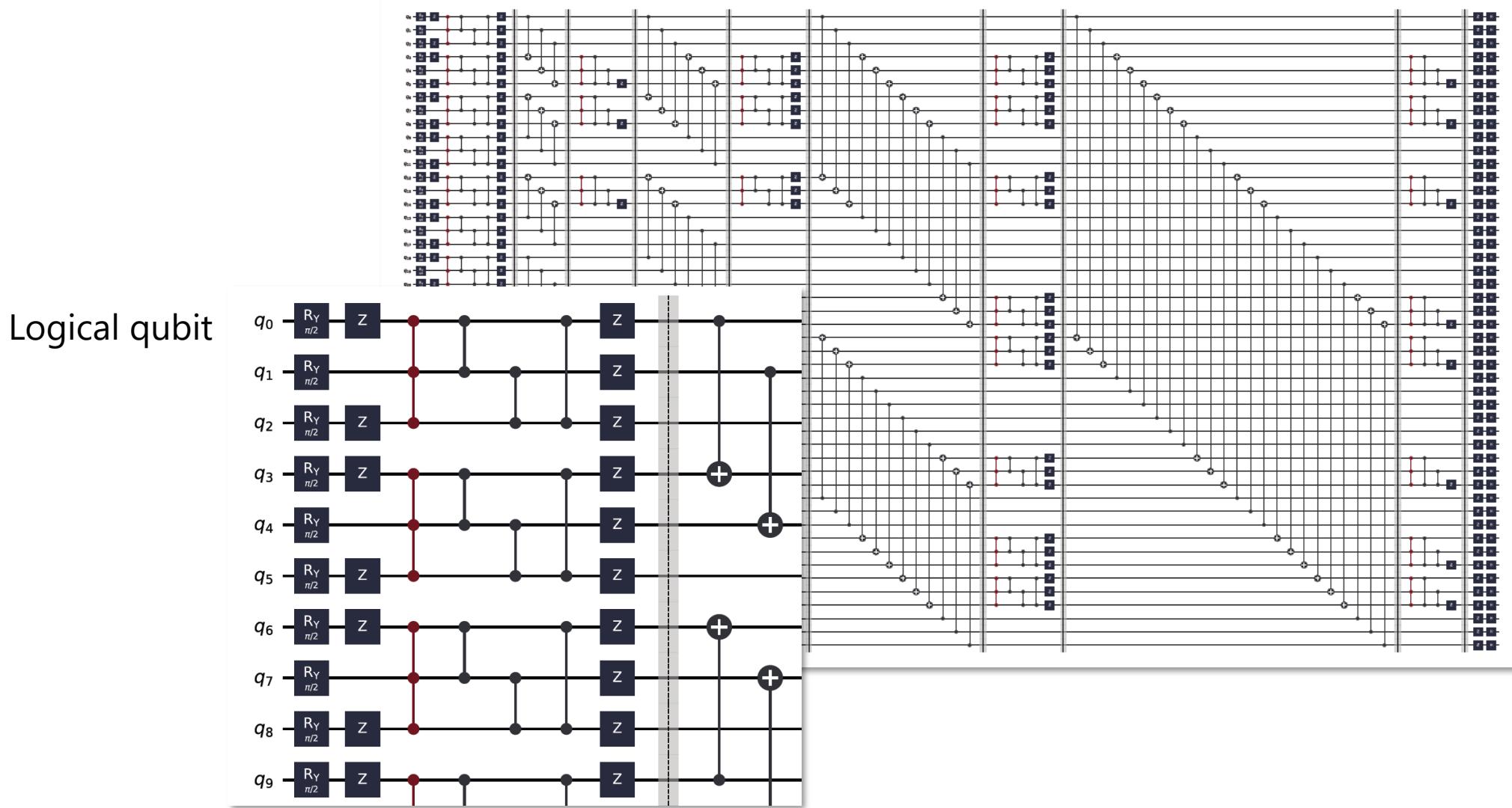


Harvard Lukin group, Bluvstein *et al.*, Nature (2023)

[Nature 626, 58 (2023)]

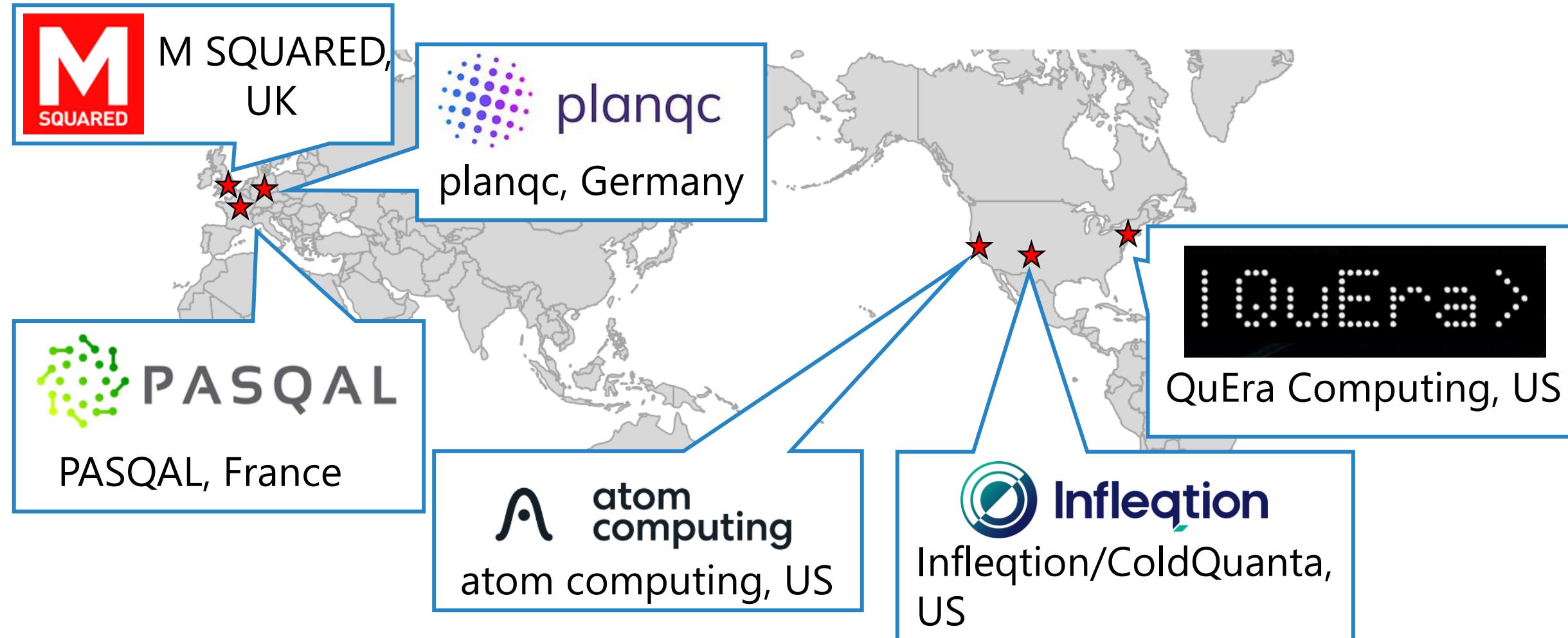


[Nature 626, 58 (2023)]



冷却原子型量子コンピュータ 開発企業

48

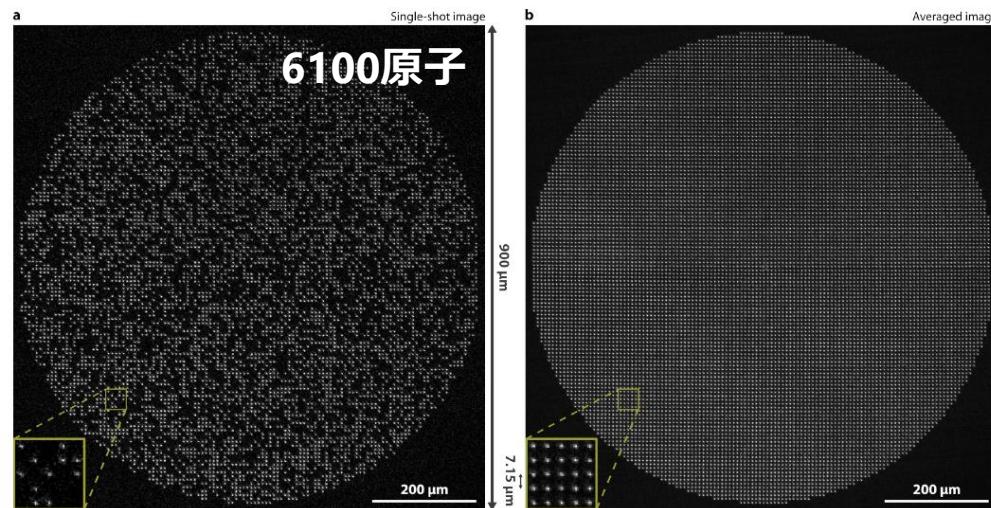


Advantage/Disadvantage + 展望

49

Advantage

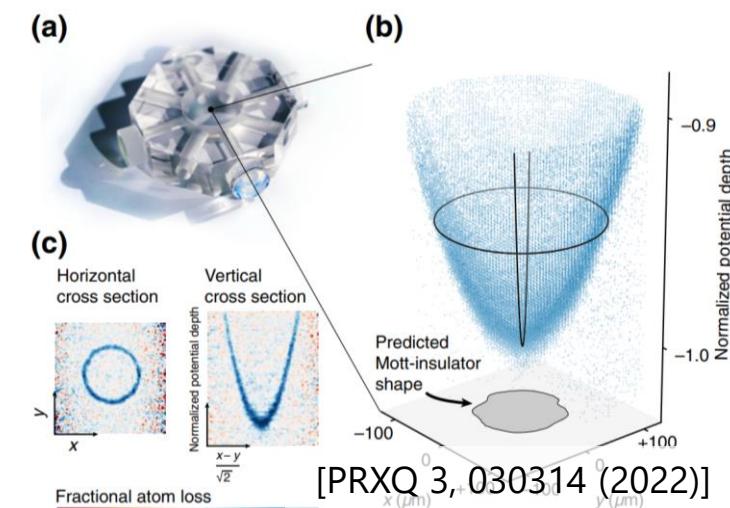
- **Scalability**: マシンサイズを変えず1,000 ~ 10,000原子配列



[Endres group, Caltech arXiv 2403.12021 (2024)]

Key development

- 高出力レーザー
- 光学系デザイン
- 配列アルゴリズム



[PRXQ 3, 030314 (2022)]

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

Advantage/Disadvantage + 展望

50

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?

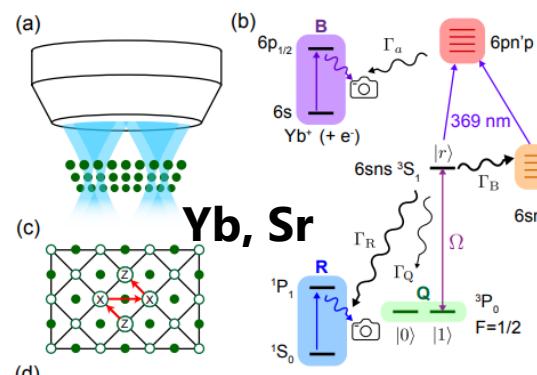
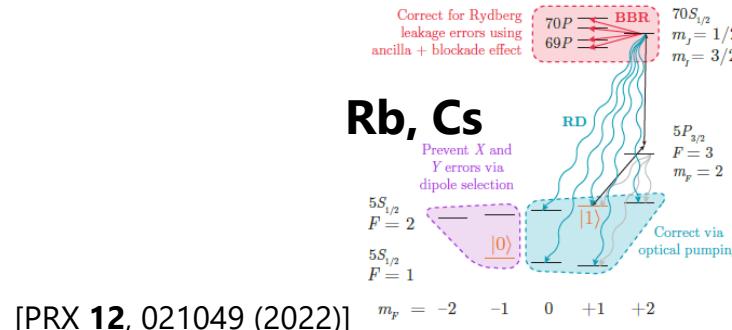
→ 光格子 cavity-enhanced lattice

→ 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

Advantage/Disadvantage + 展望

51

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

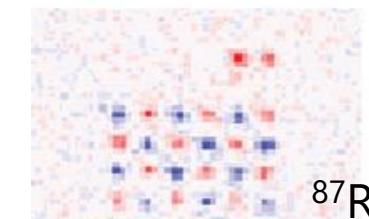
- 光学系デザイン

- 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)]

Advantage/Disadvantage + 展望

52

Disadvantage

- Slow clock speed:

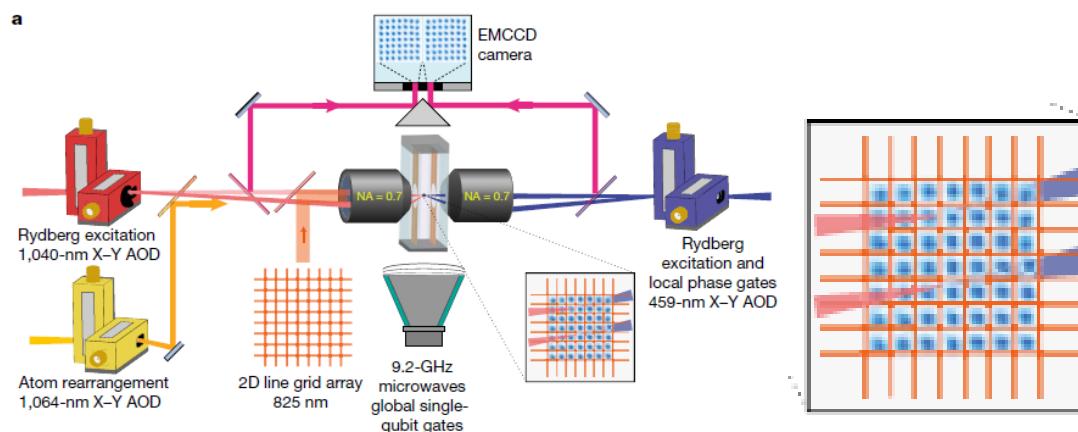
- ゲート: 1 ~ sub μ s
- 測定: 1 ~ sub ms
- 原子輸送: 1 ~ sub ms
- 初期準備: ~10 ms
(原子冷却)

→ 超高速ゲート操作: ~ns **分子研**

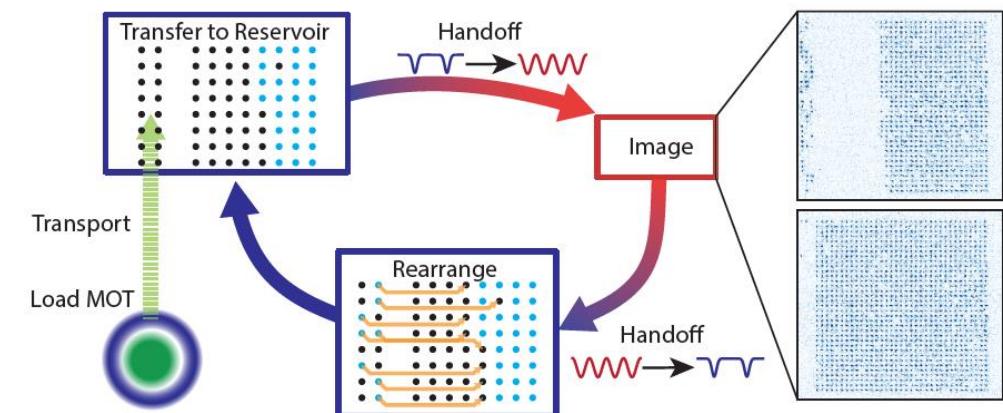
→ Cavity QED?

→ 原子輸送と局所操作の組み合わせ

→ 連続的に原子を供給



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

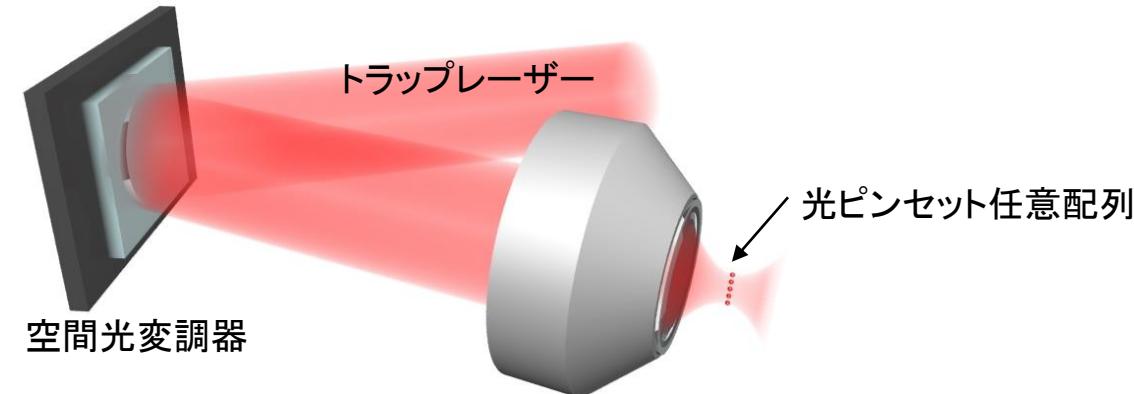


[Atom Computing, Inc., arXiv 2401.16177(2024)]

分子科学研究所での開発

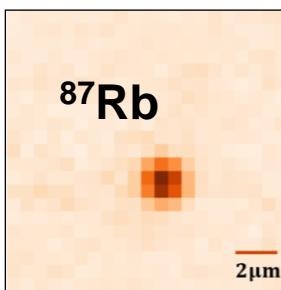
53

2019年～：光ピンセット配列型冷却原子系を開発



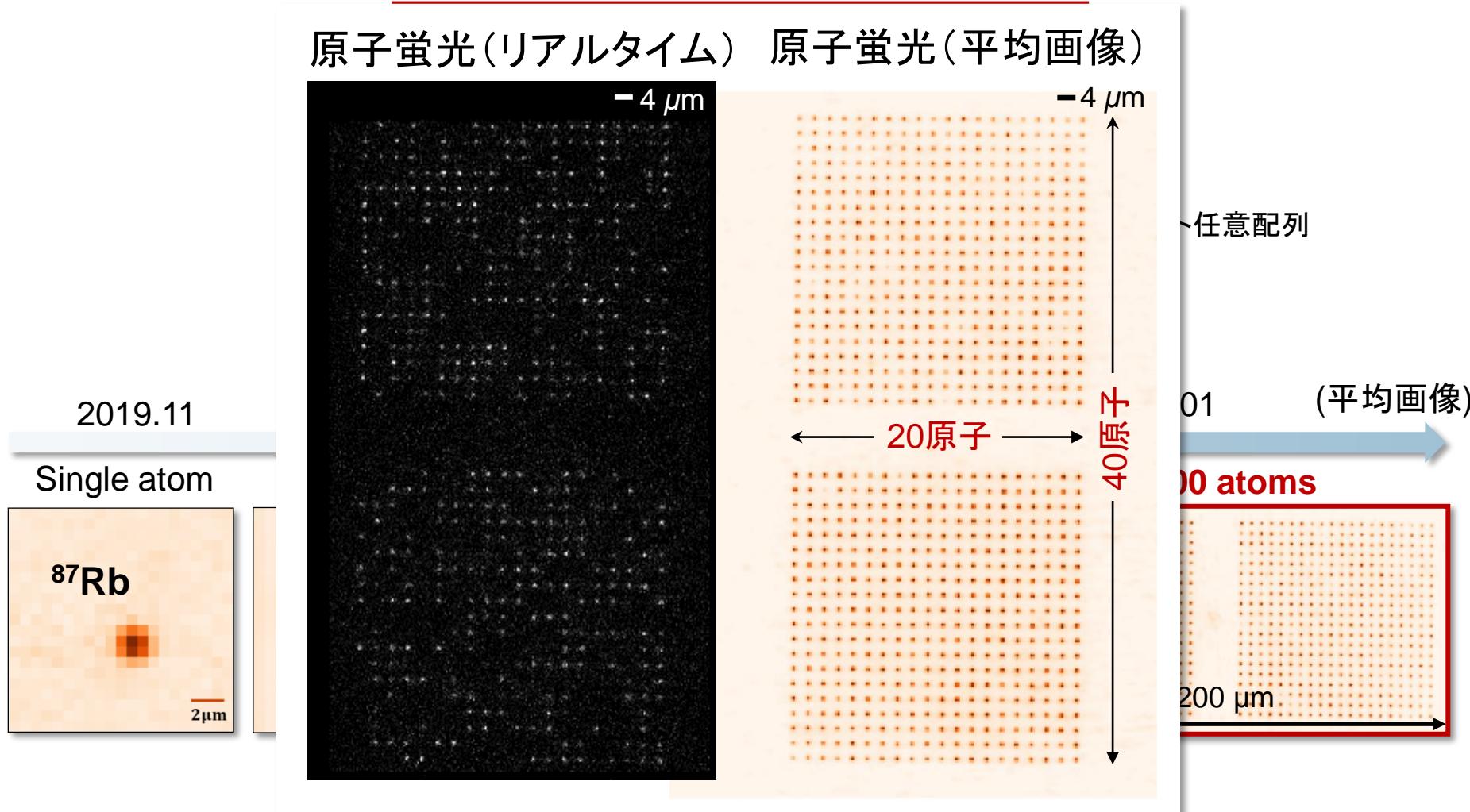
2019.11

Single atom

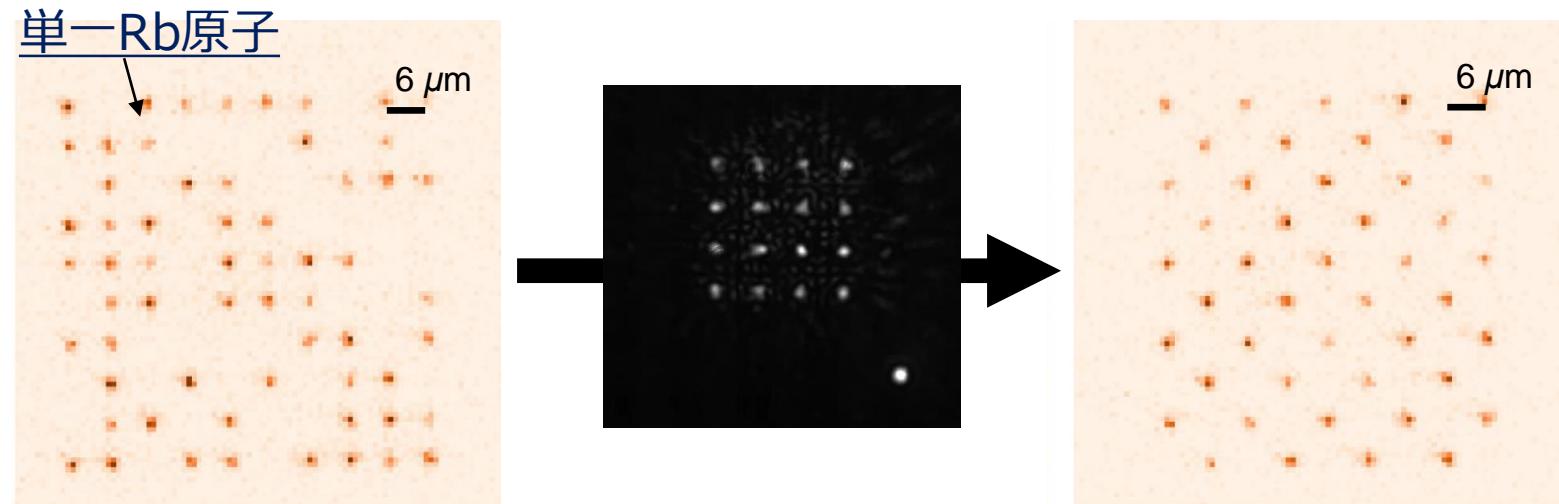


分子科学研究所での開発

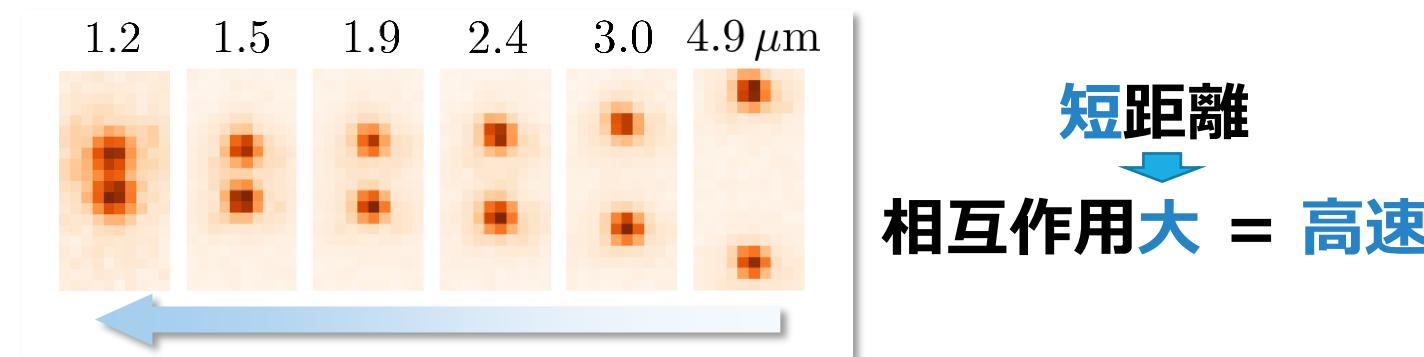
2019年～：光ピンセット配列型冷却原子系を開発
800サイト400原子量子ビット



➤ 動的光ピンセットによる50原子の再配列

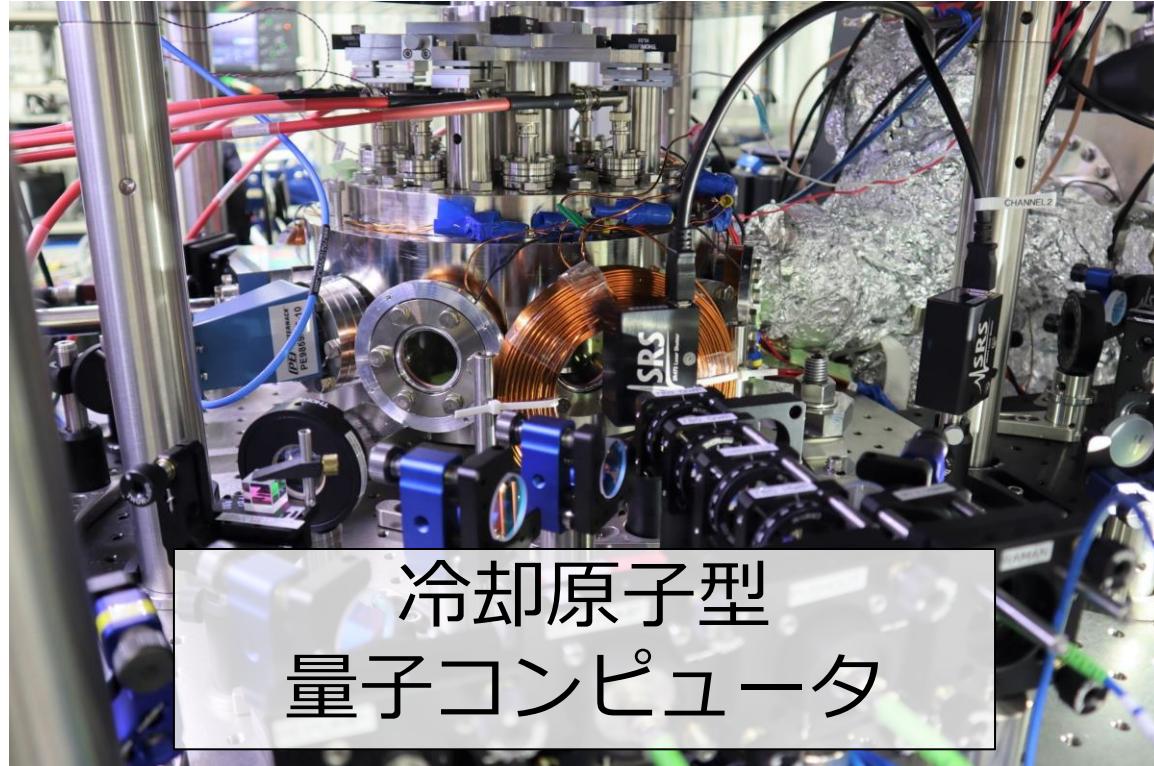


➤ 世界最小間隔原子ペア配列の生成



分子科学研究所での開発

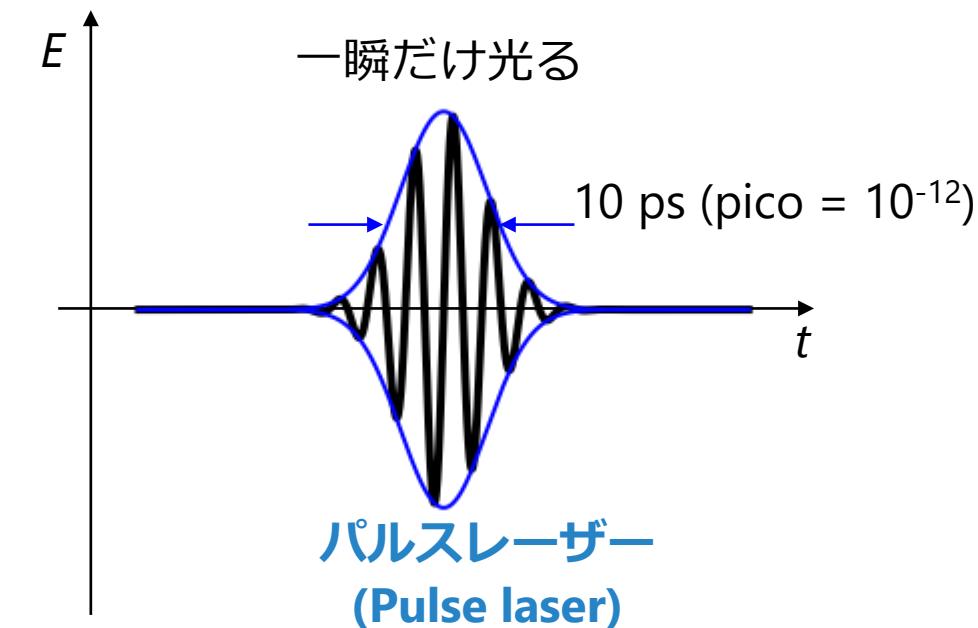
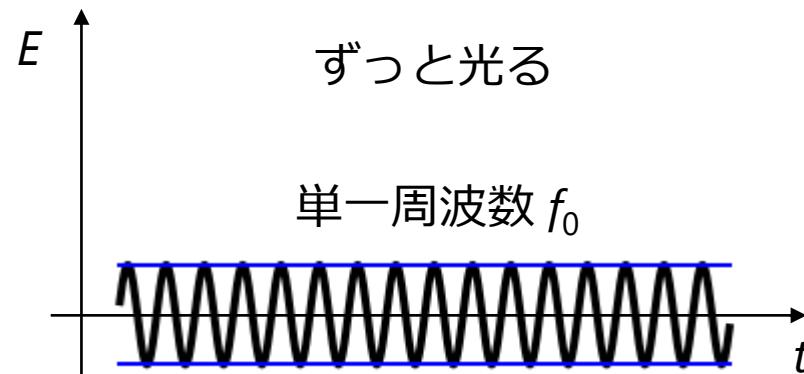
56



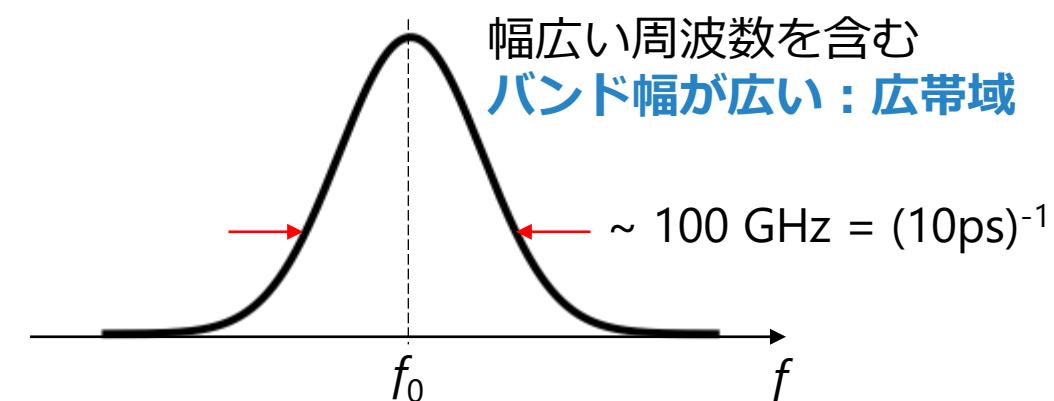
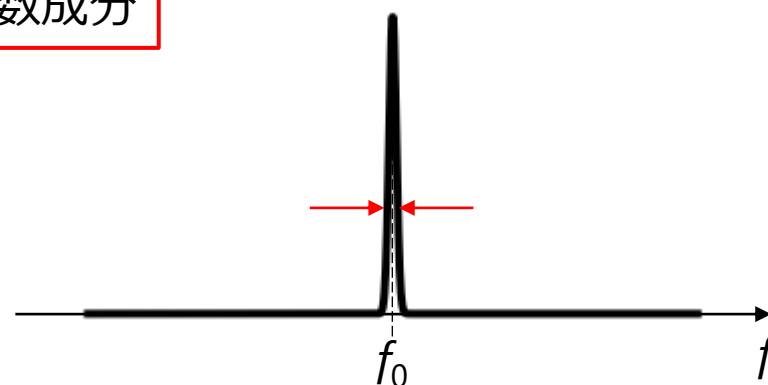
Ultrafast Rydberg physics!

分子科学研究所での研究 – 概要 –

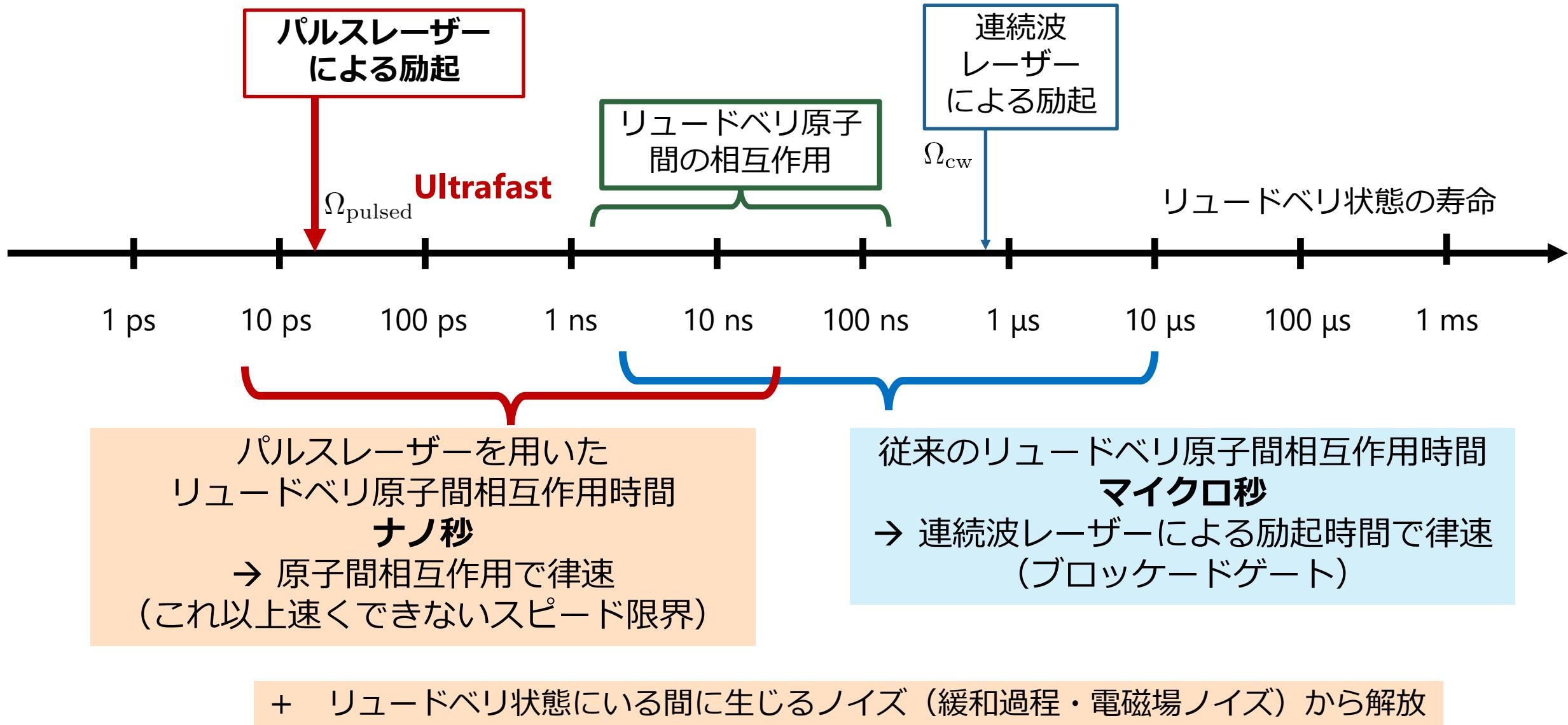
◆ 連続波レーザーとパルスレーザー



周波数成分

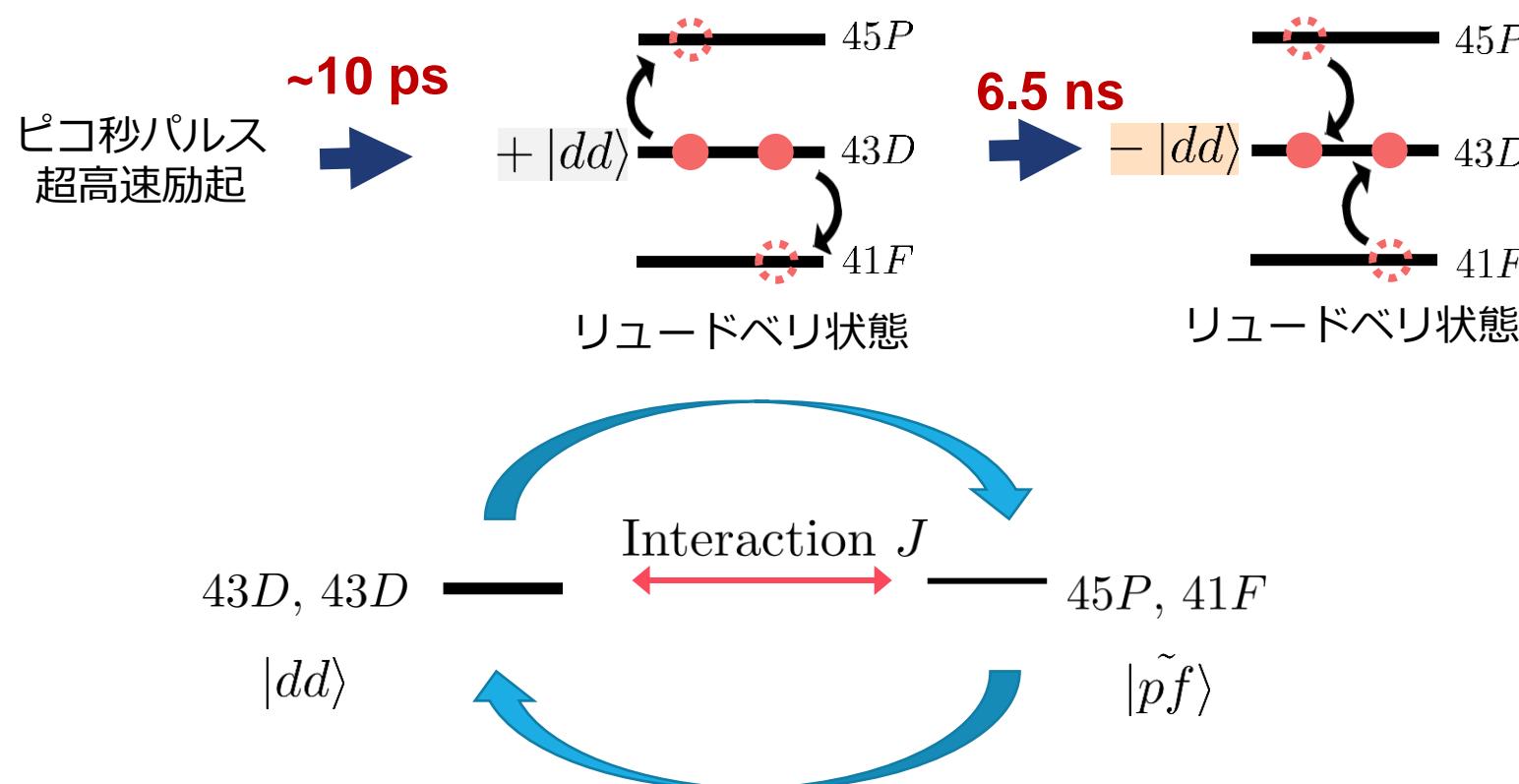


なぜパルスレーザー？

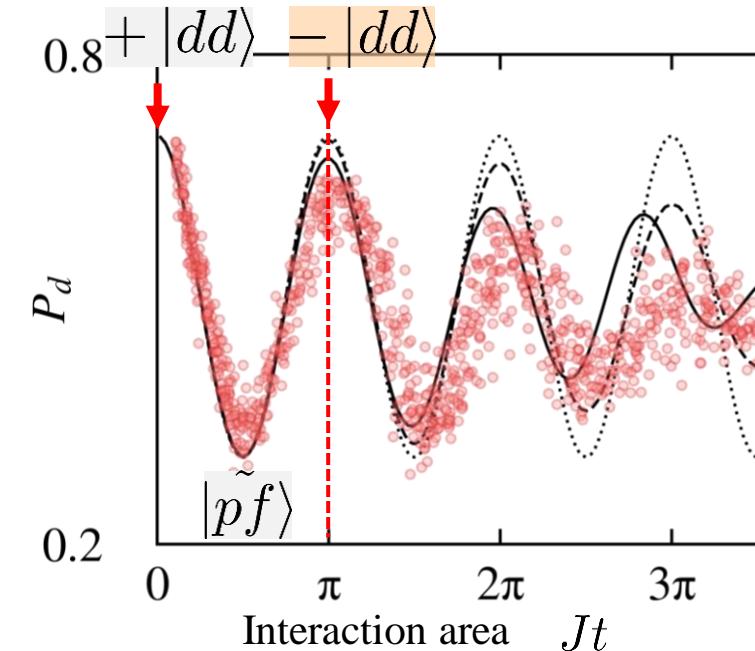


ナノ秒スケールの超高速相互作用

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

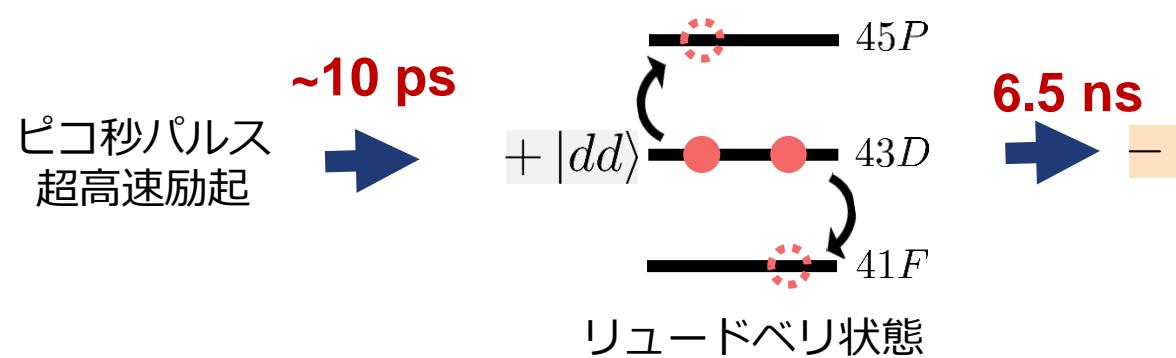


$$|\Psi(Jt = 0)\rangle = |dd\rangle \implies |\Psi(Jt = \pi)\rangle = \cos \pi |dd\rangle - i \sin \pi |\tilde{pf}\rangle = -|dd\rangle$$



ナノ秒スケールの超高速相互作用

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



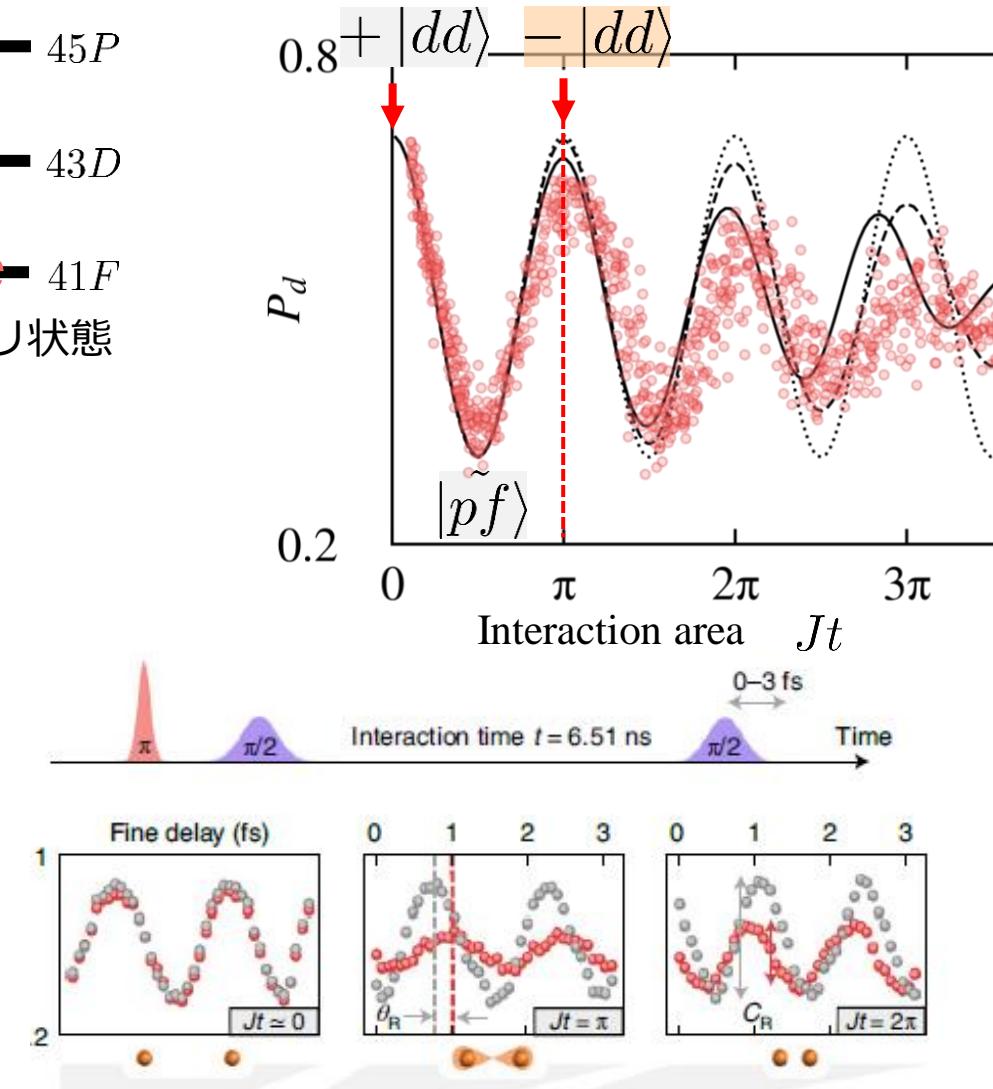
$$(|g\rangle + |d\rangle) \otimes (|g\rangle + |d\rangle) = |gg\rangle + |dg\rangle + |gd\rangle + |dd\rangle$$

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

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

CZゲート!

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



ここから、新・未来へ



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/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



Photographer : Katsuhiko Hori

自然科学研究機構 分子科学研究所
教授／研究主幹

大森 賢治

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



自然科学研究機構 分子科学研究所
助教

Sylvain de Léséleuc

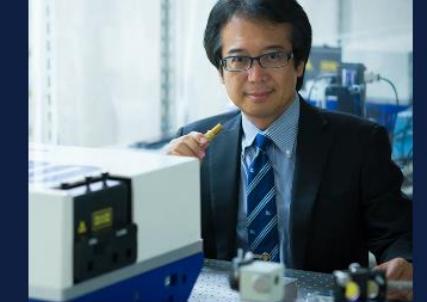
Novel techniques and tools for high-fidelity operation of a cold-atom based, fault-tolerant, quantum computer



自然科学研究機構 分子科学研究所
助教

富田 隆文

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



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

平等 拓範

高安定・高強度小型集積レーザーシステムの研究開発



京都大学 大学院理学研究科
教授

高橋 義朗

イッタルビウム原子アレー型誤り耐性量子コンピュータ開発



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

福原 武

ストロンチウム原子アレーを用いた量子ビットの開発



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

吉村 地尋

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



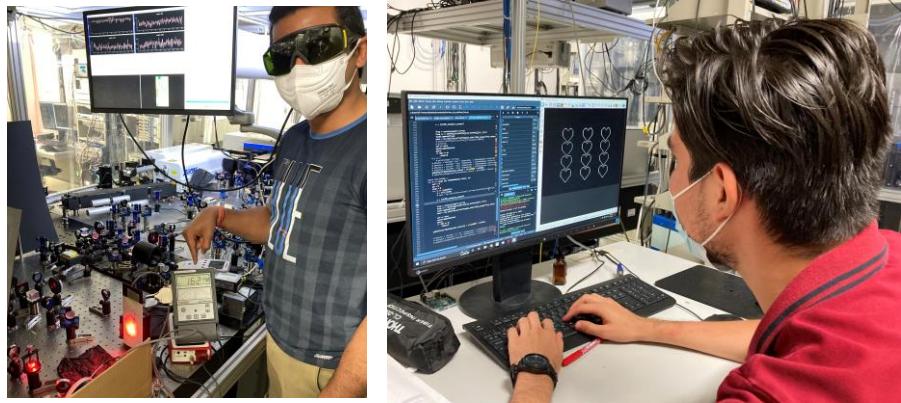
Thomas Noel

Inflection (ColdQuanta)
Vice President for Quantum Computing

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

学生・研究者募集！

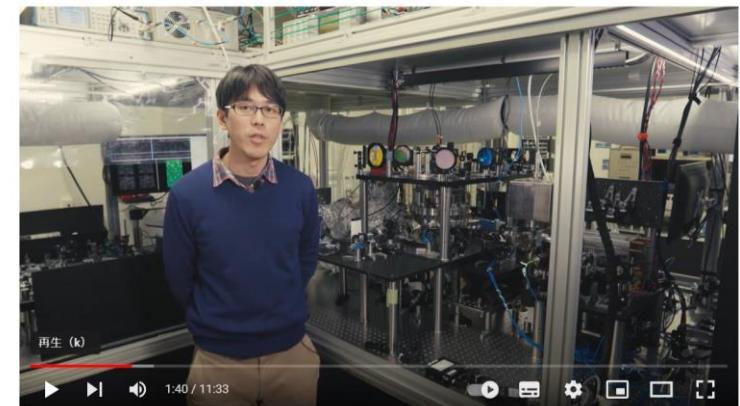
大森賢治グループ@分子科学研究所



- 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...

【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

授業動画@youtube

量子技術教育プログラム (QEduプロジェクト)

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