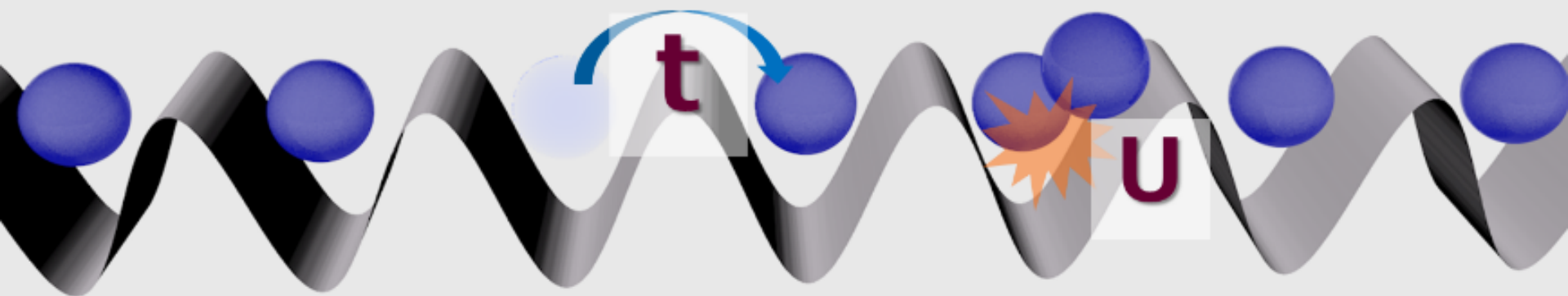


冷却原子 量子シミュレーション



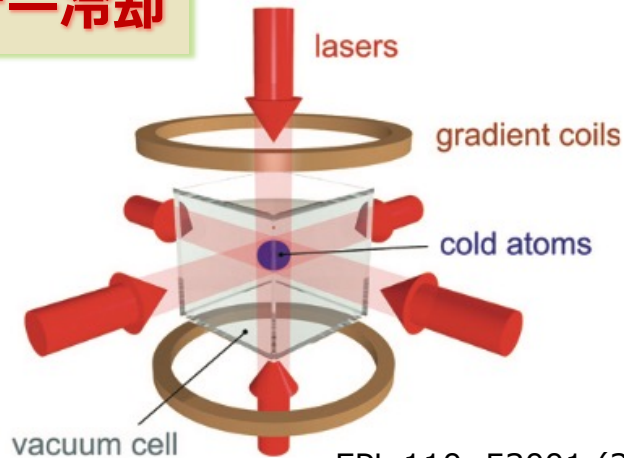
福原 武



理化学研究所 量子コンピュータ研究センター
量子多体ダイナミクス研究ユニット

冷却原子：光で原子を冷やす・操る

レーザー冷却



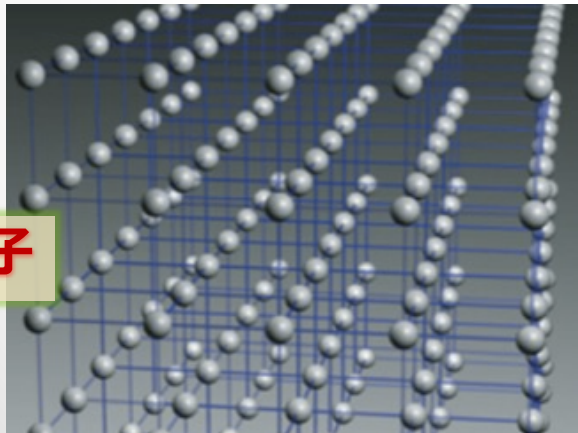
EPL 110, 53001 (2015)

レーザー光を用いて原子気体を
温度 $T \leq 100 \mu\text{K}$ まで瞬時 (≤ 1 秒) に冷却

原子数 $N > 10^8$
密度 $n = 10^{10} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

超低温の原子集団を数百nm間隔に配置

光格子



量子気体顕微鏡



単一原子レベルで原子を操作

本日のお話

1. 冷却原子実験

光格子

多数の原子の準備

量子気体顕微鏡

単一原子の測定・操作

リュードベリ原子

原子間の相互作用

光ピンセットアレイ

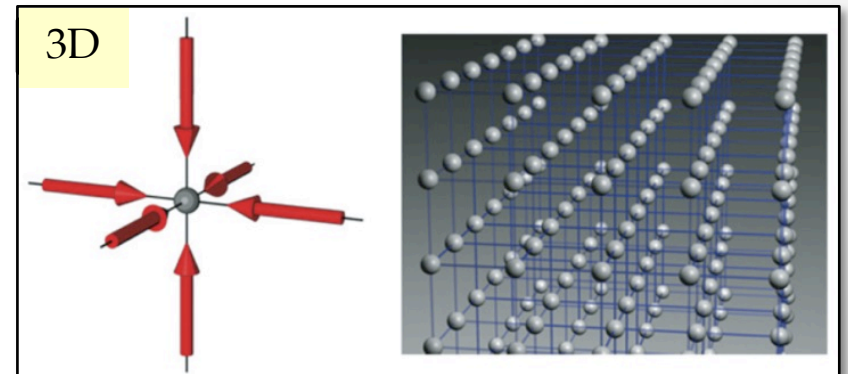
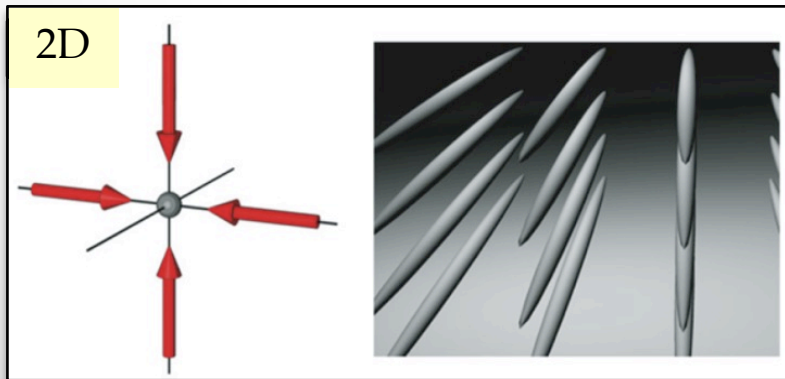
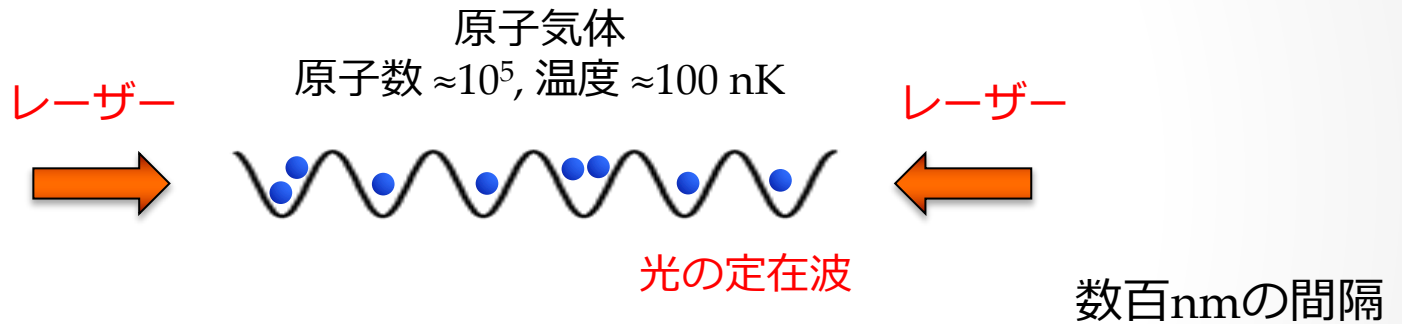
多数の原子の準備（別の方法）

2. 量子シミュレーション

光格子

光格子：光シュタルクシフトにより原子に形成された周期的なポテンシャル

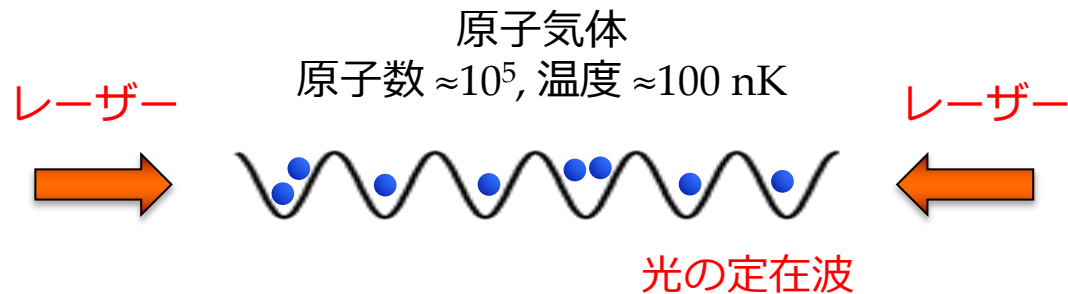
光シュタルクシフト \propto 光の強度



光格子

光格子：光シュタルクシフトにより原子に形成された周期的なポテンシャル

光シュタルクシフト \propto 光の強度



光格子系の特長

- 格子欠陥などの存在しない**理想的なシステム**
- システムの**パラメータ**や**次元**が**制御可能**
- **大規模化可能**
- **散逸**や**デコヒーレンス**が少ない

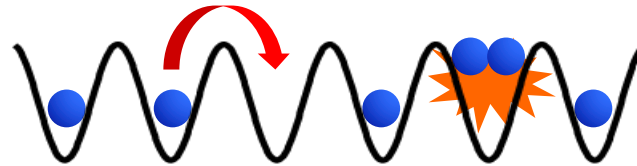
ハバード模型

光格子中の極低温原子 ハバード模型で記述される

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$

トンネリング：J 相互作用：U

*ここではボース原子を考えているのでボース・ハバード模型



トンネリング J：光格子のポテンシャル深さ（光の強度に比例）で調整

相互作用 U：原子間相互作用を磁場によるフェッシュバツハ共鳴で制御

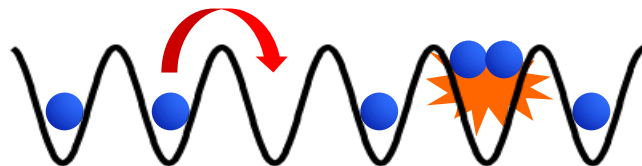
ハバード模型

光格子中の極低温原子 ハバード模型で記述される

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$

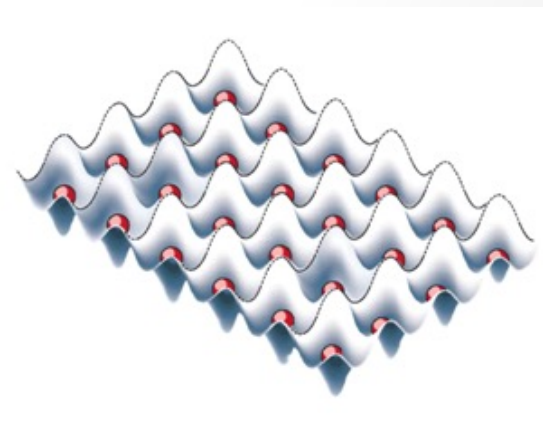
トンネリング：J 相互作用：U

*ここではボース原子を考えているのでボース・ハバード模型



トンネリングが支配的 ($J \gg U$) 超流動状態

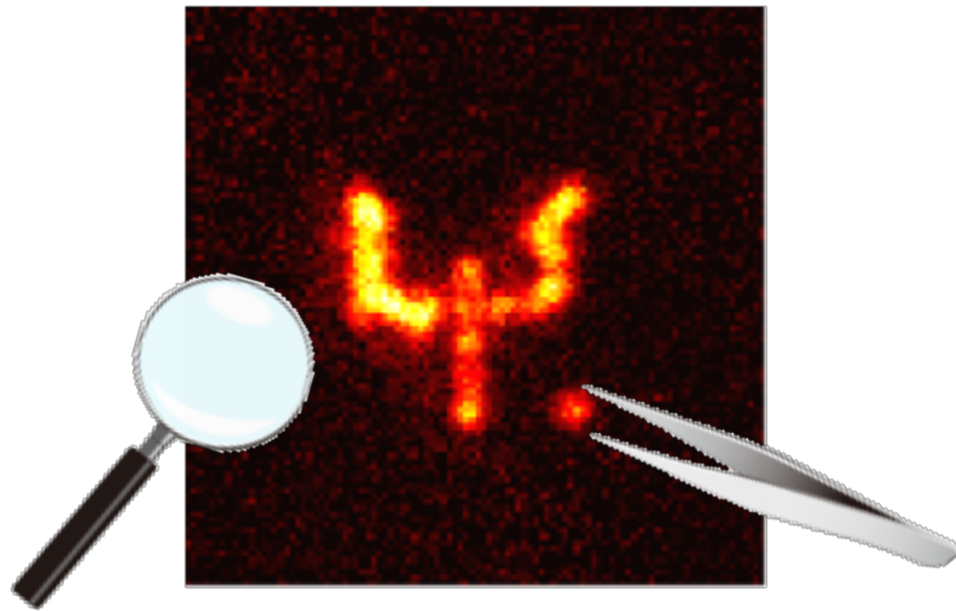
相互作用が支配的 ($U \gg J$) モット絶縁体状態



原子が1個ずつ入る

量子気体顕微鏡

光格子中の量子気体に対する
単一原子レベルでの測定や操作



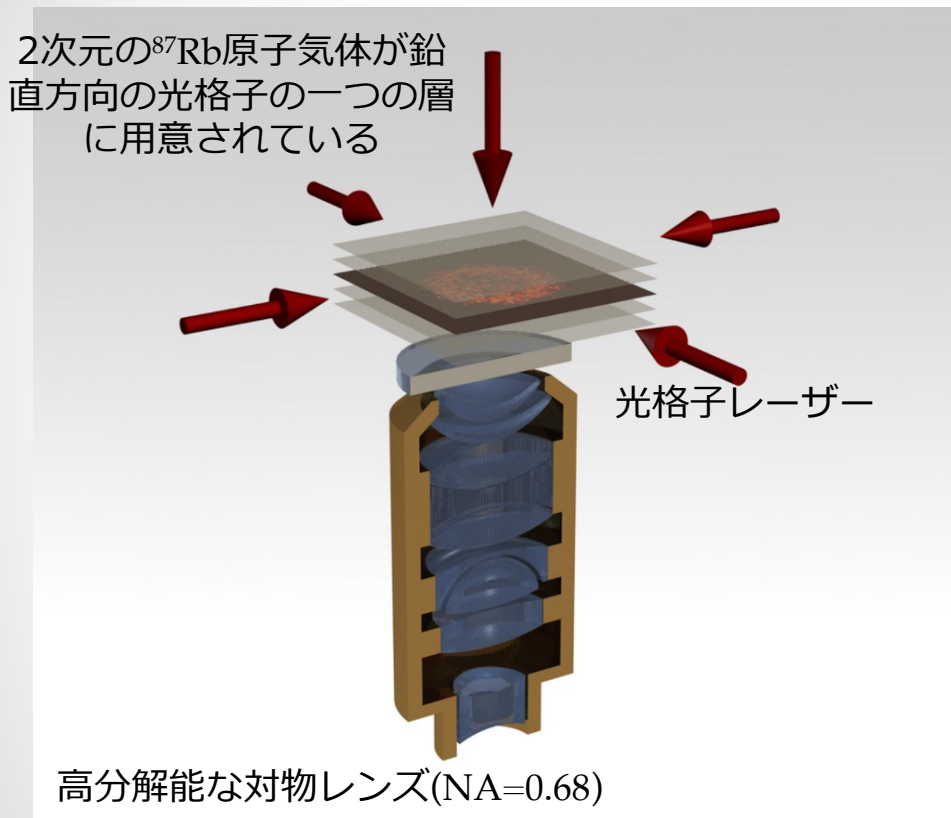
単一原子レベルでの測定

W. Bakr *et al.*, Nature **462**, 74 (2009).
W. Bakr *et al.*, Science **329**, 547 (2010).
J.F. Sherson *et al.*, Nature **467**, 68 (2010).

単一原子レベルでの操作

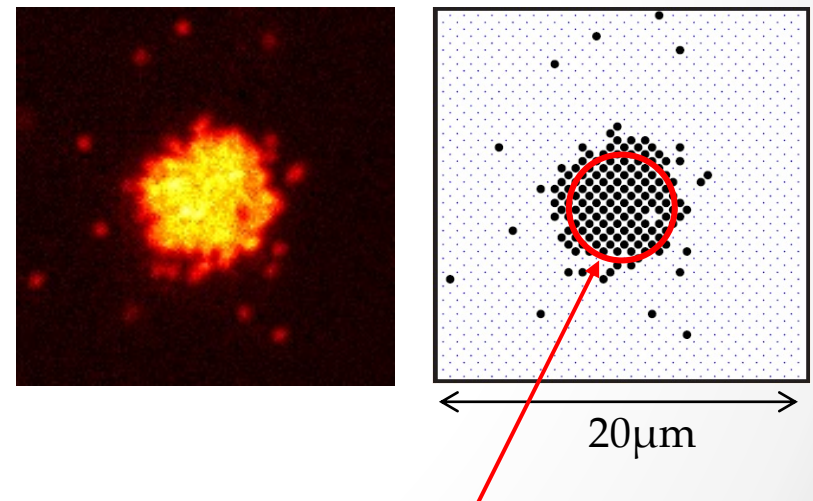
C. Weitenberg, M. Endres, J. F. Sherson, M. Cheneau, P. Schauß,
T. Fukuhara, I. Bloch, and S. Kuhr, Nature **471**, 319 (2011).

単一原子レベルのイメージング



蛍光イメージング
(近共鳴光で冷却 & 発光)

2次元のモット絶縁体状態

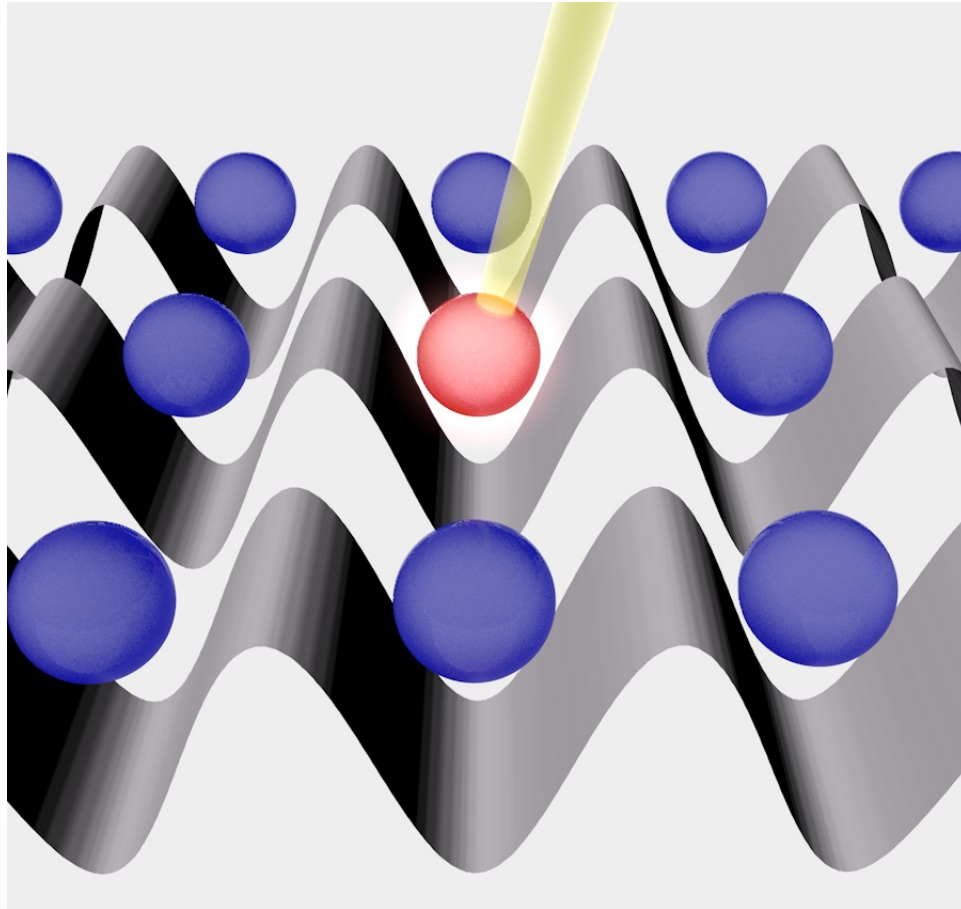


各サイトに原子が1個ずつ入っている

J.F. Sherson et al., Nature 467, 68 (2010).

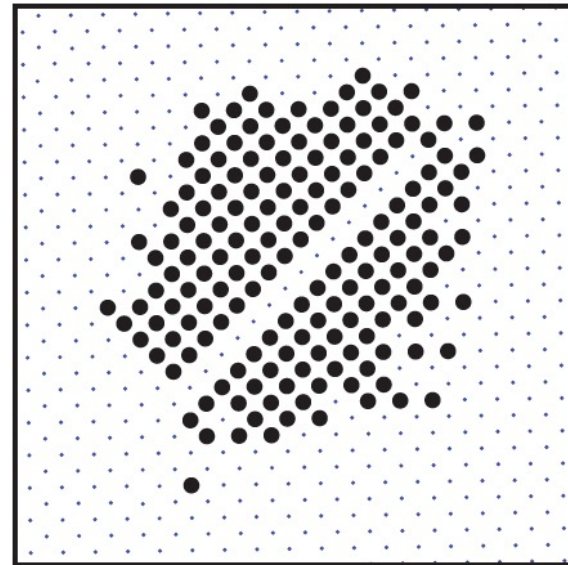
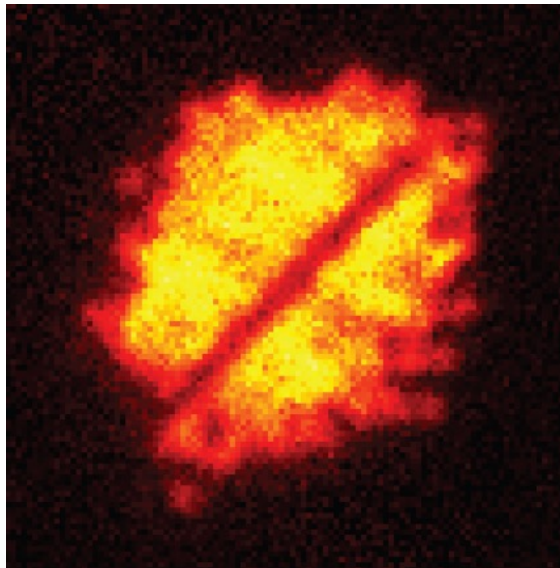
W. Bakr et al., Science 329, 547 (2010).

単一原子の操作



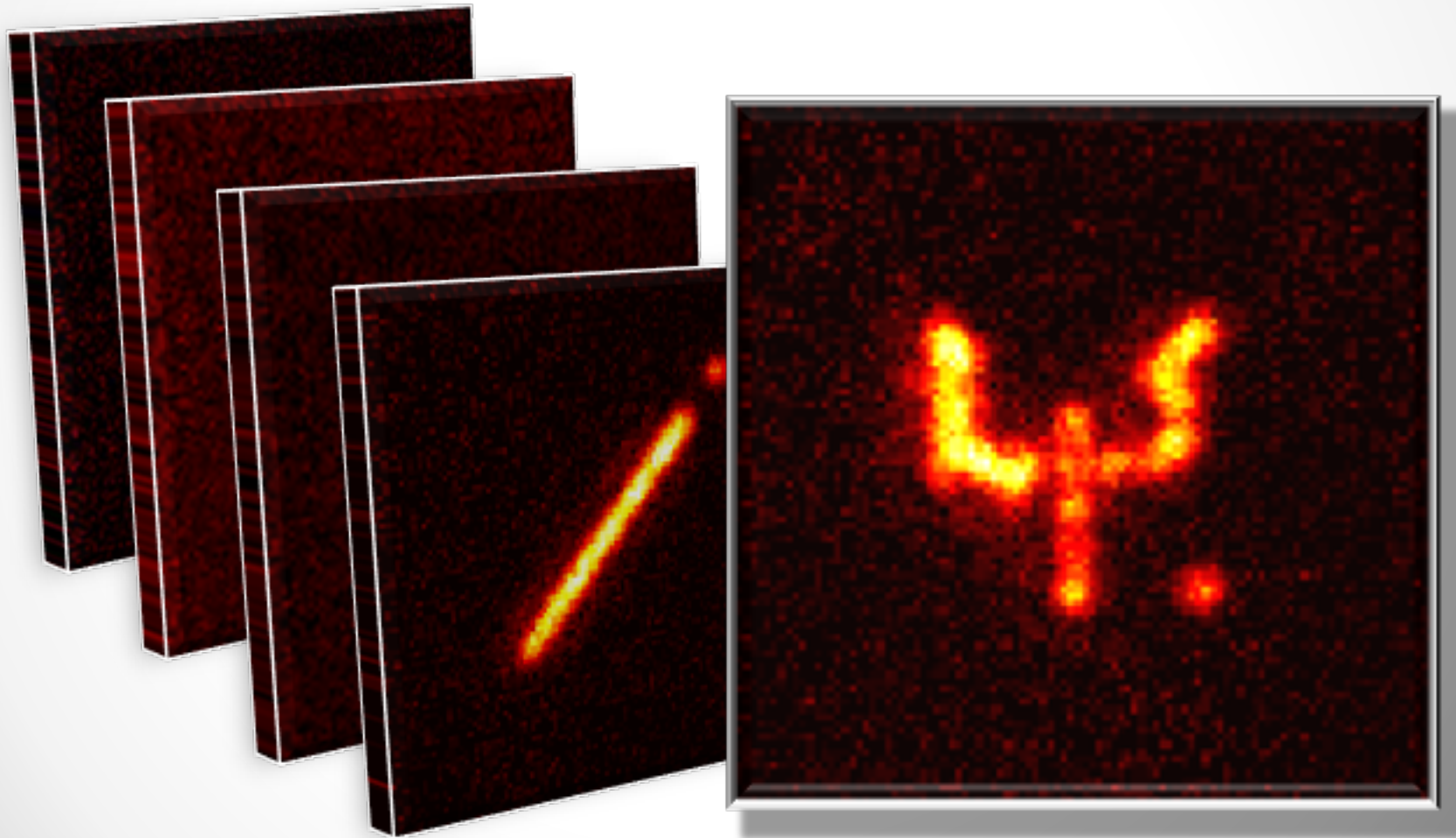
C. Weitenberg, M. Endres, J. F. Sherson, M. Cheneau, P. Schauß, T. Fukuhara, I. Bloch, and S. Kuhr, *Nature* **471**, 319 (2011).

単一原子の操作



C. Weitenberg, M. Endres, J. F. Sherson, M. Cheneau, P. Schauß,
T. Fukuhara, I. Bloch, and S. Kuhr, *Nature* **471**, 319 (2011).

任意のパターンの原子



本日のお話

1. 冷却原子実験

光格子

多数の原子の準備

量子気体顕微鏡

単一原子の測定・操作

リュードベリ原子

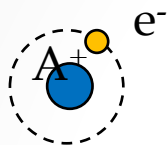
原子間の相互作用

光ピンセットアレイ

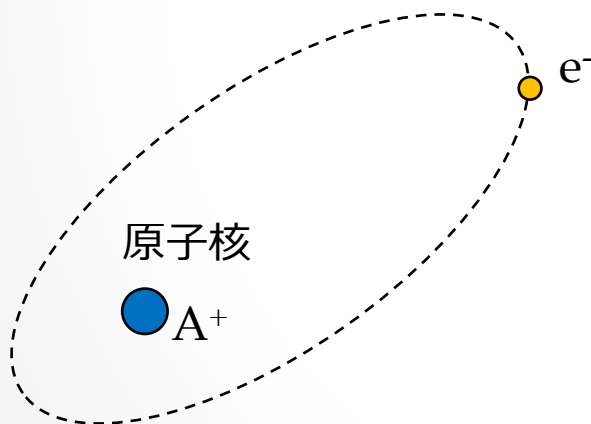
2. 量子シミュレーション

強い相互作用：リュードベリ状態

基底状態の中性原子

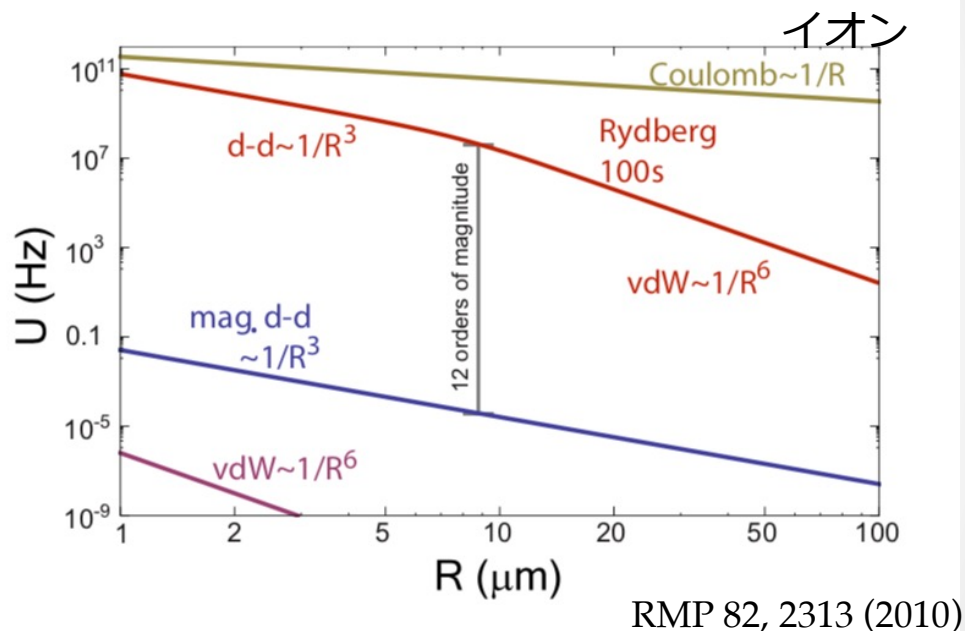


リュードベル原子
(リュードベリ状態にある原子)



主量子数 $n \gg 1$

リュードベリ原子状態には遠距離の強い相互作用が働く

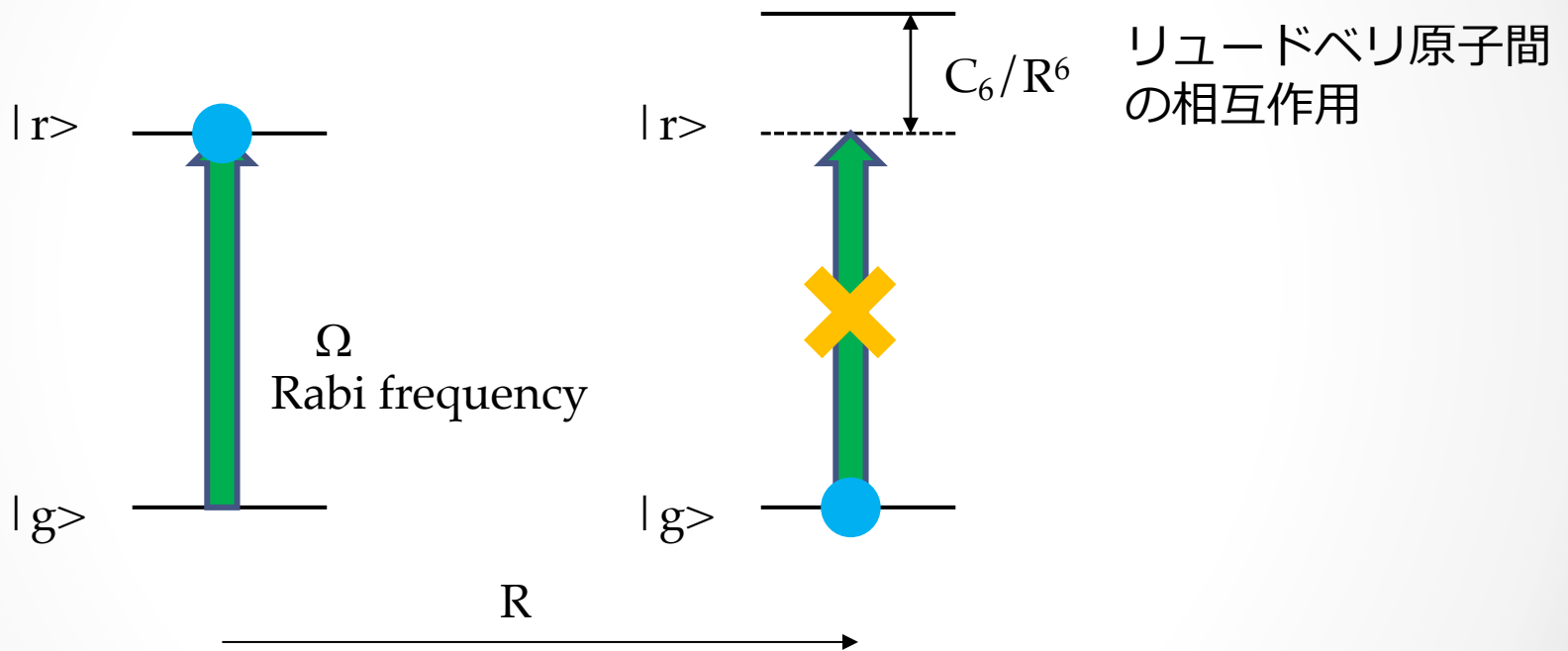


寿命のスケール $\propto n^3$
 $\sim 100 \mu\text{s}$ ($n \sim 50$)

ブロッケード

C-NOTゲートも実演されている

PRL 104, 010503 (2010)



C_6 : ファンデルワールス係数

ブロッケード半径：数 μm ～10 μm

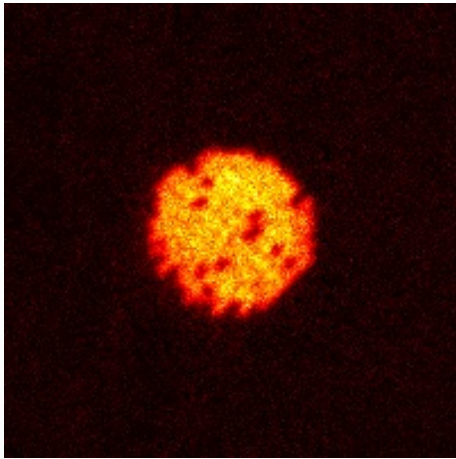
自発的な結晶化

実験

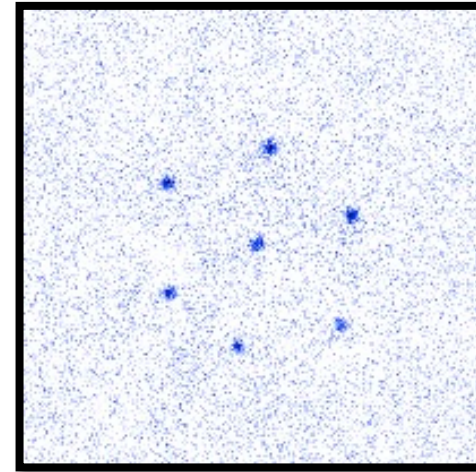
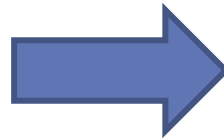
リュードベリ状態へのレーザーを入れて
周波数（離調）を断熱的に変える

量子スピンモデルでは

「横磁場をかけながら縦磁場の向きを断熱的に変える」



円形状のモット絶縁体

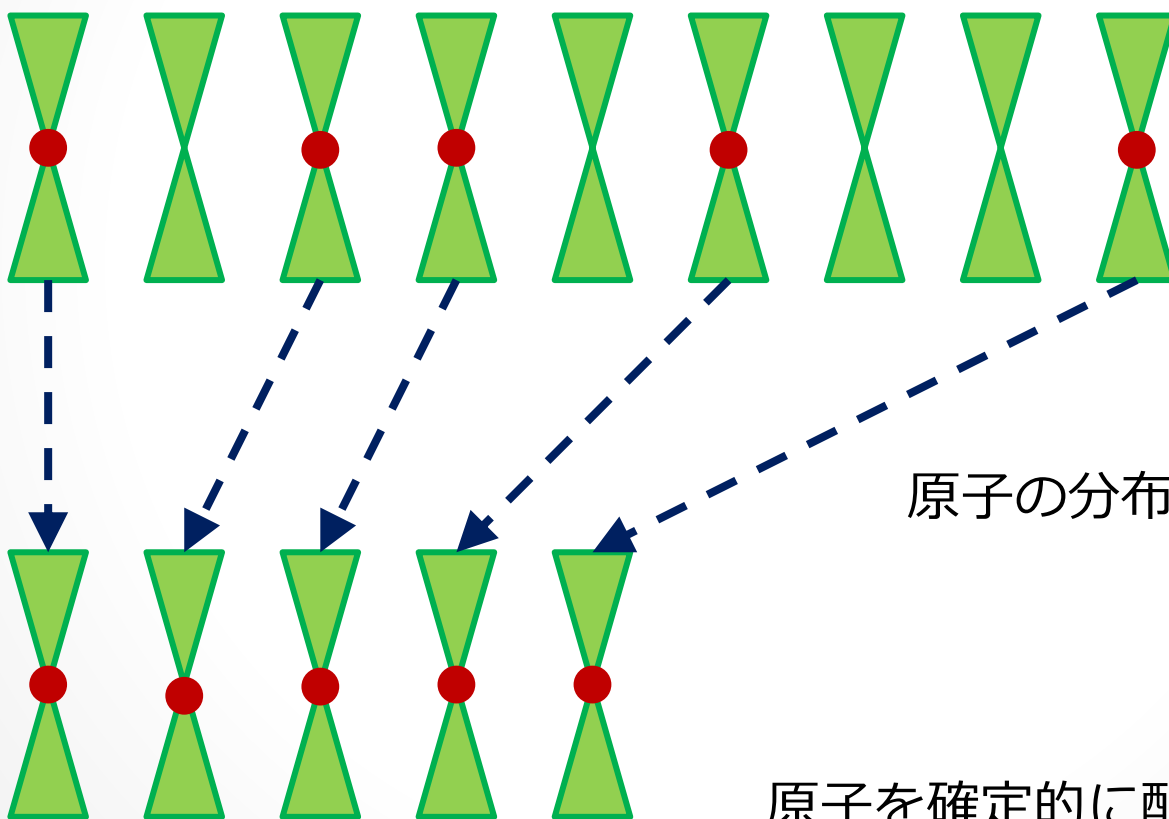


励起されたリュードベリ原子

光ピンセットアレイ

レーザー冷却した原子を光ピンセット（マイクロトラップ）のアレイに導入

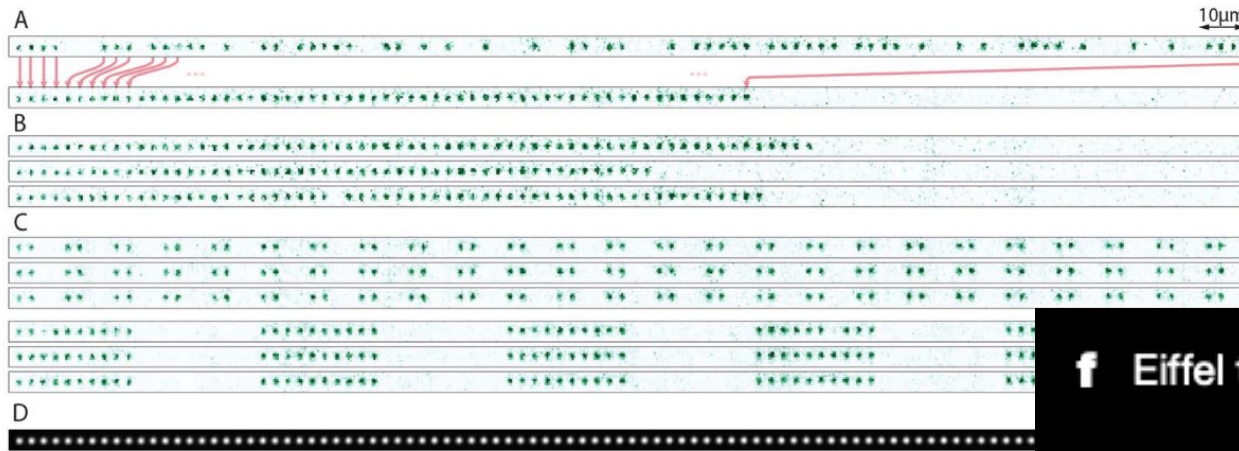
原子が1個入る確率は通常50%程度



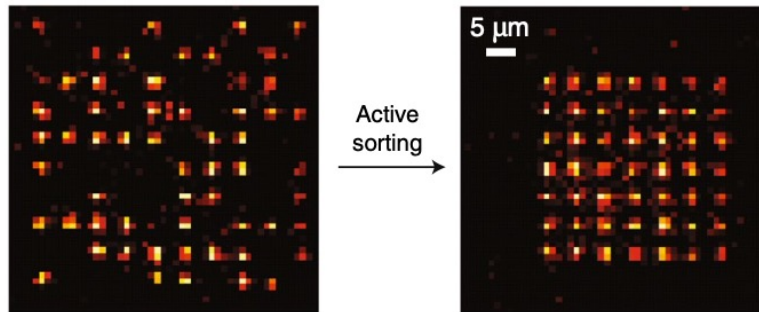
原子の分布を測定して再配置

原子を確定的に配置できる

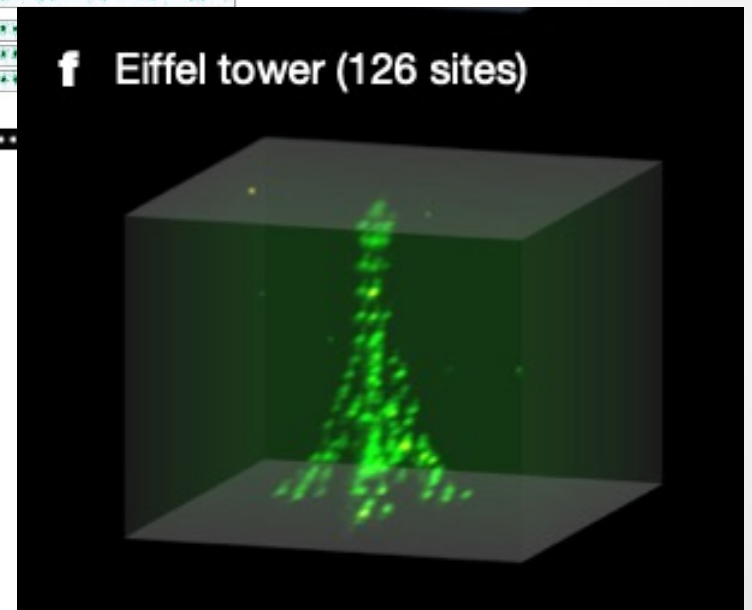
光ピンセットアレイ



1D: Endres *et al.*, Science **354**, 1024 (2016).



2D: Barredo *et al.*, Science **354**, 1021 (2016).



3D: Barredo *et al.*, Nature **561**, 79 (2018).

*こちらのデータは1回の実験結果ではなく複数の測定の積算

本日のお話

1. 冷却原子実験

光格子

多数の原子の準備

量子気体顕微鏡

単一原子の測定・操作

リュードベリ原子

原子間の相互作用

光ピンセットアレイ

多数の原子の準備（別の方法）

2. 量子シミュレーション

量子シミュレーション

量子系のシミュレーション



Richard P. Feynman

- ・ 古典コンピュータを用いては困難
- ・ **量子系**を用いれば効率的に計算することができる

R. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982).

量子コンピュータ

あるいは

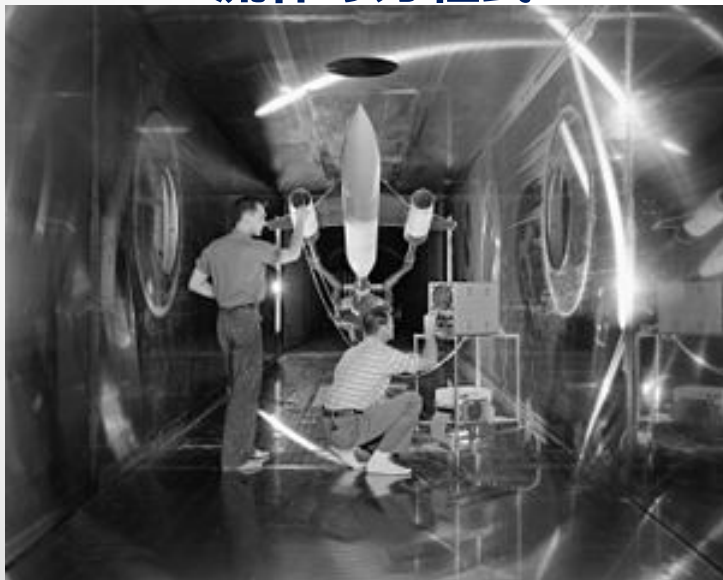
量子系を「まねる」ことができる量子系

実験的シミュレーション

風洞 (wind tunnel)

数値流体力学

流体の方程式



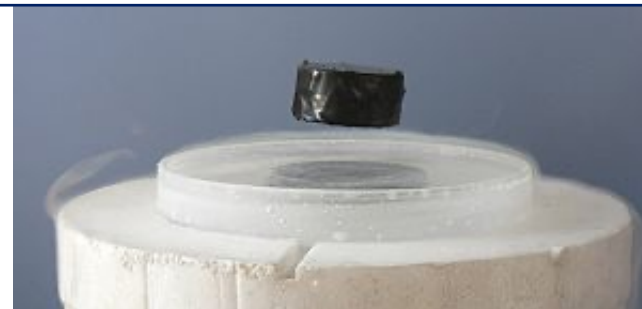
航空機、鉄道、車、高層ビル、橋...

量子系を「まねる」ことができる量子系

量子コンピューター

模型 (ハミルトニアン)

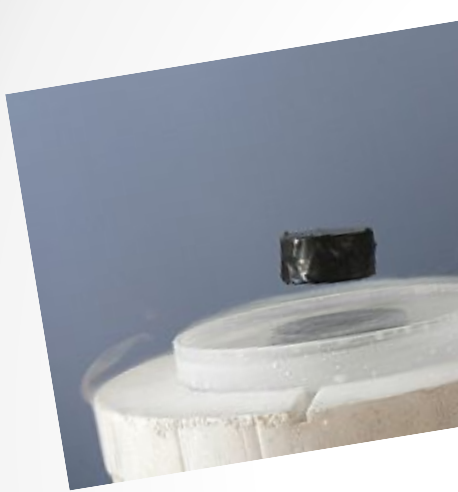
$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + c_{j,\sigma}^\dagger c_{i,\sigma}) + U \sum_{i=1}^N n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



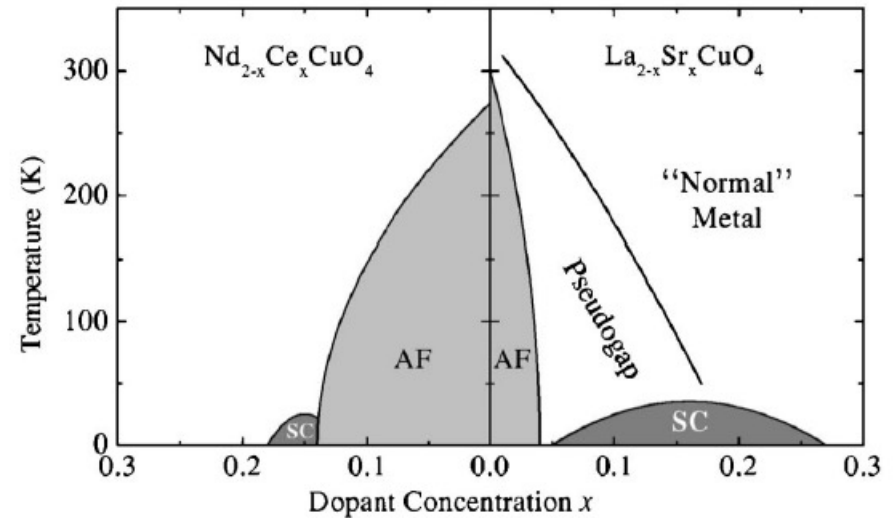
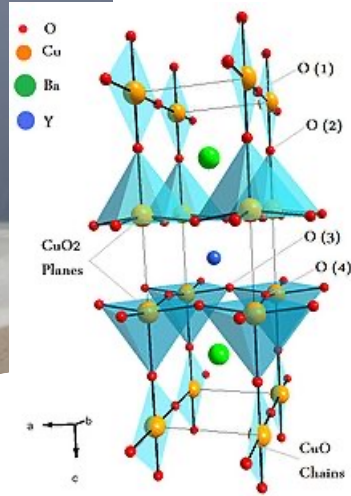
Figures from Wiki

高温 (室温) 超伝導、新機能物質...

“高温超伝導”の量子シミュレーション



Wikipedia



Review: Lee, Nagaosa, Wen, RMP 78, 17 (2006)

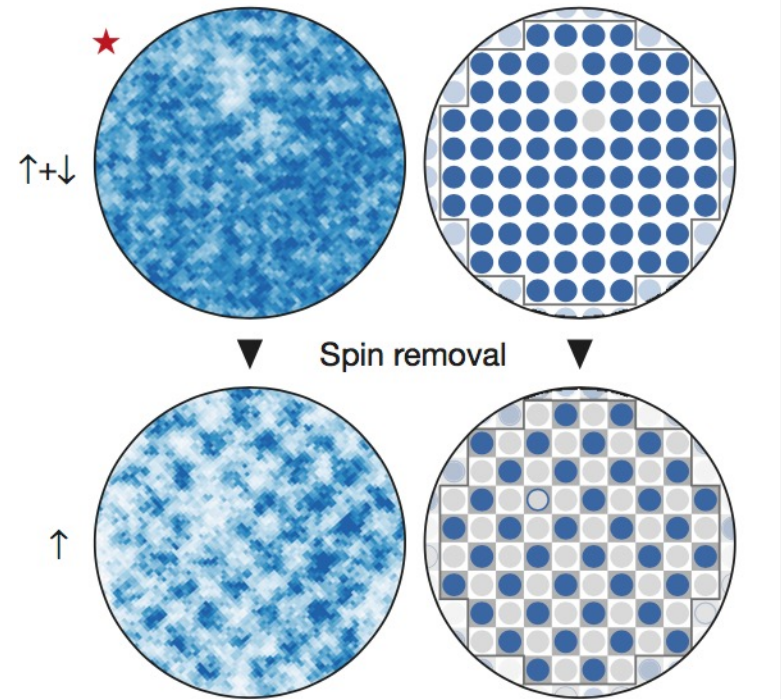
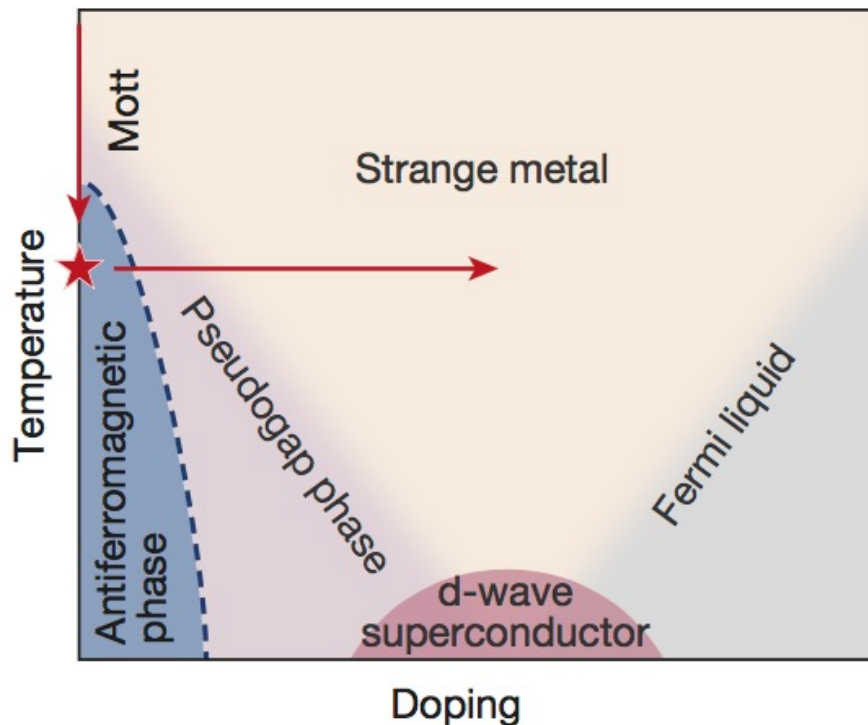
ハバード模型

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + c_{j,\sigma}^\dagger c_{i,\sigma}) + U \sum_{i=1}^N n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

(銅酸化物の) 高温超伝導を記述する最も基本的なモデルだと考えられている

反強磁性相の観測

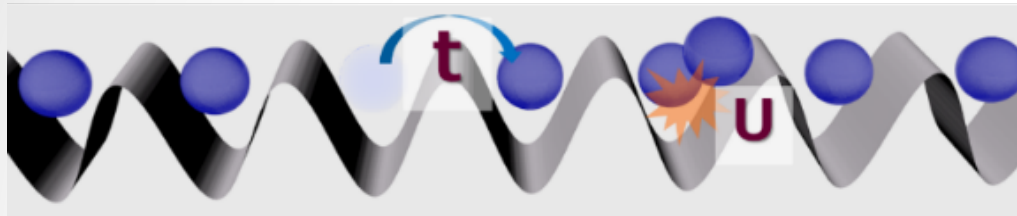
Greiner group @ Harvard
Nature 545, 462 (2017)



システムサイズ (円の直径): 10 サイト
全部で約80 サイト

冷却原子を用いた量子シミュレーション

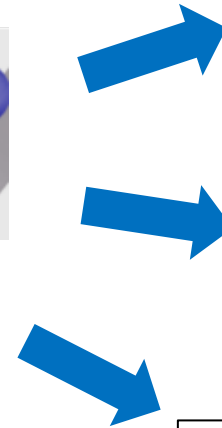
光格子中の冷却原子



$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + c_{j,\sigma}^\dagger c_{i,\sigma}) + U \sum_{i=1}^N n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



フラストレート磁性体



高温超伝導

トポロジカル物質

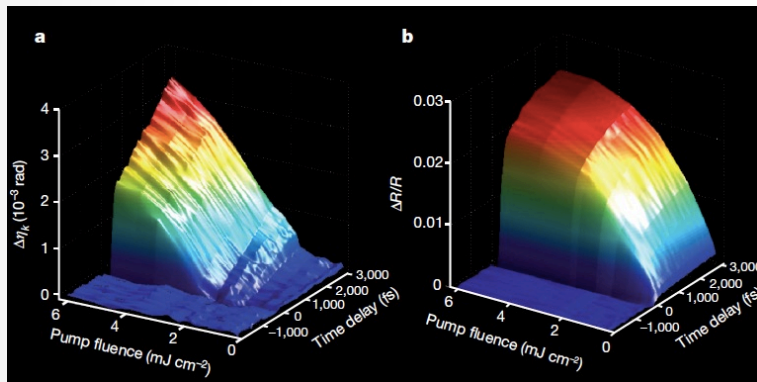
非平衡ダイナミクス

非平衡ダイナミクス

実用：超高速ダイナミクス・非平衡準安定状態

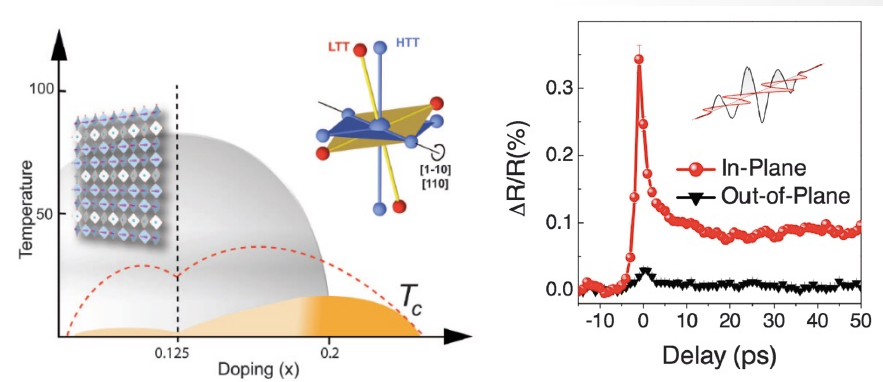
Switching from AFM to FM

Nature 496, 69 (2013)



Light-induced SC

Science 331, 189 (2011)

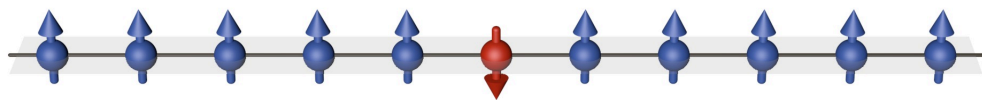


理論：フレームワークほとんど構築されていない
数値計算：困難

非平衡ダイナミクスの例

単一スピン励起からの量子ダイナミクス

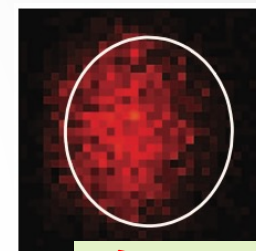
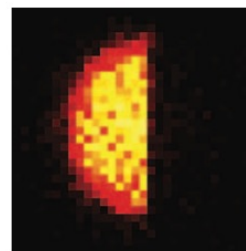
T. Fukuhara *et al.*, Nature Phys. 9, 235 (2013).



エンタングルメントの生成と伝搬の測定

T. Fukuhara *et al.*, PRL 115, 035302 (2015).

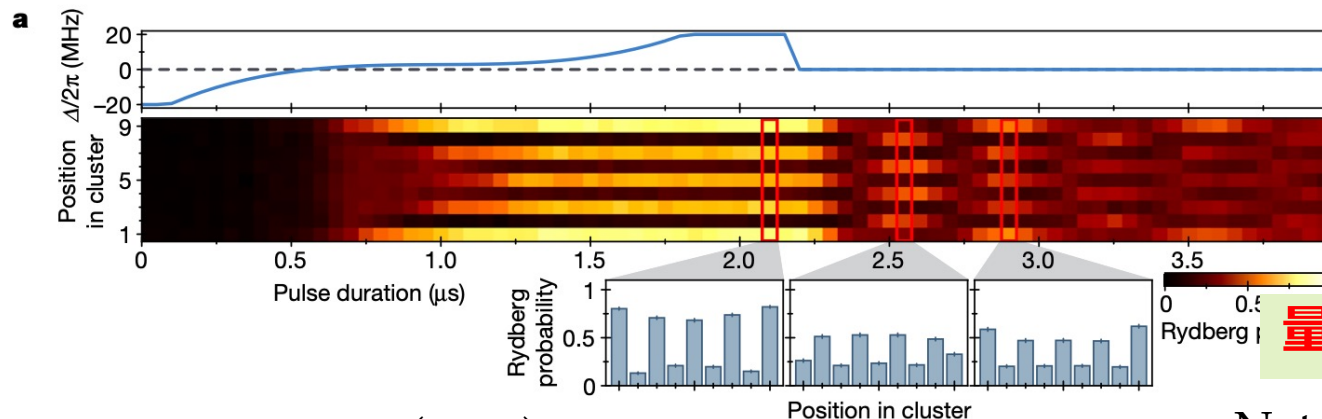
統計物理で重要となる
孤立量子系の熱化の問題



多体局在

Science 352, 1547 (2016).

光ピンセットアレーの系を用いたイジング模型での非平衡ダイナミクス



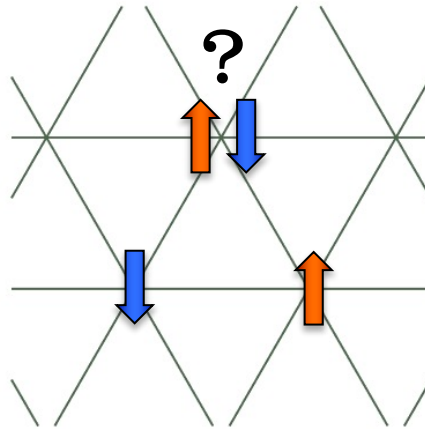
量子多体傷跡状態

Nature 534, 667 (2016).

Nat. Phys. 14, 745 (2018)

フラストレートスピン系

反強磁性相互作用 + 幾何学的フラストレーション



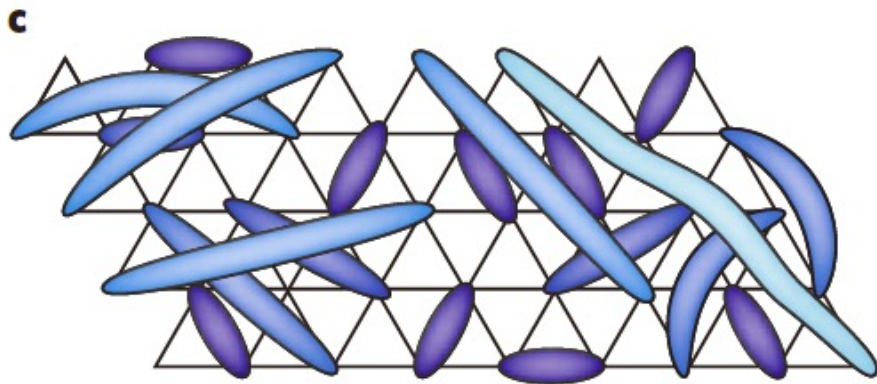
反強磁性秩序が抑制される



- さまざまな新規な量子相
- 未知の量子現象？
- 新しい機能性物質の可能性

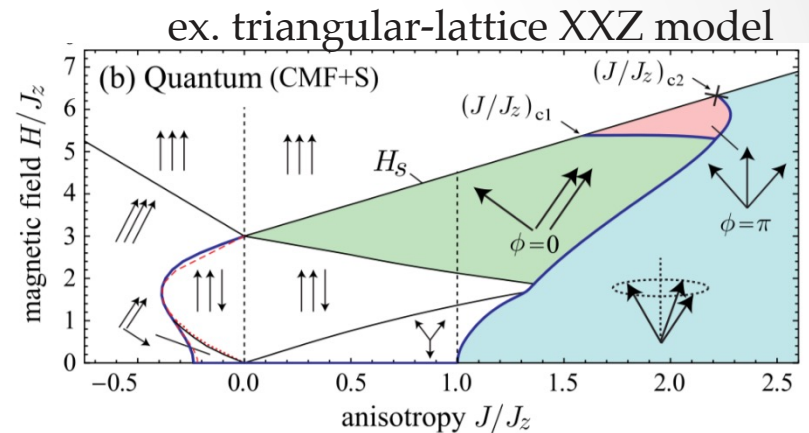
フラストレートスピン系

量子スピン液体



L. Balent, Nature 464, 199 (2010).

豊富な量子相



D. Yamamoto et al., PRL 112, 127203 (2014).

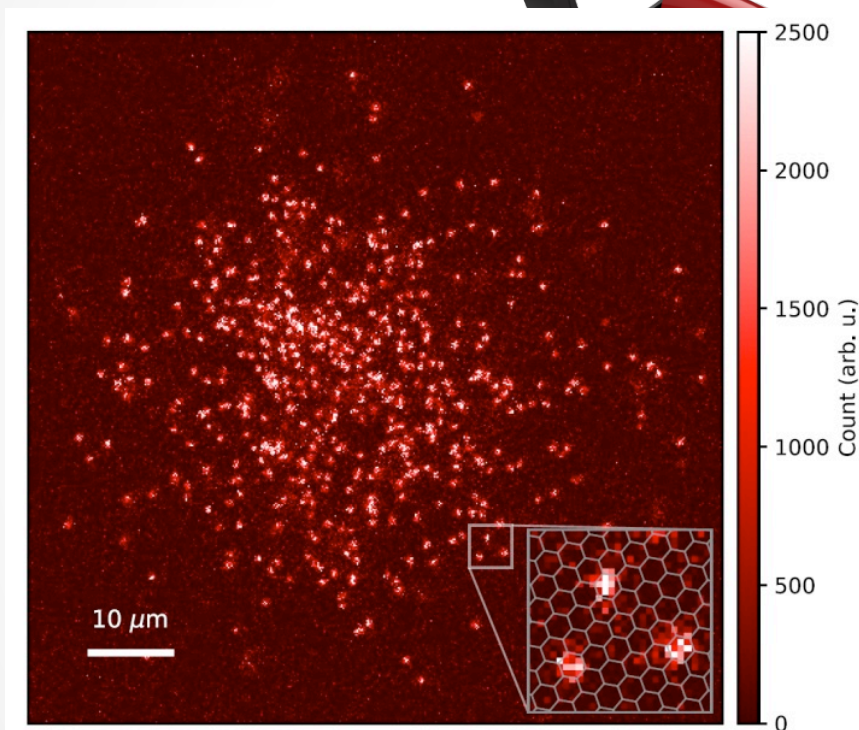
反強磁性秩序が抑制される



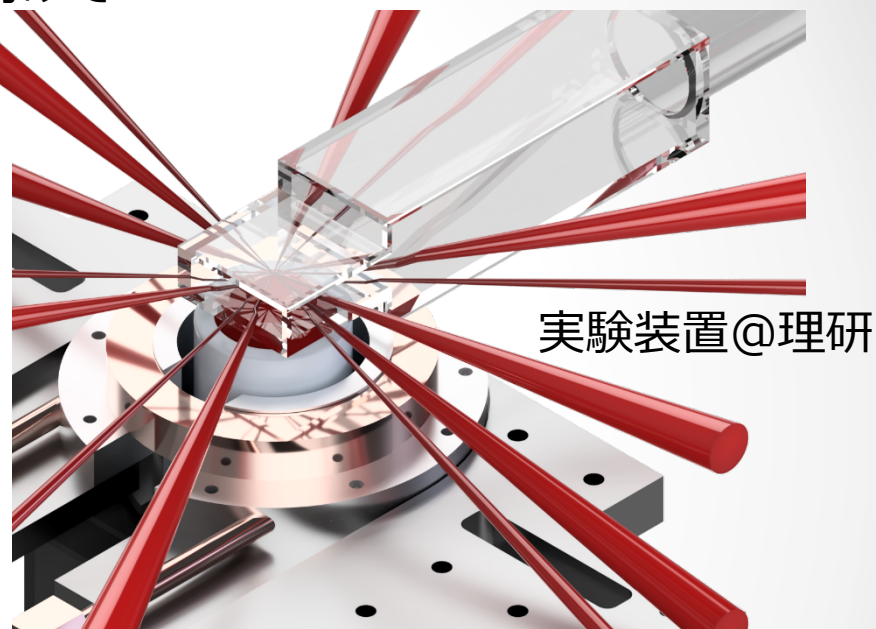
- **さまざまな新規な量子相**
- 未知の量子現象？
- 新しい機能性物質の可能性

三角格子の量子気体顕微鏡の開発

フラストレート磁性体のシミュレーションに向けて



R. Yamamoto *et al.*, *New J. Phys.* 22, 123028 (2020).



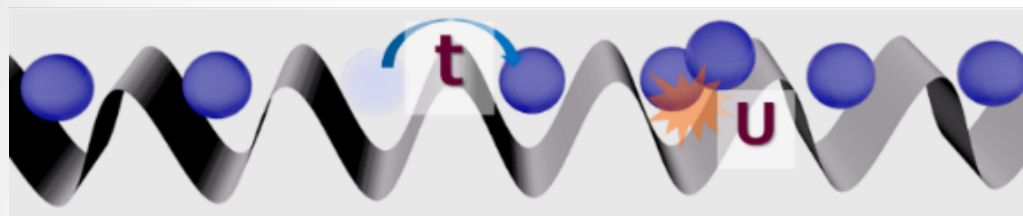
Li原子（フェルミ原子）での実現

J. Yang *et al.*, *PRX Quantum* 2, 020344 (2021)

世界初となる三角格子中の単一原子観測のデータは
機械学習で得られたパラメータを使ってとられた

冷却原子を用いた量子シミュレーション

光格子中の冷却原子



高温超伝導

トポロジカル物質

非平衡ダイナミクス

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + c_{j,\sigma}^\dagger c_{i,\sigma}) + U \sum_{i=1}^N n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

フラストレート磁性体

未知の量子多体現象・量子相

量子計算のための新たなリソース

物質開発 → 量子技術に有用なデバイス

参考文献

- 光格子・量子気体顕微鏡に関するレビュー

“Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices”

C. Gross & I. Bloch

Science 357, 995-1001 (2017).

- リュードベリ原子・光ピンセットアレーを用いた実験に関するレビュー

“Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms”

A. Browaeys & T. Lahaye

Nature physics 16, 132-142 (2020).

- 光格子 量子シミュレーションでの実験技術に関するレビュー

“Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices”

F. Schäfer, TF, S. Sugawa, Y. Takasu & Y. Takahashi

Nature Reviews Physics 2, 411–425 (2020); arXiv: 2006.06120.