

Q-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

Hamiltonian

冷却原子を用いた 量子シミュレーション - リュードベリ原子編 -

分子科学研究所

富田 隆文

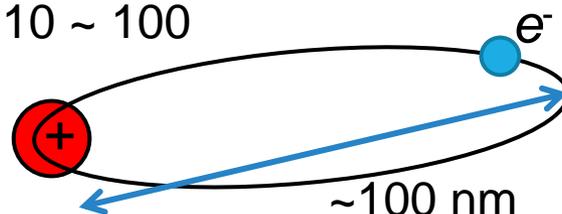
$|0\rangle + |1\rangle$

1. 導入

- リュードベリ原子を用いた量子シミュレーション

- リュードベリ原子 = 最外殻電子が**高い主量子数 n** に励起された原子

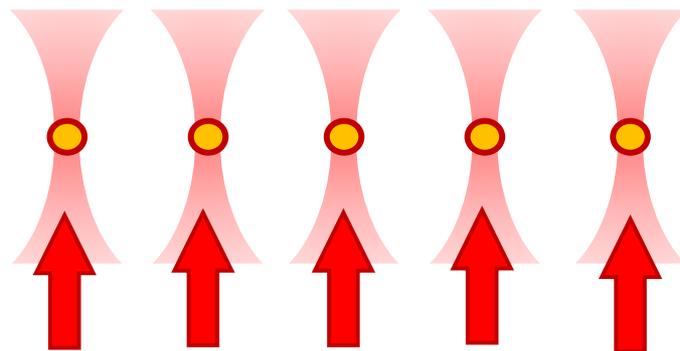
$n =$ 数10 ~ 100



- **長距離相互作用**
- 相互作用の強さ制御可能

- 光ピンセット配列

- 原子間距離, 配列形状を制御
- 個別観測・操作



→ **プログラマブル**で**個別操作性の高い**、長距離相互作用のある量子多体系

□ スピン系

□ 量子計算にも応用可能

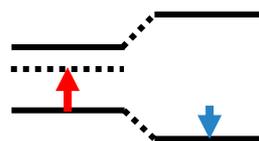
2. 状態準備

- 光双極子トラップ (optical dipole trap)

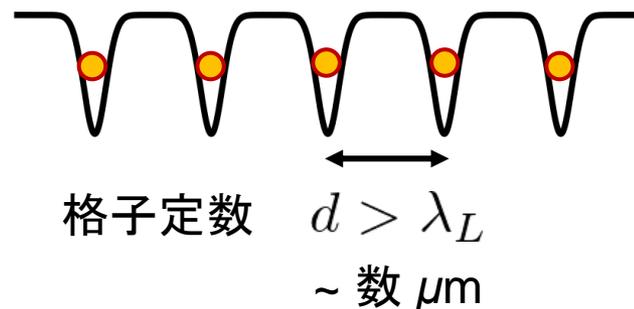
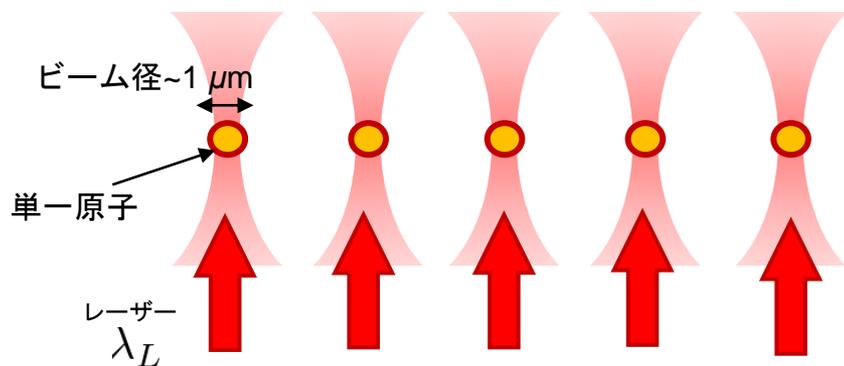
長波長側に離調をつけたレーザー光を集光 → 集光点に原子がトラップ



エネルギー準位のシフト: 光強度に比例
(ACシュタルクシフト, ライトシフト)

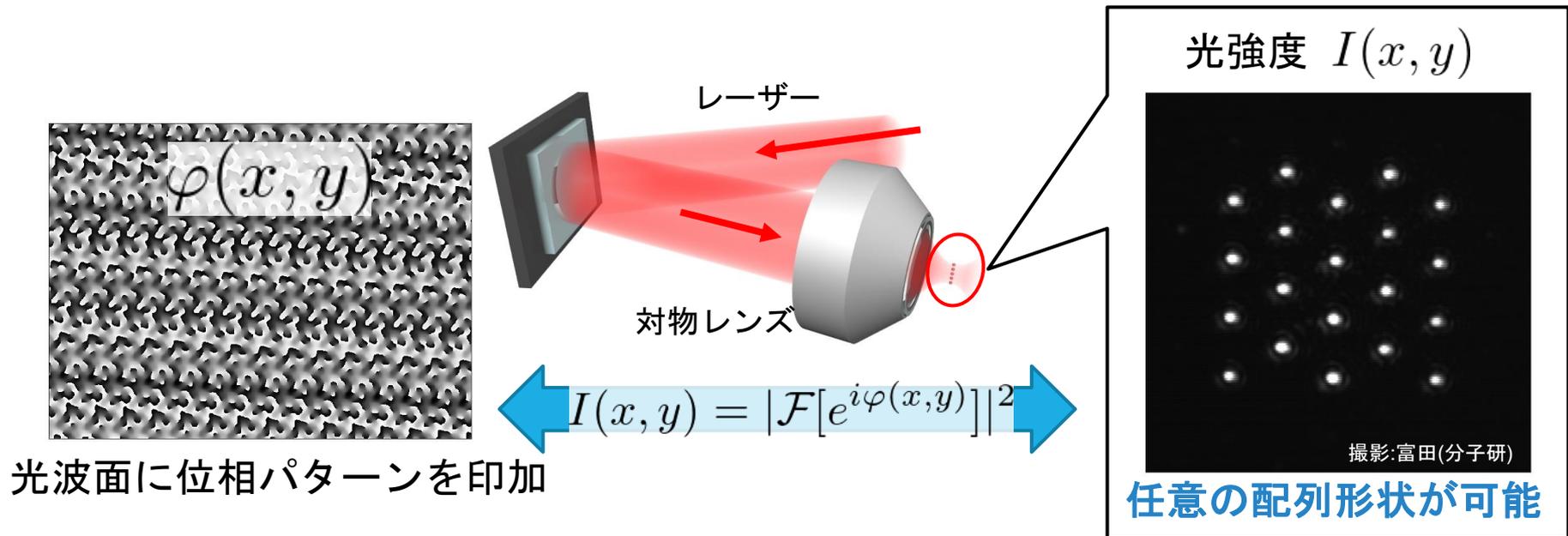


- 光ピンセット配列 (optical tweezers array)
= 強く集光された光双極子トラップの配列



2. 状態準備

- 光ピンセット配列のための光パターン
 - 空間光変調器 (Spatial light modulator: SLM)



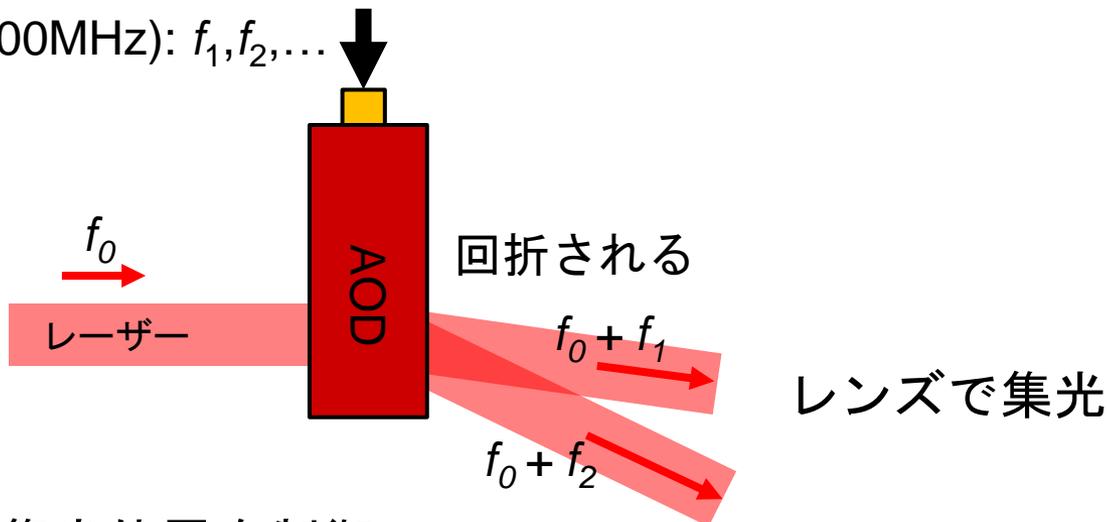
詳しくは[F. Nogrette *et al.*, PRX 4, 021034 (2014)]

2. 状態準備

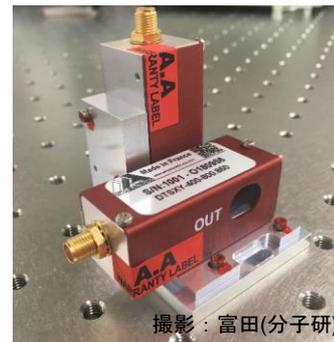
- 光ピンセット配列のための光パターン

- 音響光偏向器 (Acousto-optic deflector: AOD)

RF(ラジオ波 ~100MHz): f_1, f_2, \dots



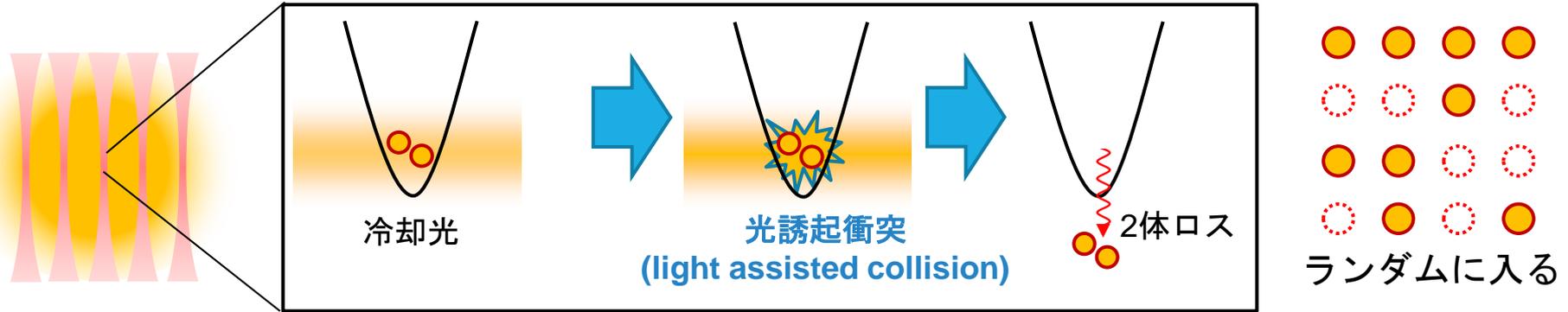
- 回折角を制御 → 集光位置を制御
- 複数周波数 → 複数出力
- 1次元 or 直交2次元
- 動的制御が可能 (動的光ピンセット)



撮影：富田(分子研)

2. 状態準備

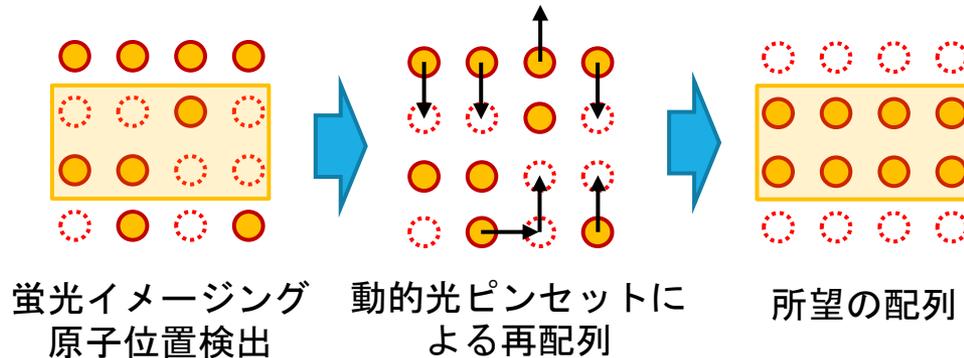
● 原子の再配列



→ サイト当たり原子数 = 0 or 1 **ローディング確率 ~ 50 %**

● 再配列(atom-by-atom assembly)

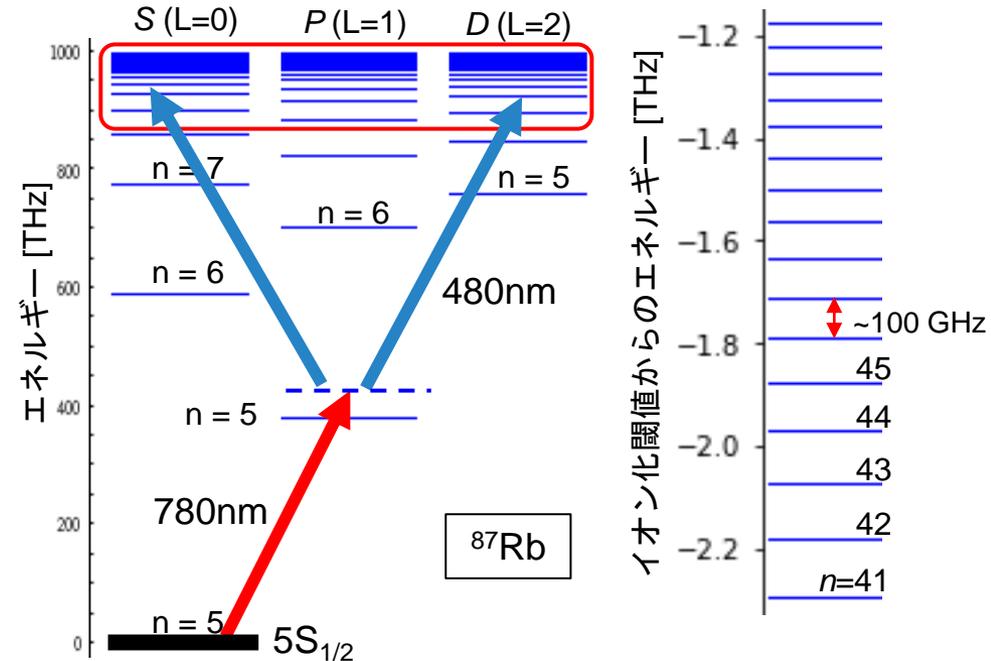
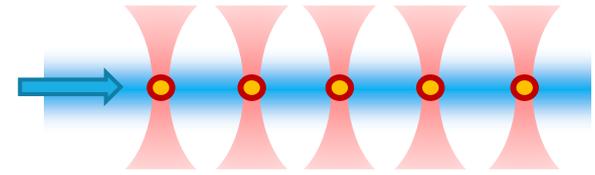
[Science **354**, 1021 (2016), Science **354**, 1024 (2016)
Nat. Commun. **7**, 13317 (2016)]



1原子移動 ~ 1 ms
→ 100 ms 程度で並べなおす

3. 制御方法

- リュードベリ状態への励起
- レーザー光によるコヒーレントな励起
- リュードベリ状態を識別して励起
- ラビ周波数: $\Omega/2\pi \sim$ 数MHz
→ 制御時間 $< 1 \mu s$
- 寿命: $\tau > 100 \mu s$ ($n > 60$)



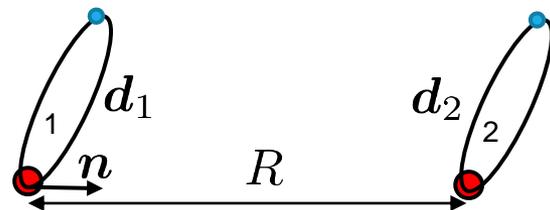
4. 相互作用

- リュードベリ原子同士の相互作用 = **長距離相互作用**

- 双極子-双極子相互作用:

$$\hat{V}_{dd} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{d}_1 \cdot \hat{d}_2 - 3(\hat{d}_1 \cdot \mathbf{n})(\hat{d}_2 \cdot \mathbf{n})}{R^3}$$

$$V_{dd} \sim \frac{C_3}{R^3}$$



- ファンデルワールス相互作用: $V_{vdW} \sim \frac{C_6}{R^6}$

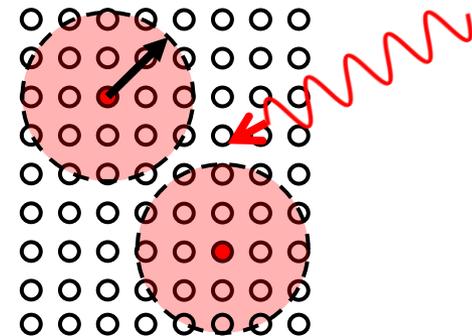
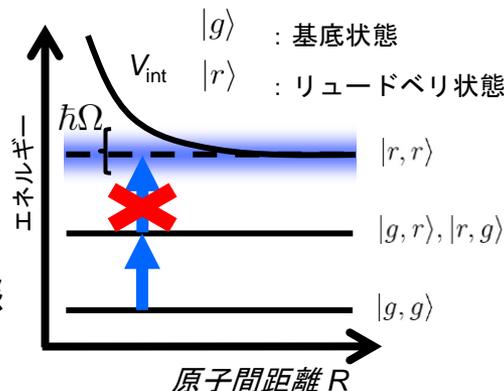
$\Rightarrow R \sim \text{数}\mu\text{m}$ で $V_{vdW} \sim \text{MHz}$ (主量子数 n により可変)

- リュードベリ・ブロッケード [D. Jaksch *et al.*, PRL **85**, 2208 (2000)]

相互作用 $V \gg$ ラビ周波数 $\hbar\Omega$

\rightarrow 同時に励起できない

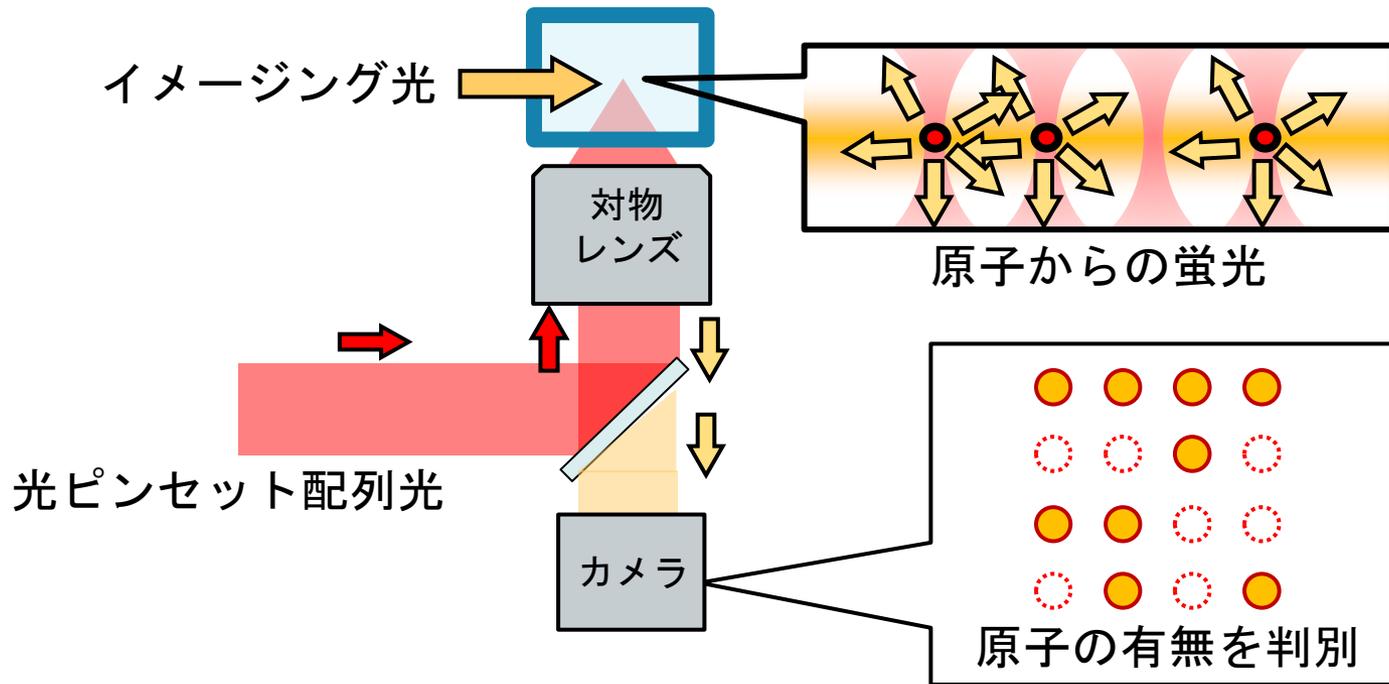
ブロッケードによる多様な基底状態
ブロッケードを積極的に利用



5. 測定

• 蛍光イメージング

近共鳴光を照射し原子の蛍光を観測：原子の有無



- 光ピンセット配列ポテンシャル: リュードベリ原子に対して**斥力** (例: Rb)
→ 原子が検出されないサイト = リュードベリ状態

6. コヒーレンス時間 / 制御時間

- コヒーレンス時間 : ~ 数10 μs

- 中間状態からの自然放出

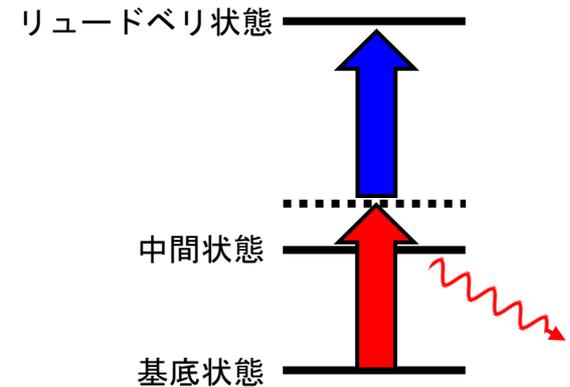
アルカリ金属(Rb, Csなど, 2光子励起)

→ 2電子原子系 (Sr, Ybなど, 1光子励起)

- レーザーの位相ノイズ [PRA 97, 053803(2018)]

位相ノイズの周波数成分 ~ ラビ周波数

→ ノイズ除去, キャビティを用いたフィルタリング



- 制御時間

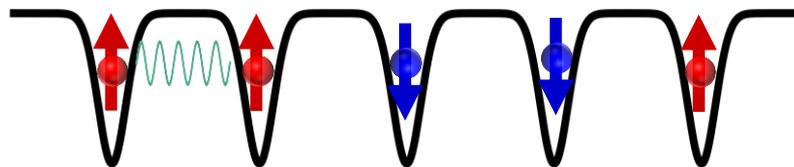


→ 1回の実験時間 ~ 100 ms

7. 応用：量子シミュレーション

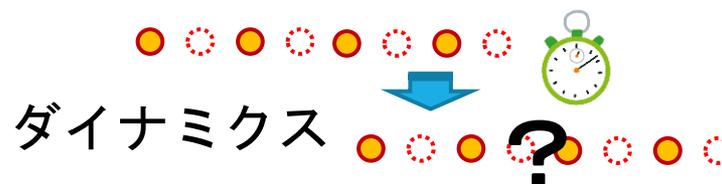
- 量子イジングモデル（横磁場イジングモデル）

スピン $|\downarrow\rangle, |\uparrow\rangle = |g\rangle, |r\rangle$



$$\hat{H}/\hbar = \underbrace{\sum_i \frac{\Omega_i}{2} \hat{\sigma}_x^i}_{\text{レーザー励起}} - \sum_i \Delta_i \hat{n}_i + \underbrace{\sum_{i<j} V_{ij} \hat{n}_i \hat{n}_j}_{\text{相互作用}} \quad V_{ij} = \frac{C_6}{R_{ij}^6}, C_6 > 0$$

ファンデルワールス相互作用



- 量子XYモデル

スピン $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle = |n, L\rangle, |n', L \pm 1\rangle$

どちらもリュードベリ状態
異なる軌道角運動量 L

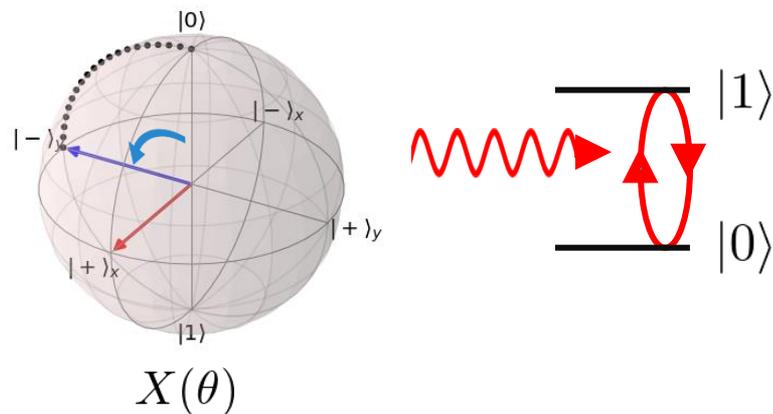
$$\hat{H}/\hbar = \sum_{i \neq j} \underbrace{V_{ij} (\hat{\sigma}_i^+ \hat{\sigma}_j^- + \hat{\sigma}_i^- \hat{\sigma}_j^+)}_{\text{スピン交換}} \quad V_{ij} = \frac{C_3}{R_{ij}^3} \quad \text{双極子双極子相互作用}$$

8. 応用：量子計算

$|0\rangle, |1\rangle$: Rb原子の電子基底状態の超微細構造

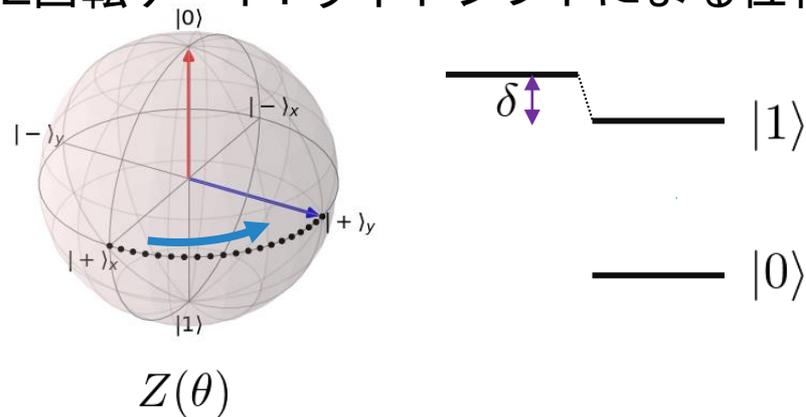
◆ 1量子ビットゲート

X回転ゲート：共鳴光によるラビ振動



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

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周して戻ると位相が反転する(マイナス符号がつく)

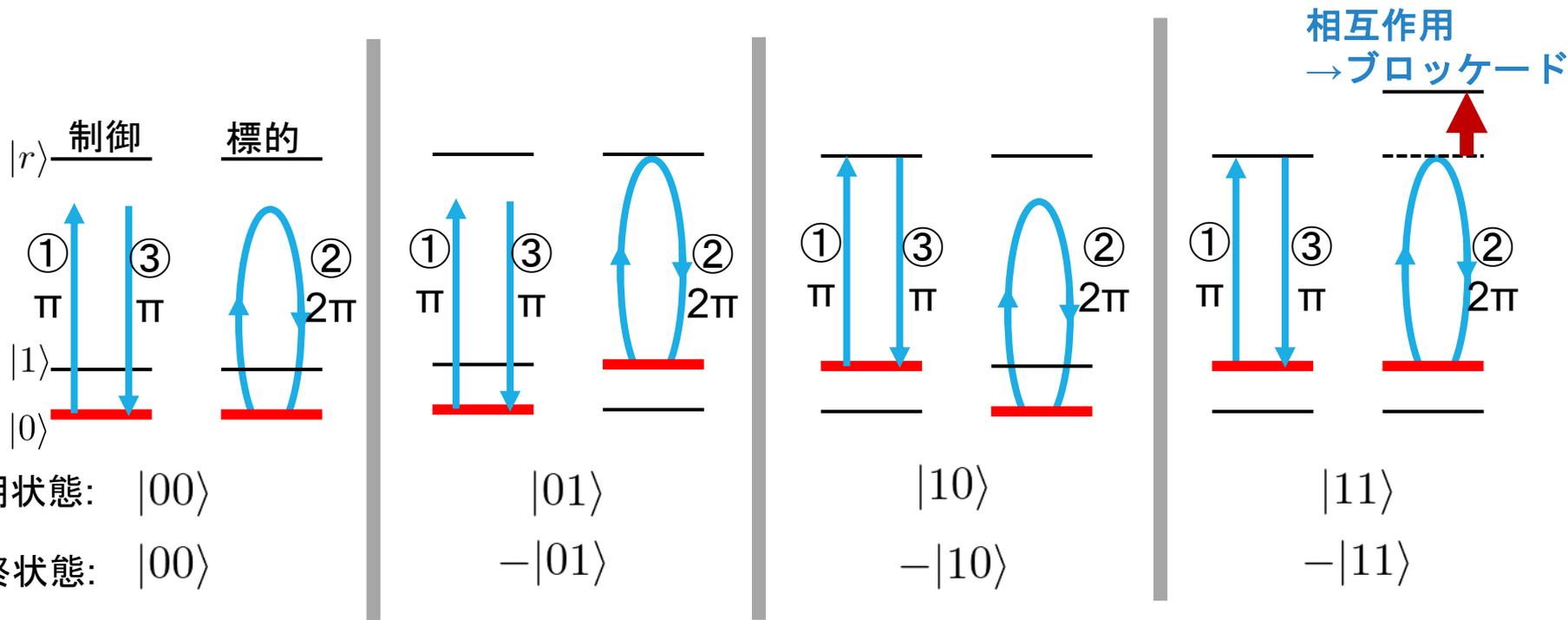
8. 応用：量子計算

◆ 2量子ビットゲート：制御Zゲート

詳しくは[Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010)]

制御ビットの状態が $|1\rangle \Rightarrow$ 標的ビット $|1\rangle$ を位相反転

- $|1\rangle \leftrightarrow |r\rangle$ 間の励起光
- ①制御に π パルス \rightarrow ②標的に 2π パルス \rightarrow ③制御に π パルス

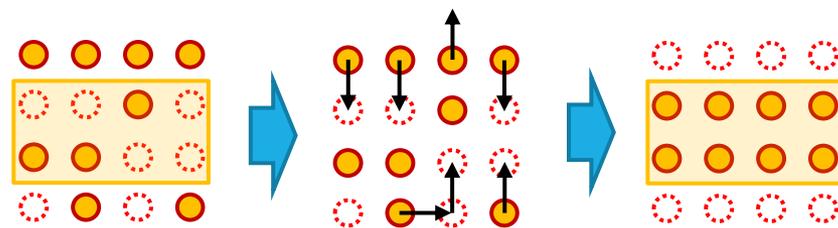


$|1\rangle \rightarrow -|1\rangle$ で制御Zゲートと等価

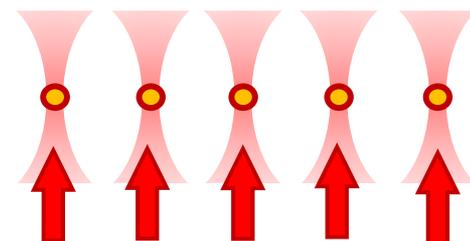
9. スケール

- サイト数・原子数

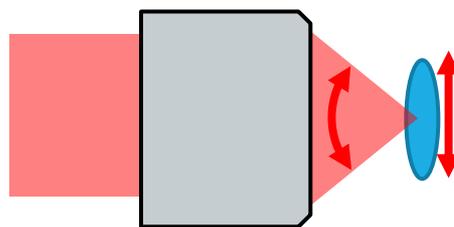
- 数10~数100 サイト
- 原子数はサイト数の約半分



- 1サイト当たりの光ピンセット光 ~ 数 mW
- 光ピンセット配列レーザー光 ~ 数 W

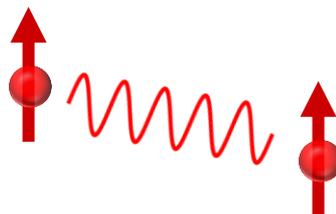


- 対物レンズ視野・開口数



- 相互作用距離

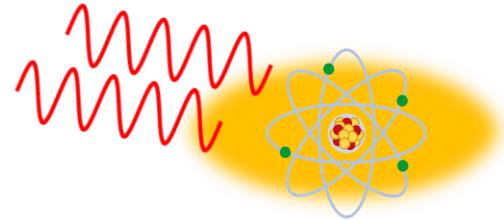
$$V_{\text{vdW}} \sim \frac{C_6}{R^6}$$



10. 他との関連

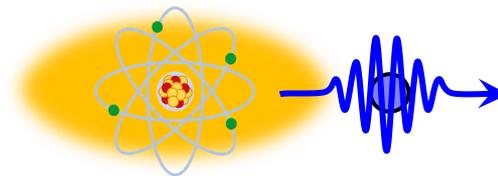
- リュードベリ原子を用いた
- マイクロ波・テラヘルツ波検出

[Nat. Phys. **8**, 819–824 (2012),
Nat. Photon. **11**, 40-43 (2017)など]



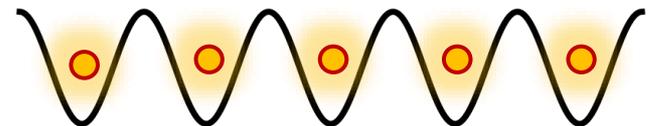
- 光子間相互作用・単一光子源

[Nature **502**, 71–75 (2013),
Science **362**, 6413 446-449 (2018)など]



- 光格子中のリュードベリ原子

[Nature **491**, 87-91 (2012)など]



11. より深く勉強したい方向けの文献

- 冷却原子実験に向けた原子物理学の教科書:
 - 久我隆弘 “量子光学” 朝倉書店 (2003)
 - C. J. Foot “Atomic Physics” Oxford University Press (2005)
- リュードベリ原子を用いた量子シミュレーションのレビュー論文:
 - A. Browaeys & T. Lahaye “Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms” Nature Physics **16**, 132 (2020) [arXiv: 2002.07413]
- リュードベリ原子を用いた量子計算のレビュー論文:
 - M. Saffman, T.G. Walker, and K. Mølmer “Quantum information with Rydberg atoms” Rev. Mod. Phys. **82**, 2312 (2010) [arXiv: 0909.4777]