

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 - 光格子中の原子編 -

分子科学研究所  
富田 隆文

$|0\rangle + |1\rangle$

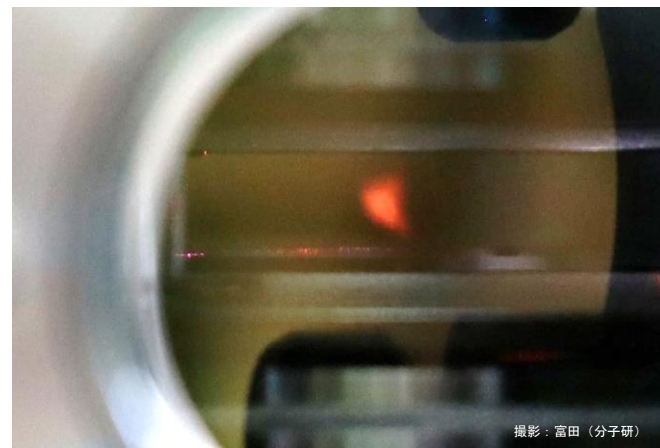
# 1. 導入

## ● 冷却原子

レーザー冷却などの冷却手法によって絶対零度付近まで冷却された原子気体  
~ $\mu\text{K}$  ~ $\text{nK}$

⇒ 量子性が顕著に現れる

- 波動性
- 内部/外部自由度の重ね合わせ
- エンタングルメント etc...



## ● 歴史

- 1980年代：原子気体のレーザー冷却・トラップ手法の開発

[PRL **48**, 596 (2012), PRL **55**, 48 (1985), PRL **59**, 2631 (1987): 1997年ノーベル物理学賞]

- 1995年：原子気体によるボース・アインシュタイン凝縮の実現

[Science **269**, 198-201 (1995), PRL **75**, 3969-3973 (1995): 2001年ノーベル物理学賞]

- 2000年代～：冷却原子気体を用いた量子技術：量子シミュレーション実験

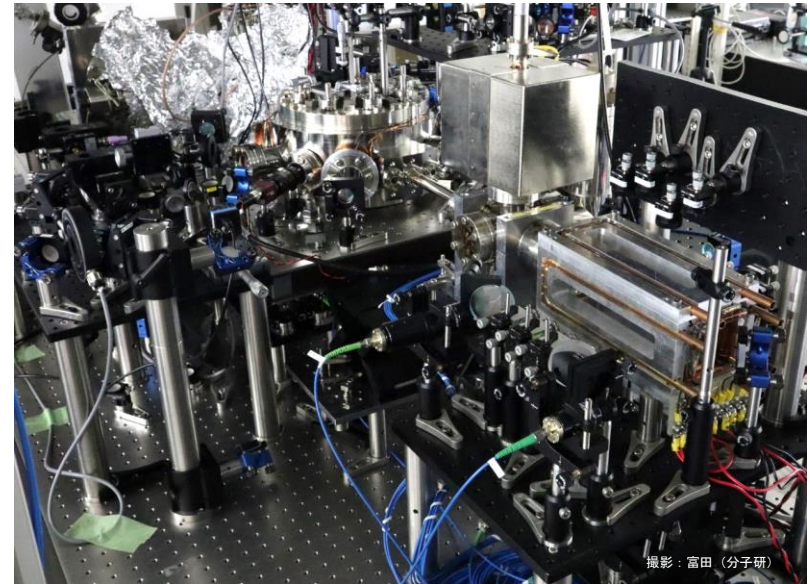
例えば「個別量子系の測定及び制御を可能にする画期的な実験手法」こちらも2012年ノーベル物理学賞



# 1. 導入

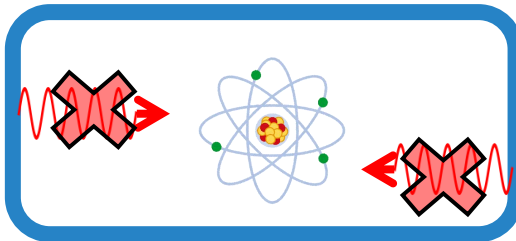
## • 冷却原子系

- **真空チャンバー:**
  - メタルチャンバー / ガラスセル
- **原子:**
  - 固体から蒸発（室温/加熱）
  - 初期温度～室温
- **レーザー光を照射**  
→ 冷却、状態操作、測定

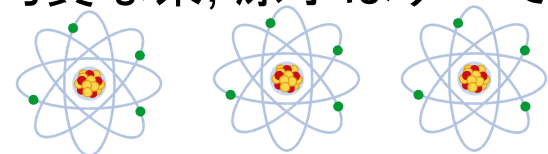


## • 特徴

- 孤立量子系



- 均質な系, 原子はすべて同じ



- 多様なチューニングノブ + 高い制御性
- 豊富な観測手法

# 1. 導入

## • 量子シミュレーション

量子力学に従う粒子が多数集まって相互作用する系 = **量子多体系**

例) 固体中の電子集団 (超伝導、磁性、...)

⇒ 定式化して“解く”：一般に困難

- **指数関数的増大** (例：ハミルトニアンの厳密対角化)
- 理論的アプローチ、数値計算手法の開発

$$\hat{H}|\Psi\rangle = E_0|\Psi\rangle$$
$$|\Psi(t)\rangle = e^{-i\frac{\hat{H}}{\hbar}t}|\Psi(0)\rangle$$

### 量子シミュレーション

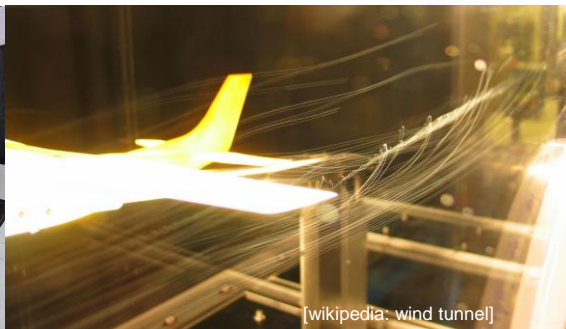
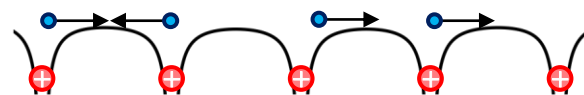
高い制御性を持つ  
人工的な量子多体系



**実験的に**  
シミュレート



“解く”のが困難  
複雑な量子多体物理現象



量子版”風洞実験”

**高い制御性のある冷却原子**  
を用いて実現

## 2. 状態準備

- 冷却原子実験の流れ



- 使用する原子

- 原子種

レーザー冷却  $\Rightarrow$  高速で光子の吸収放出サイクルができる閉じた遷移

➤ アルカリ金属 や アルカリ土類(様)金属 など

□ 電子準位構造、遷移強度 などが異なる

- 同位体

粒子統計性 例)  ${}^6\text{Li} \Rightarrow$  フェルミオン,  ${}^7\text{Li} \Rightarrow$  ボソン

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

Group

Period

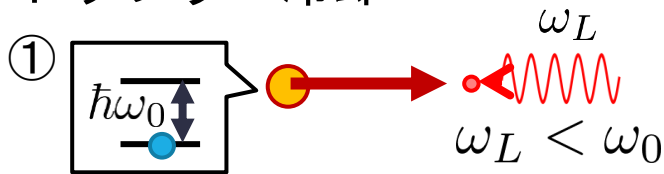
[wikipedia: periodic table]

□ 相互作用の大きさ (引力 / 斥力)、スピン などの多様性を活用

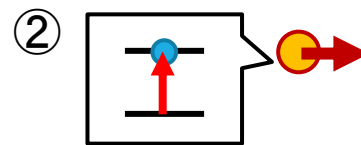
## 2. 状態準備

- レーザー冷却 = レーザー光で気体原子を冷却 = 減速させる

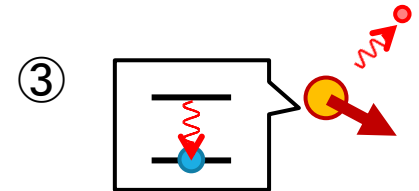
- ドップラー冷却



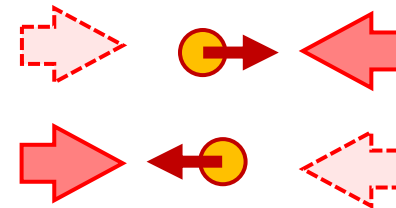
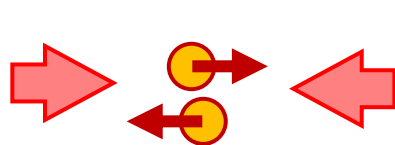
ドップラー効果  
→ 周波数が高く見える



「原子にとって」共鳴  
→ 光を吸収し減速



自然放出  
→ 方向はランダム=平均ゼロ



: 抵抗力

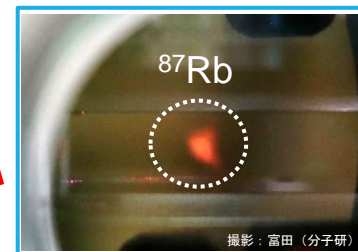
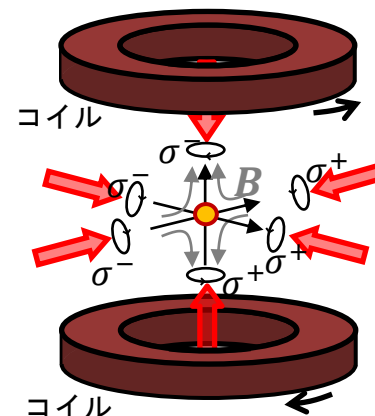
- 磁気光学トラップ

磁場勾配 + 偏光

→ 中心から離れるほど強い力: 復元力

抵抗力 + 復元力 = 冷却 + トラップ

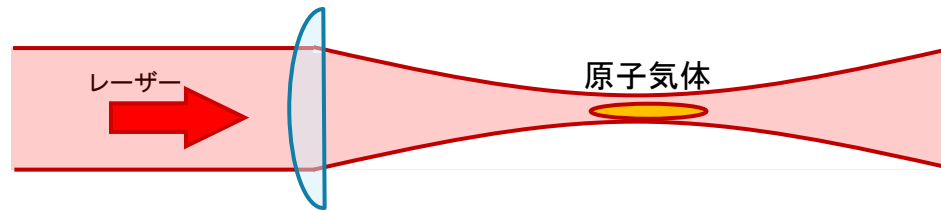
例) Rb ~ 100  $\mu$ K



## 2. 状態準備

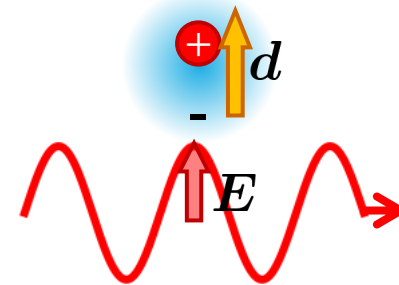
- 光双極子トラップ (optical dipole trap)

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



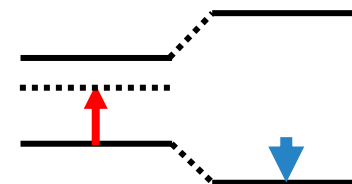
レーザー電場  $E$  → 原子が分極: 双極子  $d$

$$U = -d \cdot E$$



$\omega_L < \omega_0$  同位相で振動 = 双極子と電場の向きが揃う →  $U < 0$  引力

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)



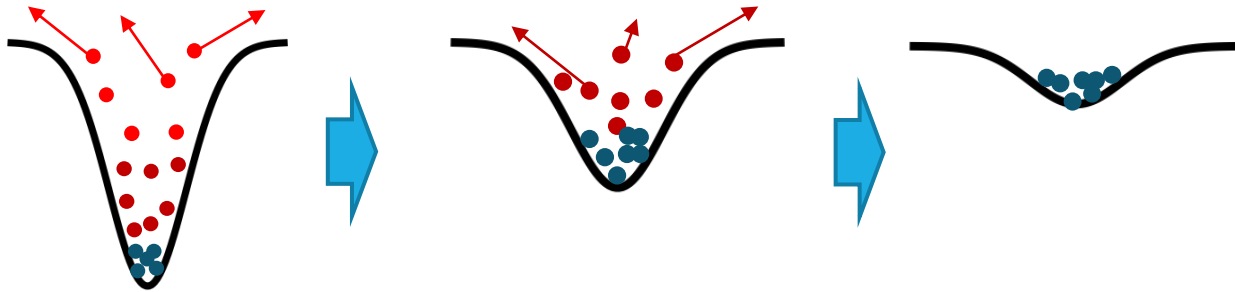
□ 磁気光学トラップ中の原子を光双極子トラップへ



## 2. 状態準備

- 蒸発冷却

トラップポテンシャルを浅くして”熱い”原子を逃がす(蒸発) → 熱平衡化



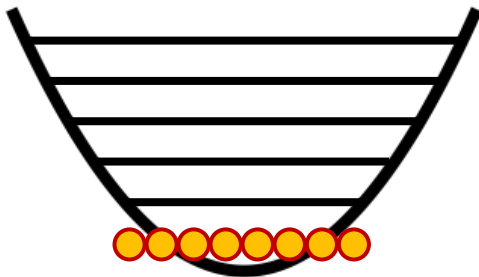
大半の原子を捨てる

→ 残った原子: 冷却 ~ 量子縮退気体 : 温度 ~ nK

- 量子縮退気体

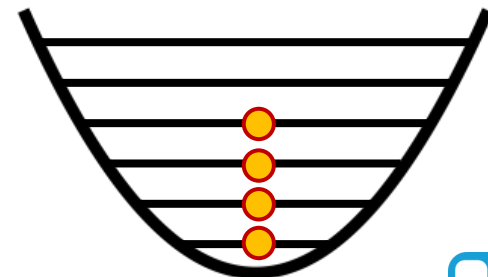
- ボソン

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)



- フェルミオン

フェルミ縮退気体

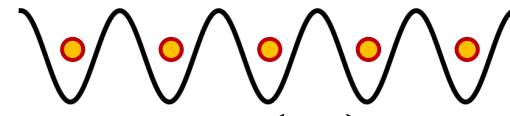
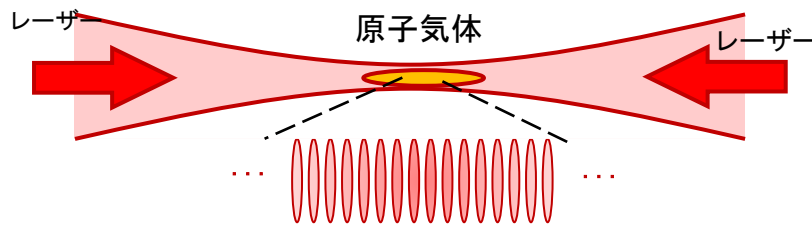




## 2. 状態準備

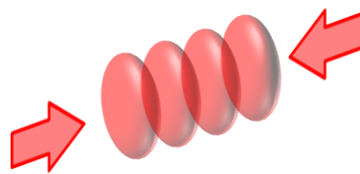
- 光格子 (optical lattice)

対向するレーザー光で作る**定在波**  
からなる**周期ポテンシャル**

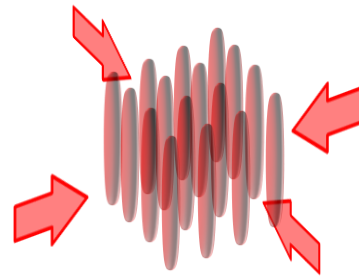


格子定数  $d = \lambda_L/2 \sim \text{数}100 \text{ nm}$

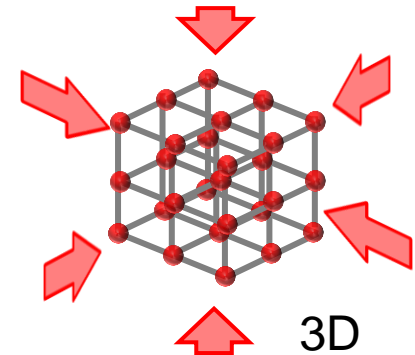
- 次元性



1D

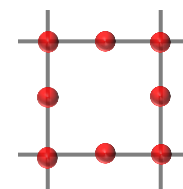
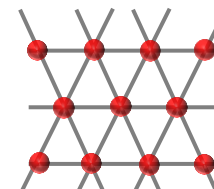
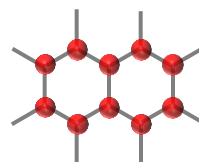
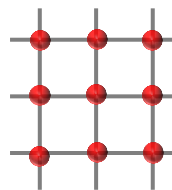


2D



3D

- 多様な格子構造



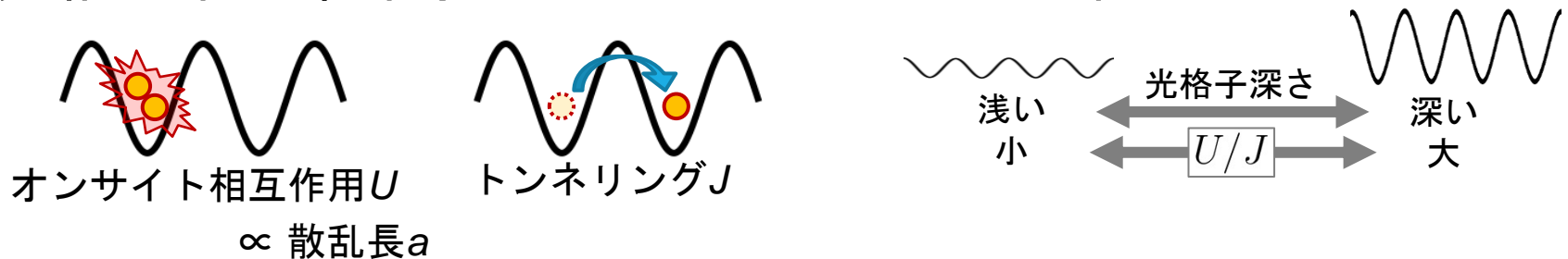
- 格子欠陥無し

# 3. 相互作用

- 極低温原子気体： **s波散乱長**  $a$ で決まる**接触型**相互作用

- $a > 0$  斥力,  $a < 0$  引力： 原子種, 同位体 に依存
  - フェッシュバッハ共鳴： 磁場で散乱長を制御

- 光格子中の冷却原子 = ハバードモデルで記述



- ボソン：ボース・ハバード系 
$$\hat{H}_{\text{BH}} = \underbrace{-J \sum_{\langle i,j \rangle} (\hat{a}_i^\dagger \hat{a}_j + \hat{a}_i \hat{a}_j^\dagger)}_{\text{トンネリング}} + \underbrace{\frac{U}{2} \sum_i \hat{n}_i (\hat{n}_i - 1)}_{\text{オンサイト相互作用}}$$

- フェルミオン：フェルミ・ハバード系

$$\hat{H}_{\text{FH}} = -J \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (\hat{c}_{i,\sigma}^\dagger \hat{c}_{j,\sigma} + \hat{c}_{i,\sigma} \hat{c}_{j,\sigma}^\dagger) + U \sum_i \hat{n}_{i,\uparrow} \hat{n}_{i,\downarrow}$$

# 4. 制御方法

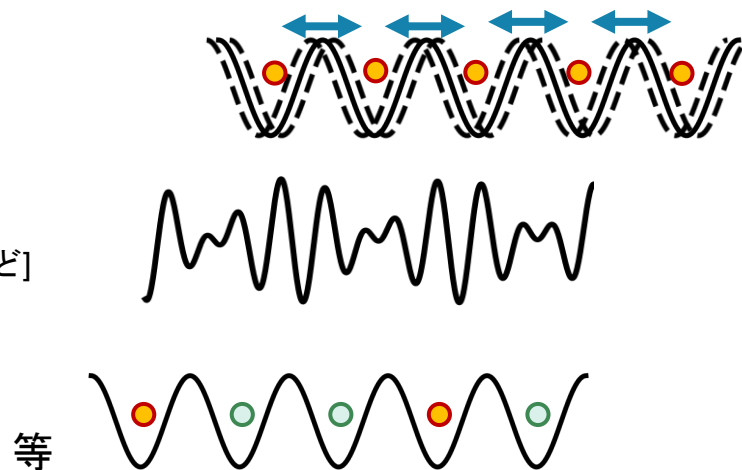
- 系(ハミルトニアン)の制御

- 光格子深さ      □ フェッシュバッハ共鳴

- 光格子の周期的変調: トンネリング  
[PRL 99, 220403 (2007)]

- ポテンシャル障壁・ランダムネス  
[Science 349, 842-845 (2015)など]

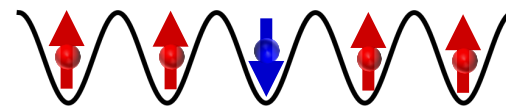
- 複数の原子種・同位体・電子状態の混合系  
[PRL 96, 180402 (2006)など]



- 状態操作

- 内部状態・スピン操作 ( $\pi$ パルス, 光ポンピングなど)

- 光の個別アクセス → 個別状態操作  
[Nature 471, 319-324 (2011)]

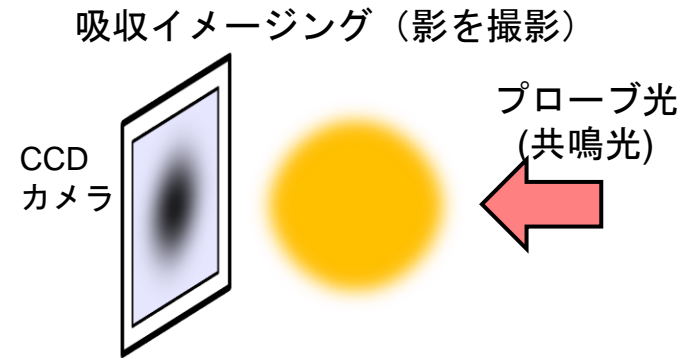
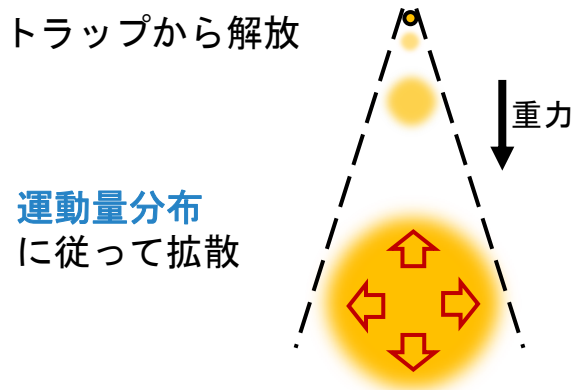


- 制御時間    □ ダイナミクス:  $\sim$  ms    □ 実験全体  $\sim$  10秒

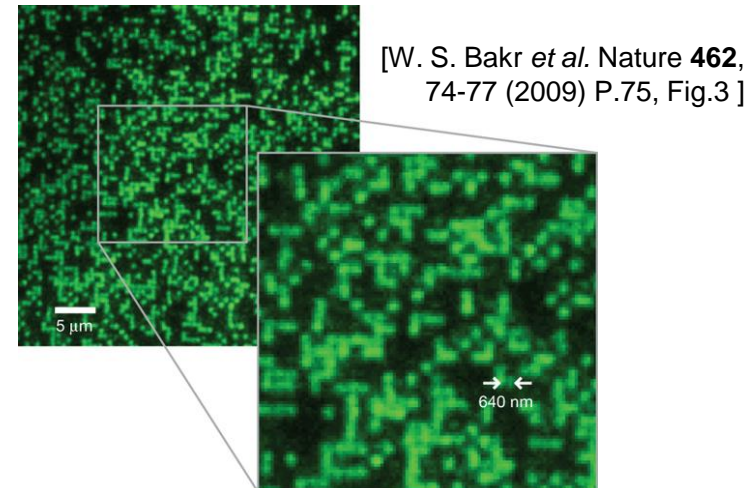
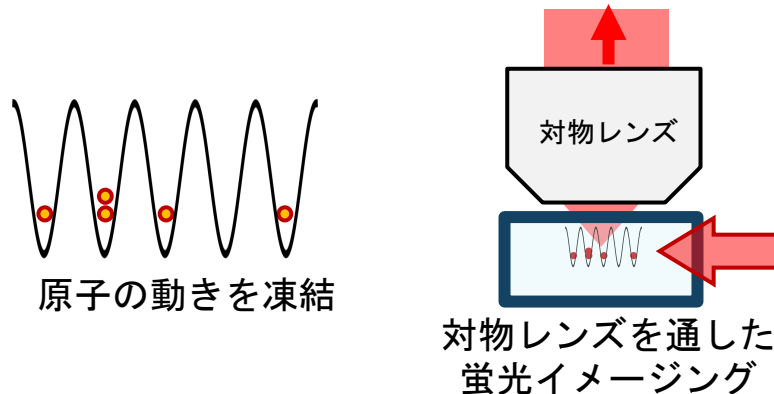
→ 量子多体系の基底状態(相) やダイナミクスをつくりだし、測定

# 5. 測定

- Time-of-Flight(TOF)法 自由拡散により運動量分布や温度を観測



- 量子気体顕微鏡 2次元光格子中の原子の位置を直接観測, 空間分布や相関



- その他：蛍光イメージング(集団)、分光的手法（電子状態, 空間構造）

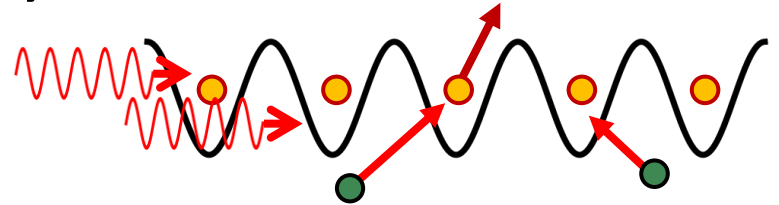
# 6. コヒーレンス

- コヒーレンス

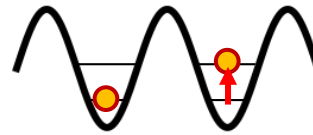
- 周辺環境との接触はほぼ無視できる(孤立量子系)

トラップ中の原子の寿命  $\gg$  実験時間

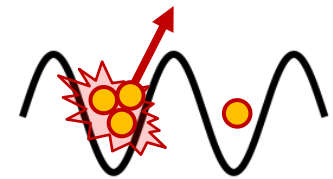
- バックグラウンドガスとの衝突
- トラップ光による加熱



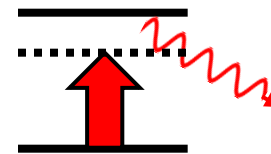
- 操作の非断熱性による加熱



- 非弾性衝突 (2体, 3体), 粒子ロス



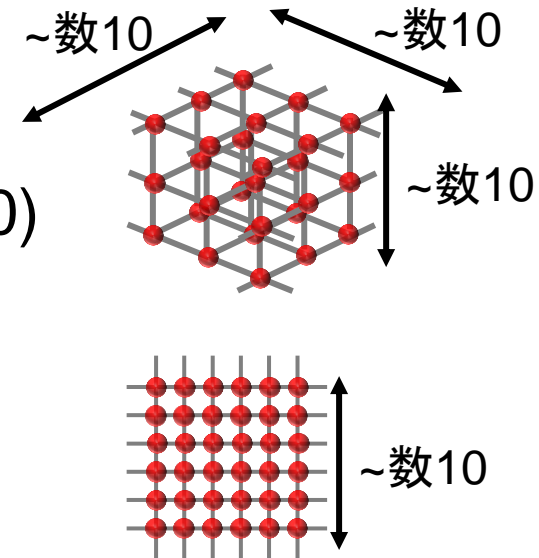
- 自然放出, 光散乱 (内部自由度)



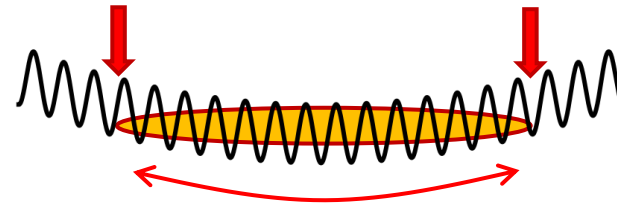
# 7. スケール

- 原子数

- 3次元光格子中:  $10^4 \sim 10^5$ 個 (1辺 ~ 数10)
- 量子気体顕微鏡 (2次元1層):  $\sim 10^3$ 個



- 調和ポテンシャル

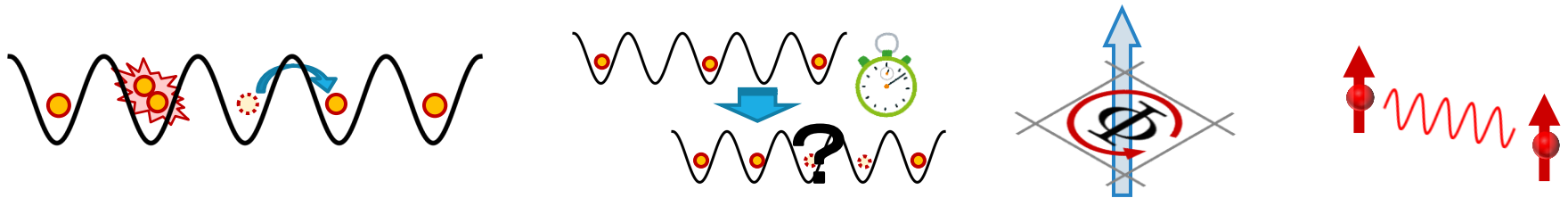


→ ポテンシャル形状を制御して均質な系に

# 8. 応用

## • 光格子量子シミュレーション

- ボース・ハバード系
- フェルミ・ハバード系
- 乱れ(disorder)のある系, 不純物系
- 開放量子系
- 人工ゲージ場, トポロジカル量子現象
- etc...
- 非平衡ダイナミクス



## • 量子縮退気体 (BEC, フェルミ縮退)

- 量子渦、フェルミ超流動

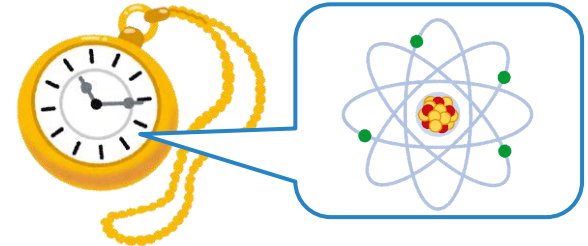
[詳しくは、C. J. Pethick & H. Smith “Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases”  
Cambridge University Press (2<sup>nd</sup> edition: 2008), 和訳版あり]



# 9. 他の系との関連

- 時計（周波数標準）

- 原子時計
  - 光格子時計
- ↔ イオンを用いた時計

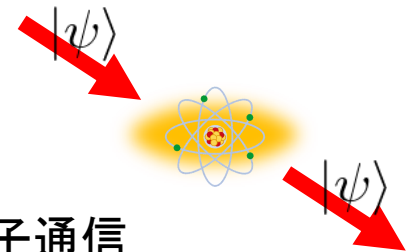


- 冷却原子を用いた量子センシング

- 物質波の干渉を使った加速度・ジャイロセンサー

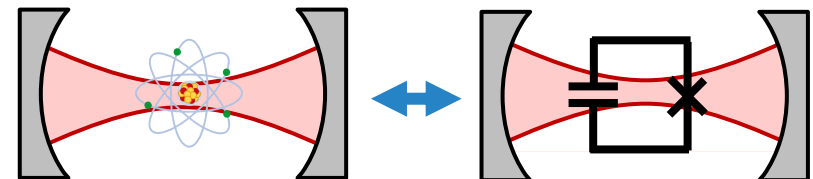
- 冷却原子を用いた量子メモリ

- 光の量子情報を原子の内部自由度に保持・取り出し→ 量子通信



- キャビティ中の冷却原子(cavity QED)

- 超伝導量子ビット系: “人工原子”



# 10.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)
- 冷却原子気体の教科書:
  - C. J. Pethick & H. Smith “Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases” Cambridge University Press (2<sup>nd</sup> edition: 2008)
  - 1<sup>st</sup> editionの和訳版: 「ボース・アインシュタイン凝縮」 吉岡書店 (2005)
- 冷却原子量子シミュレーションのレビュー論文:
  - F. Schäfer *et al.*, “Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices” Nat. Rev. Phys. **2**, 411-425 (2020) [arXiv: 2006.06120]
  - I. Bloch, J. Dalibard, and W. Zwerger “Many-body physics with ultracold gases” Rev. Mod. Phys. **80**, 885 (2008) [arXiv: 0704.3011]