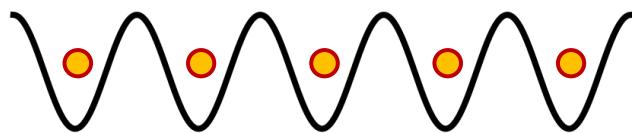
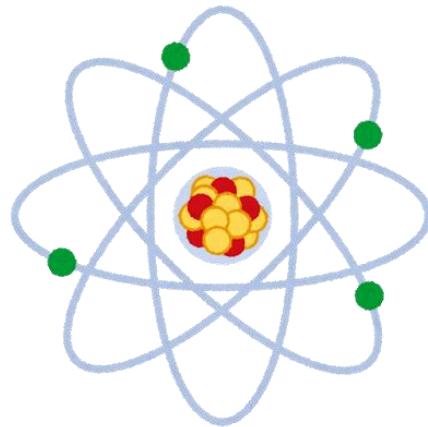




Q-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム



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

$|0\rangle^+ |1\rangle$

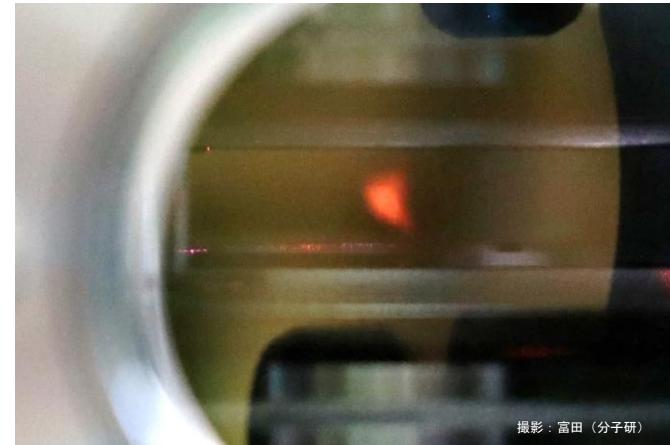
1. 導入

• 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
 $\sim \mu\text{K} \sim \text{nK}$

⇒ **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]

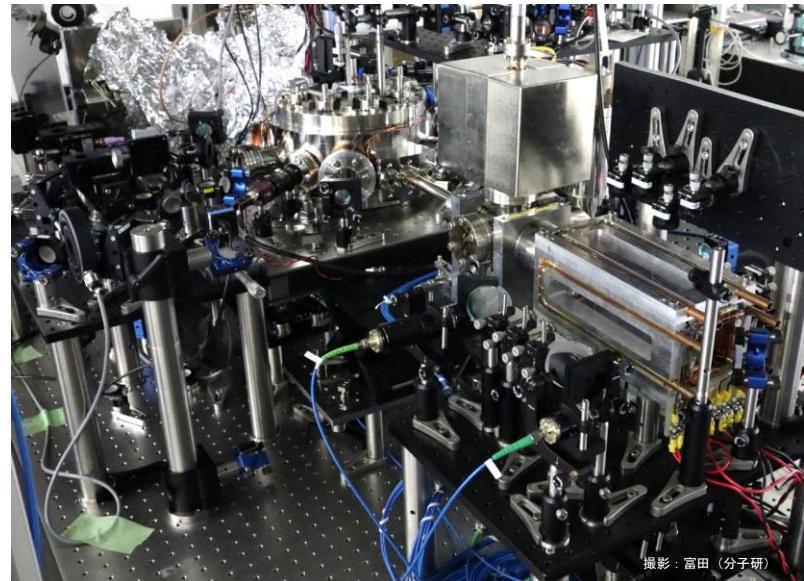
- 2000年代～：冷却原子気体を用いた**量子技術**：量子シミュレーション実験

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

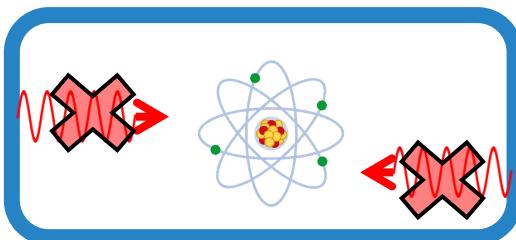
• 冷却原子系

- 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

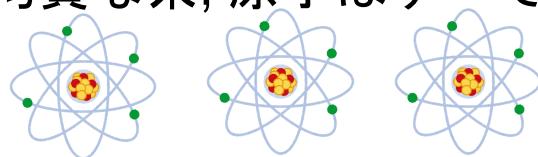


• 特徴

- 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

$$\hat{H}|\Psi\rangle = E_0|\Psi\rangle$$

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

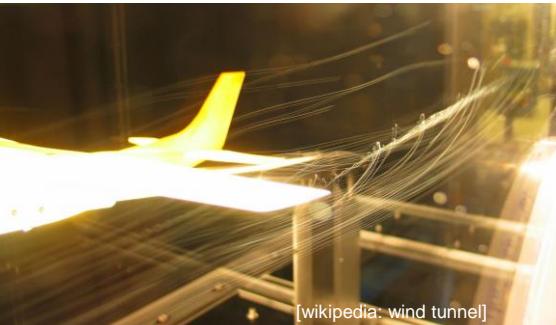
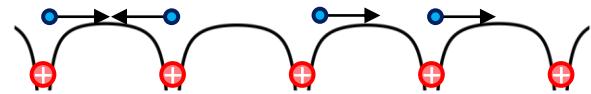
量子シミュレーション

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
複雑な量子多体系物理現象



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 ⇒ 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																	
1	2	3*	4	5	6	7	8	9	10	11	12†	13	14	15	16	17‡	18‡
H	He		Ti	V	Cr	24	Fe	Co	Ni	Cu	30	Ga	32	33	34	35	36
Li	Be		23	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Na	Mg		22	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
K	Ca	Sc	21	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Rb	Sr	Y	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Cs	Ba	La	55	56	57	58-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
Fr	Ra	Ac	89	90-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
					Rb	Dy	Ba	Bt	Hs	Mt	Rg	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Og

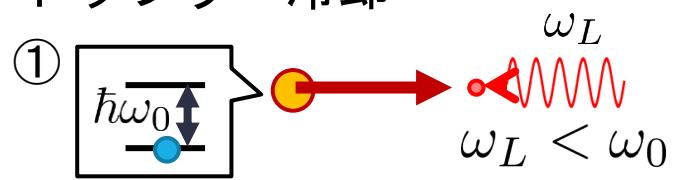
[wikipedia: periodic table]

□ 相互作用の大きさ (引力 / 斥力) 、スピンなどの多様性を活用

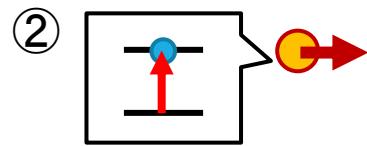
2. 状態準備

- レーザー冷却 = レーザー光で気体原子を冷却 = 減速させる

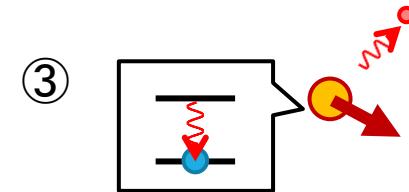
- ドップラー冷却



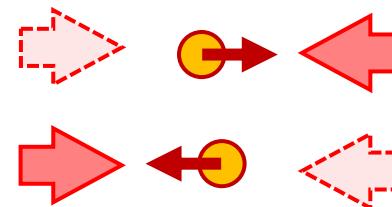
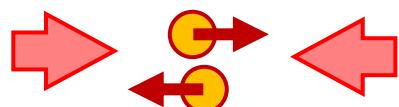
ドップラー効果
→ 周波数が高く見える



「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



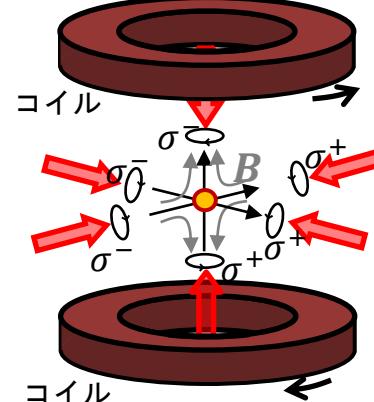
: 抵抗力

- 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 μK

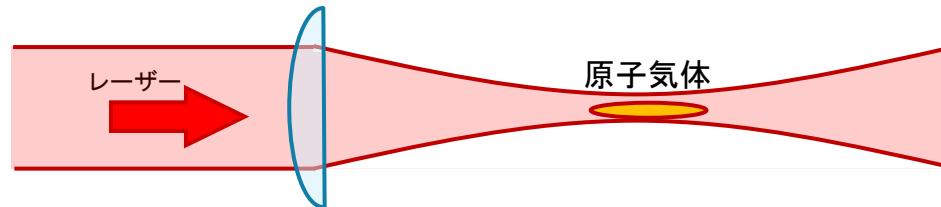


撮影：富田（分子研）

2. 状態準備

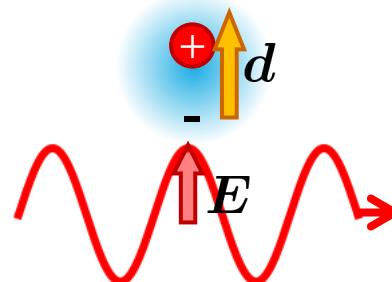
・光双極子トラップ (optical dipole trap)

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



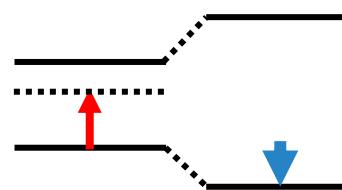
レーザー電場 $E \rightarrow$ 原子が分極: 双極子 d

$$U = -d \cdot E$$



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

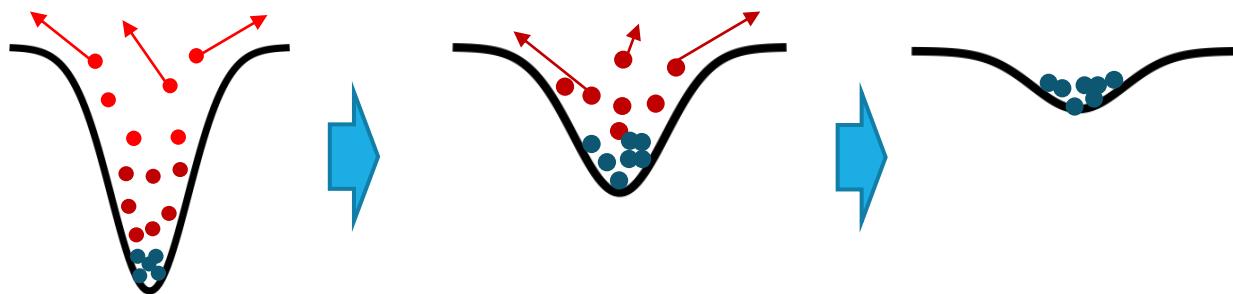


□ 磁気光学トラップ中の原子を光双極子トラップへ

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



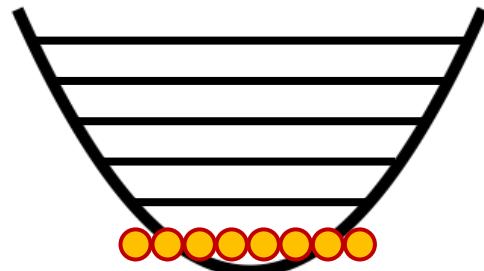
大半の原子を捨てる

→ 残った原子: 冷却 ~ **量子縮退気体** : 温度 ~ nK

• 量子縮退気体

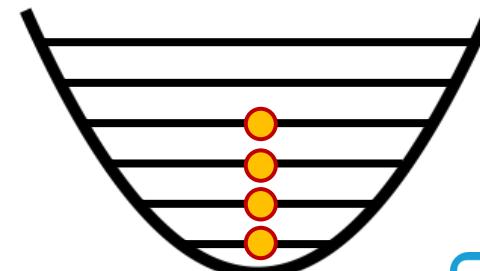
- ボソン

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)



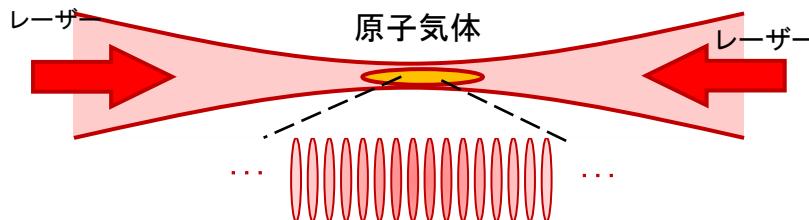
- フェルミオン

フェルミ縮退気体

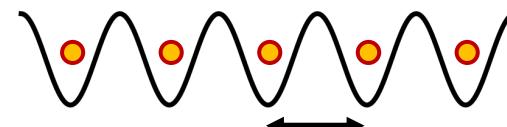


2. 状態準備

- 光格子 (optical lattice)

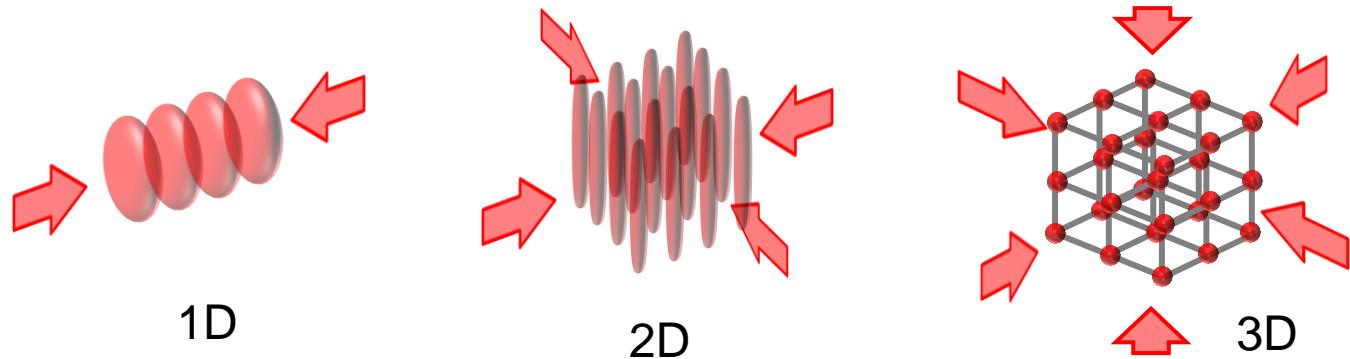


対向するレーザー光で作る定在波
からなる周期ポテンシャル



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

- 次元性

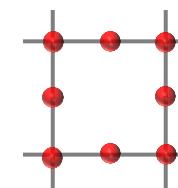
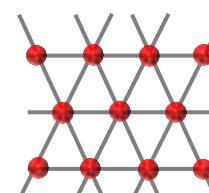
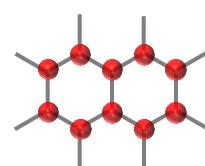
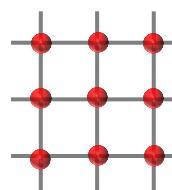


1D

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

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

トンネリング 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

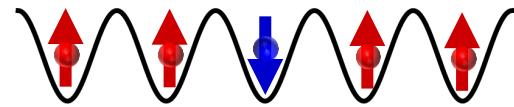
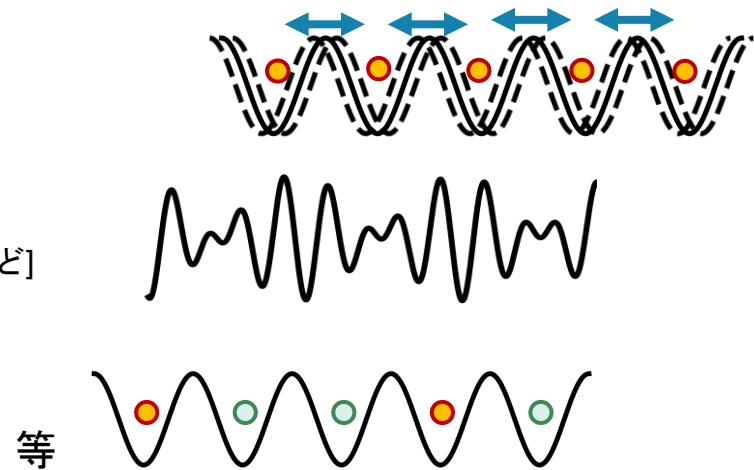
□ 内部状態・スピン操作 (π パルス, 光ポンピングなど)

□ 光の個別アクセス → 個別状態操作

[Nature 471, 319-324 (2011)]

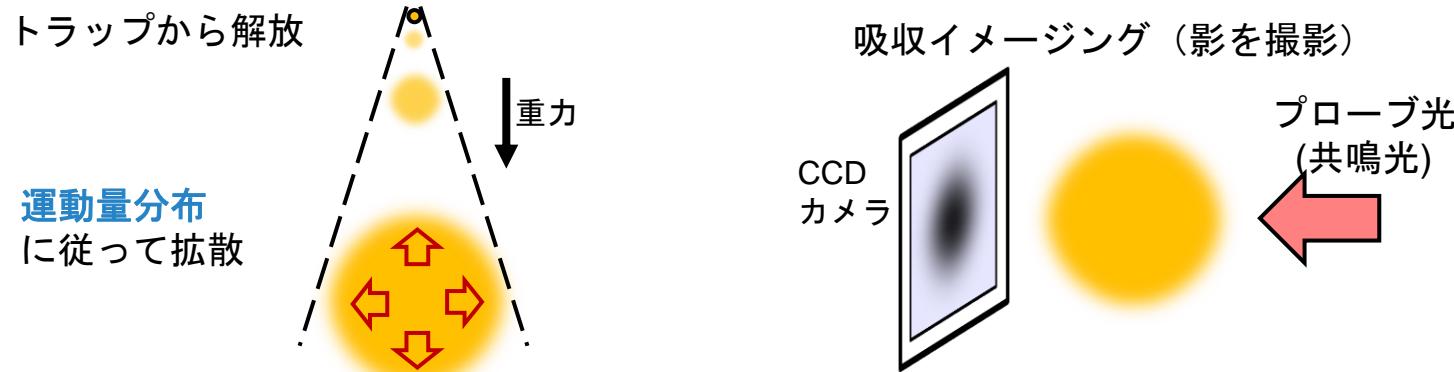
• 制御時間 □ ダイナミクス: ~ ms □ 実験全体 ~ 10秒

→ 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

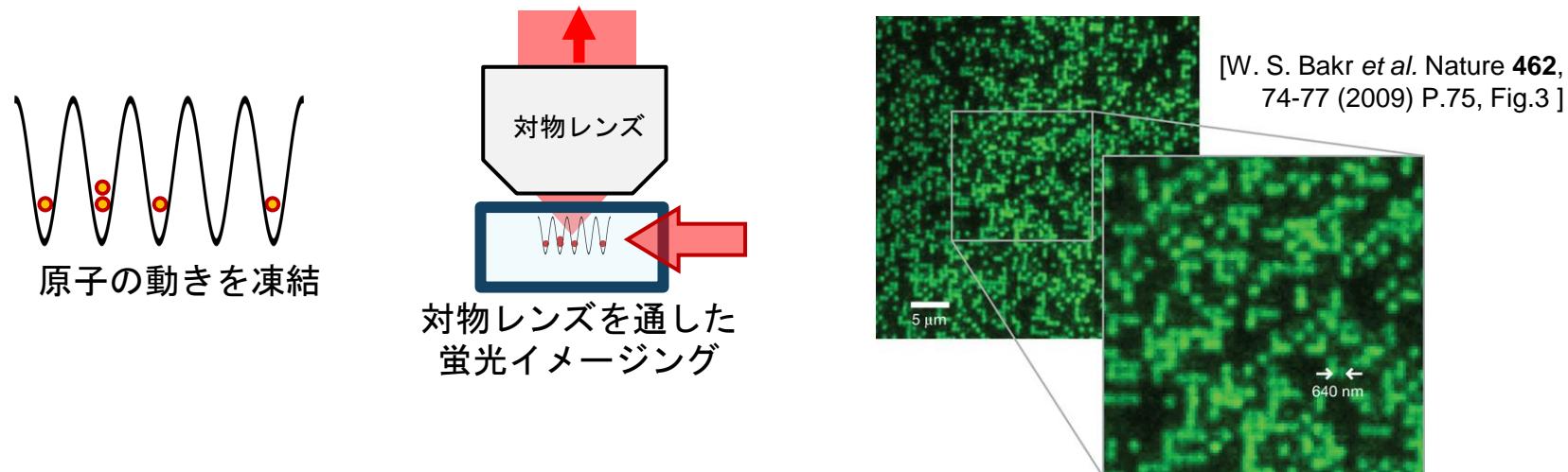


5. 測定

- 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）

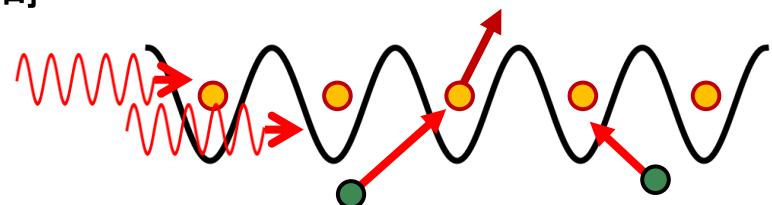
6. コヒーレンス

- コヒーレンス

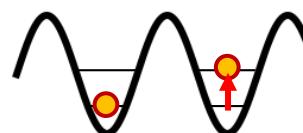
- 周辺環境との接触はほぼ無視できる(孤立量子系)

トラップ中の原子の寿命 $>>$ 実験時間

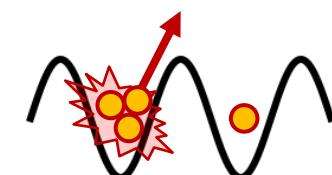
- バックグラウンドガスとの衝突
- トラップ光による加熱



- 操作の非断熱性による加熱



- 非弹性衝突 (2体, 3体), 粒子ロス



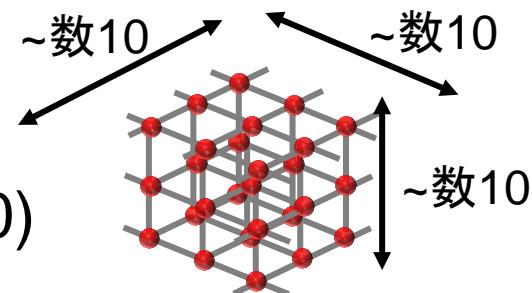
- 自然放出, 光散乱 (内部自由度)



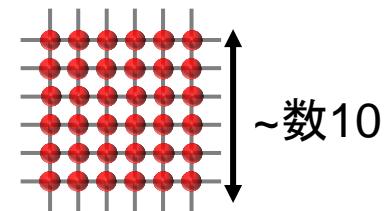
7. スケール

- 原子数

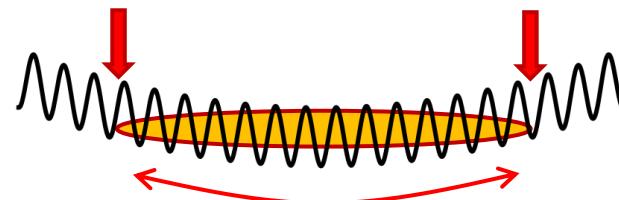
- 3次元光格子中: $10^4 \sim 10^5$ 個 (1辺 ~ 数10)



- 量子気体顕微鏡 (2次元1層) : ~ 10^3 個



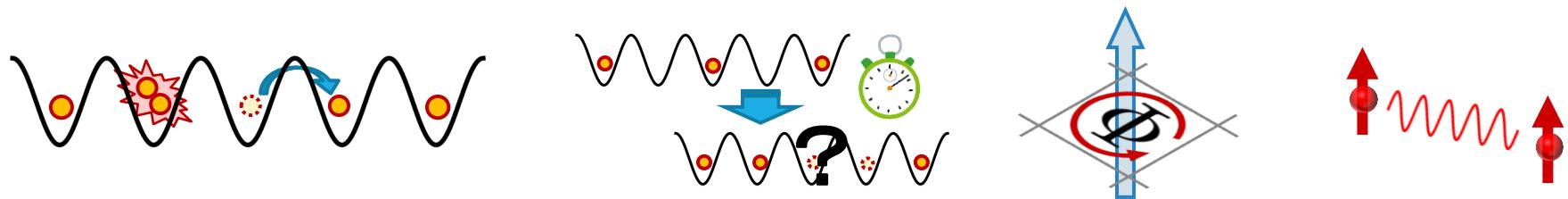
- 調和ポテンシャル



→ 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
 - 亂れ(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



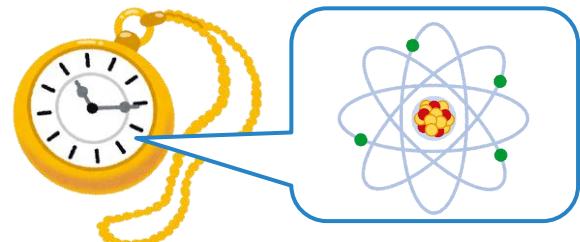
- 量子縮退気体 (BEC, フェルミ縮退)
 - 量子渦、フェルミ超流動

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

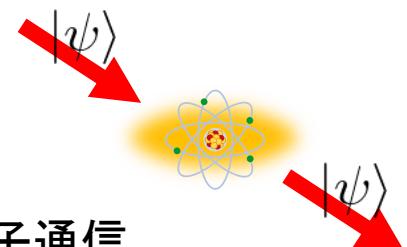
9. 他の系との関連

- 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

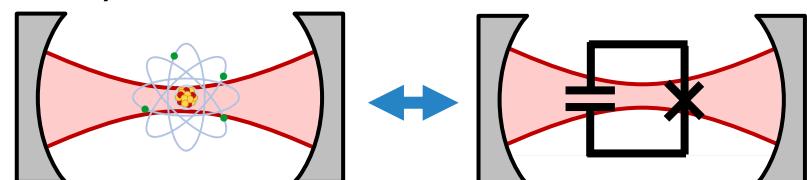


- 冷却原子を用いた量子センシング
 - 物質波の干渉を使った加速度・ジャイロセンサー



- 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 (2nd edition: 2008)
 - 1st editionの和訳版：「ボース・AIN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]