

レーザー冷却原子実験 の最前線

高橋義朗

yitk@scphys.kyoto-u.ac.jp

5-203号室

物1量子光学研究室

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

Outline

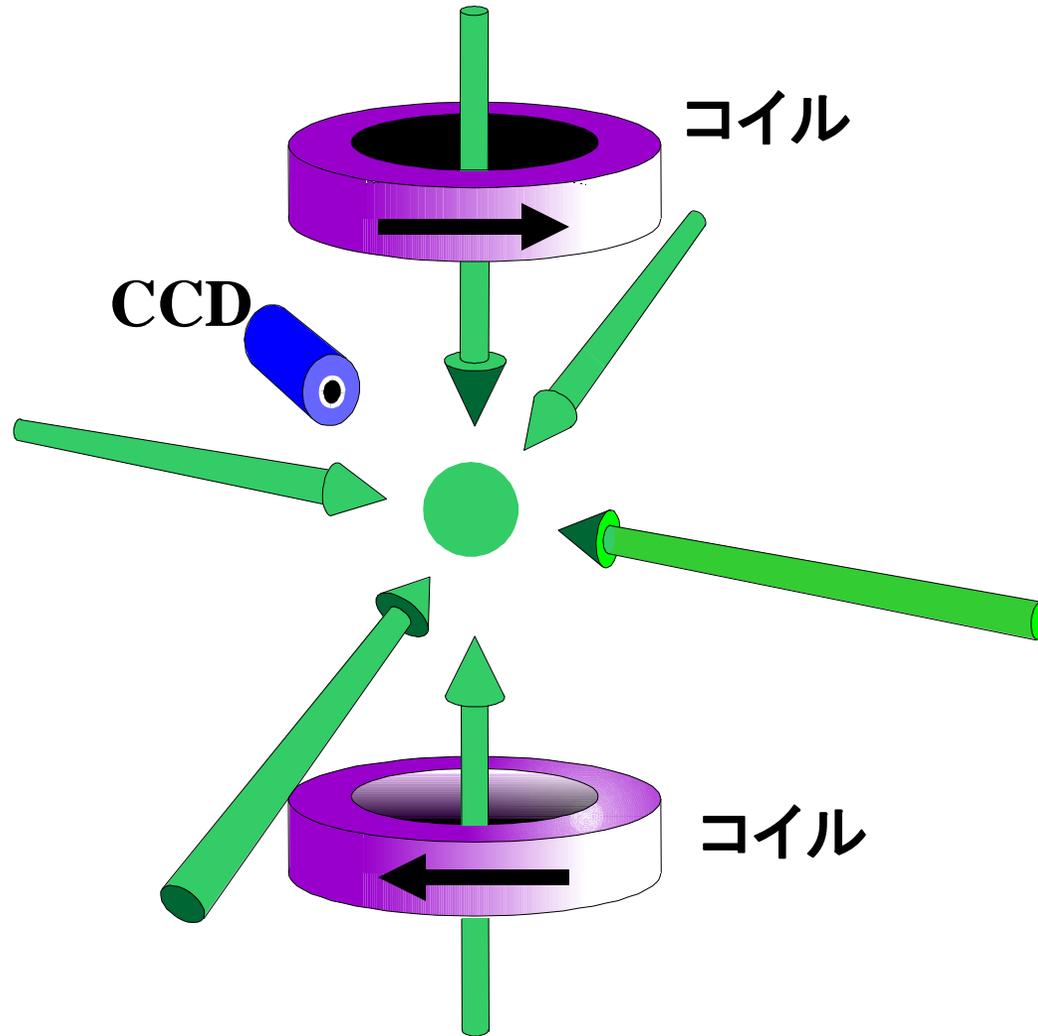
- **イントロダクション**
 - **原子の冷却・トラップ**
- **凝縮系の量子シミュレーション**
 - **光格子中の冷却原子**

レーザー冷却・トラップ

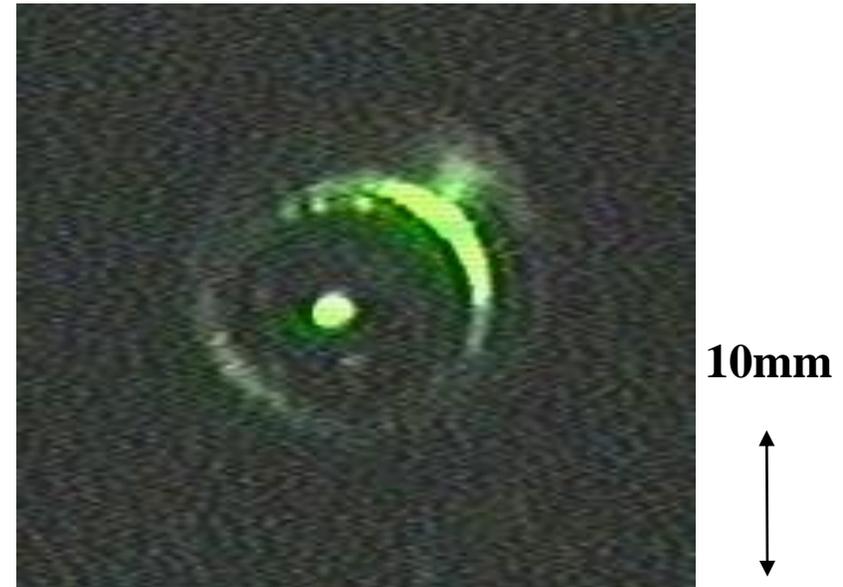
—— 磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap: MOT) ——

3次元的な不均一 (=空間的に変化する) 磁場によるゼーマン効果を利用

——→ 空間のある領域に閉じ込める (=トラップ) することが可能



原子のMOT



原子数 = 10^8

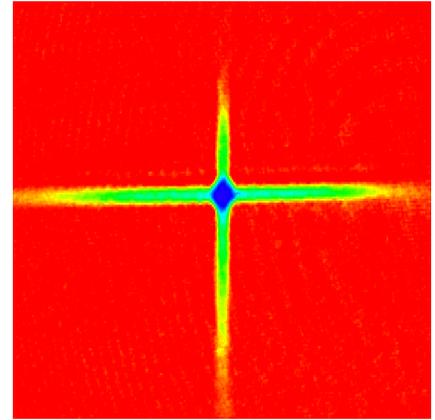
温度 $T = 12\mu\text{K}$

レーザー冷却・トラップ

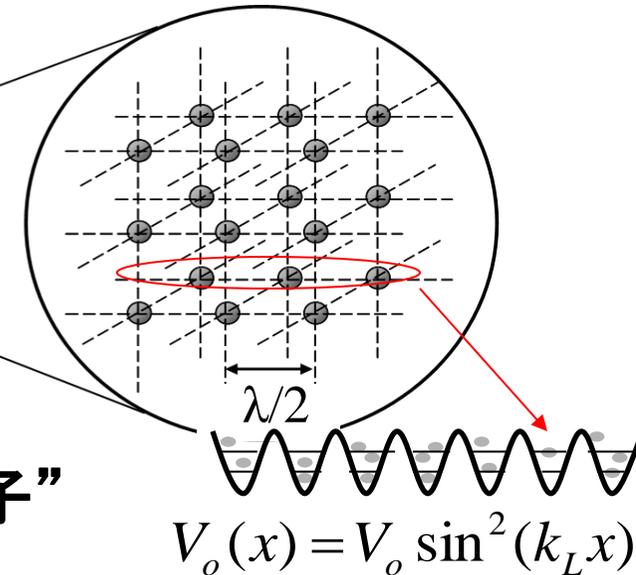
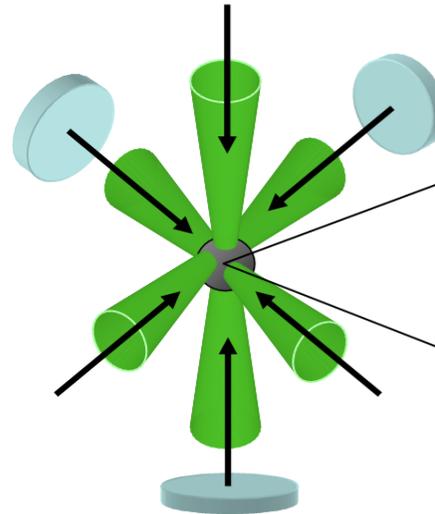
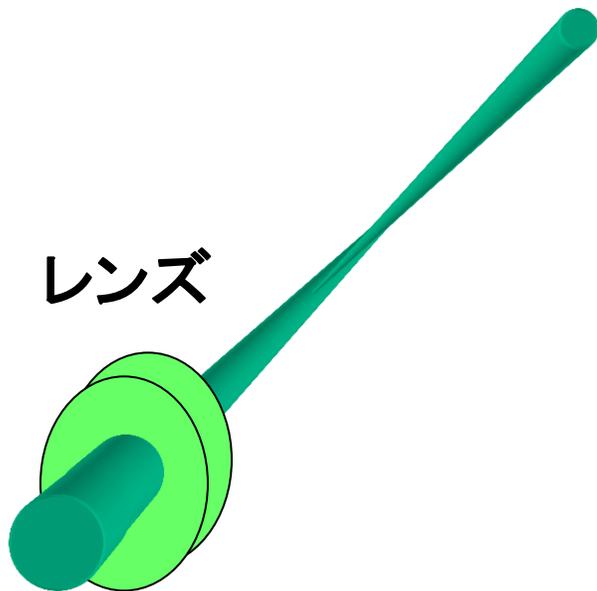
—— 光が原子に及ぼす力: 双極子力 ——

光双極子相互作用: $V_{\text{int}} = -p \times E$

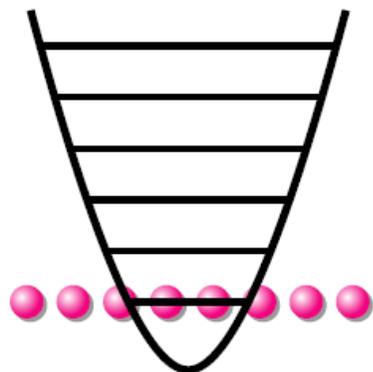
$$U_{\text{pot}}(r) = -\frac{\chi E(r)^2}{2}$$



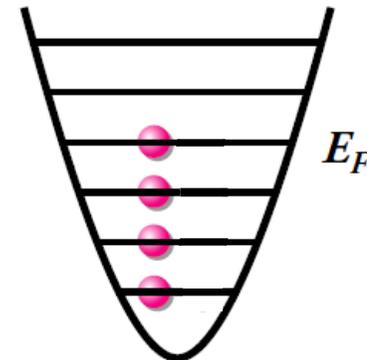
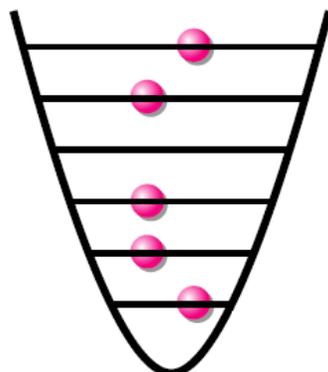
→ 強度が空間的に極大または極小を持つようなレーザービームを用いることで、トラップすることが可能



量子原子気体！

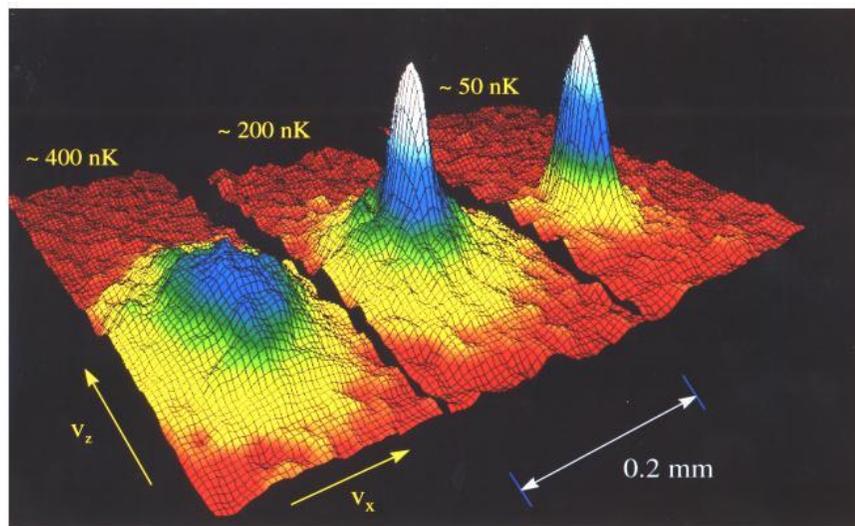


“ボースアインシュタイン凝縮”



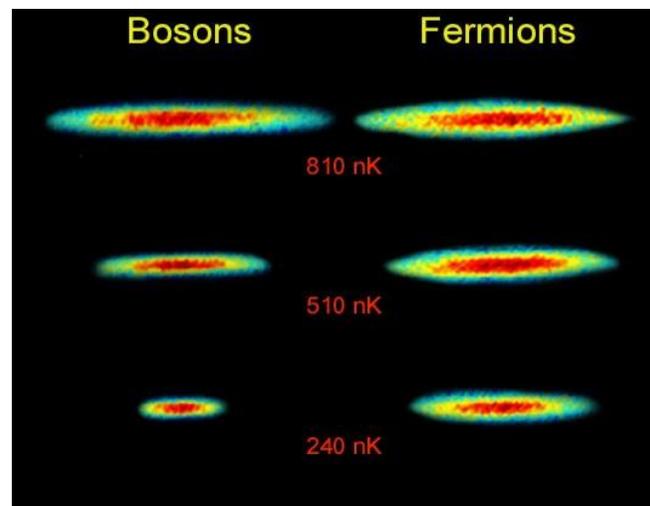
“フェルミ縮退”

^{87}Rb



運動量分布

[E. Cornell et al, (1995)]



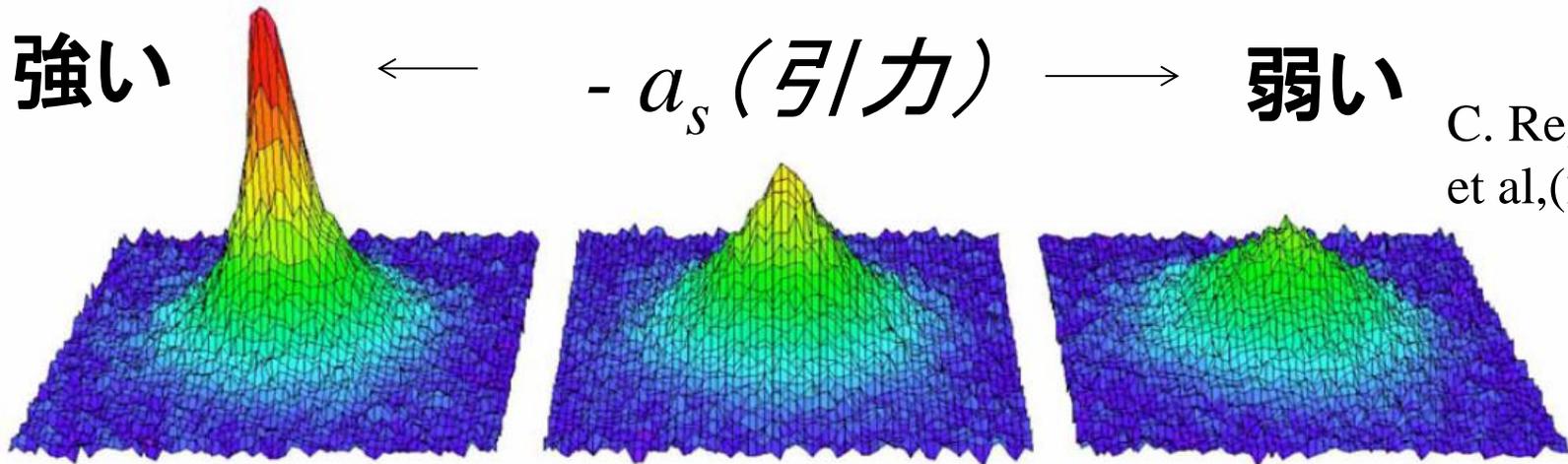
^6Li and ^7Li

空間分布

[R. Hulet et al, (2000)]

— 中性フェルミ原子の対生成による超流動 —

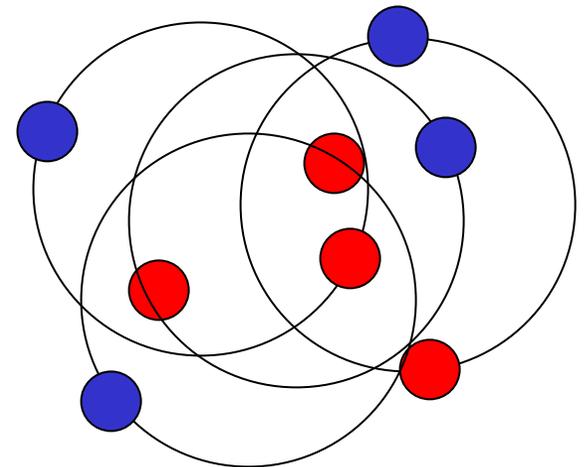
$$T_{BCS} \approx 0.3T_F \exp\left(-\frac{\pi}{2k_F|a_s|}\right)$$



C. Regal,
et al,(2004)

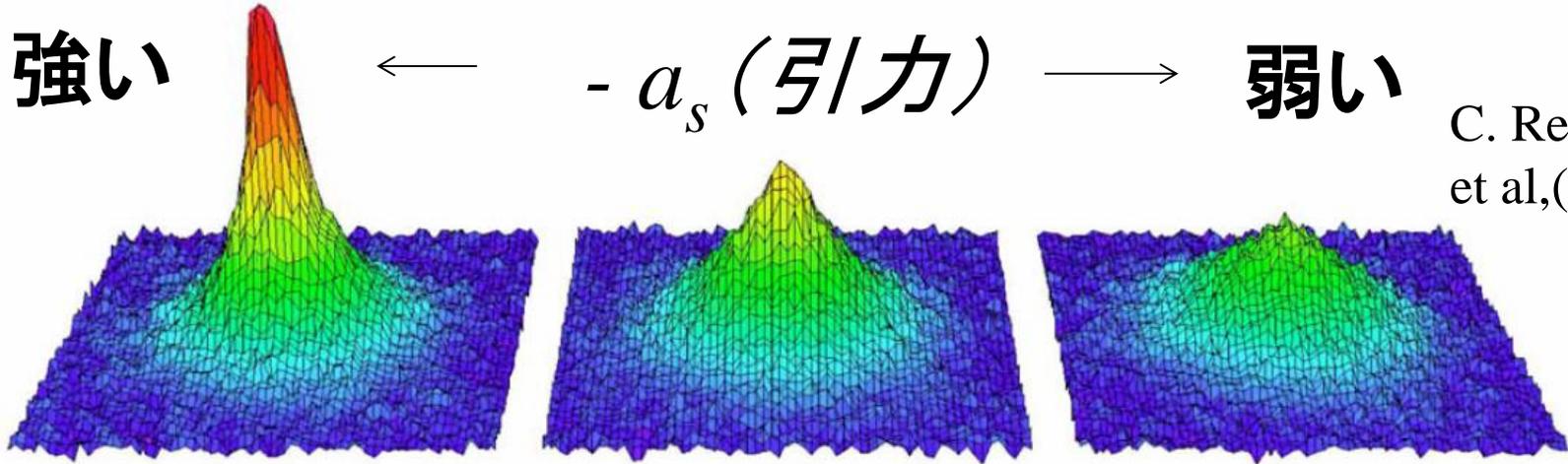
金属の超伝導: 抵抗がゼロ

電子の2つの状態
(● ●)に引力が働いて
対を形成(クーパー対)



— 中性フェルミ原子の対生成による超流動 —

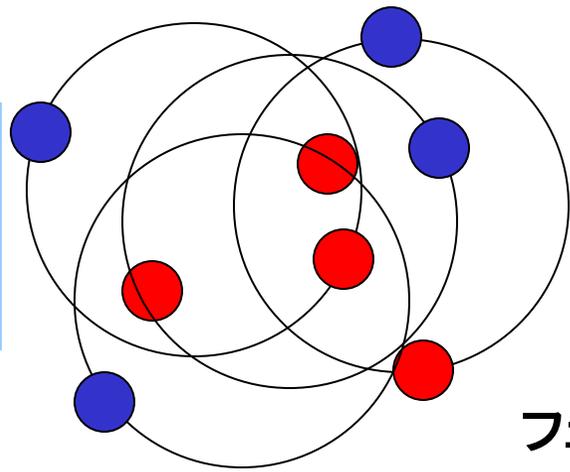
$$T_{BCS} \approx 0.3T_F \exp\left(-\frac{\pi}{2k_F|a_s|}\right)$$



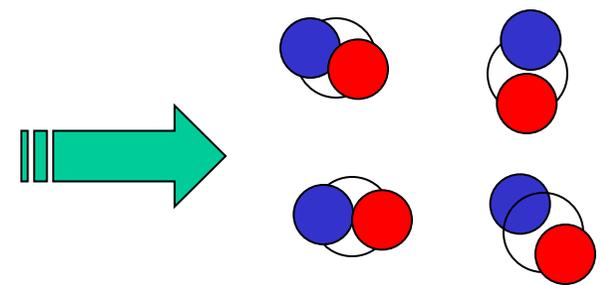
C. Regal, et al, (2004)

中性原子の超流動:

原子の2つの状態
(● ●)に引力が働いて
対を形成(クーパー対)

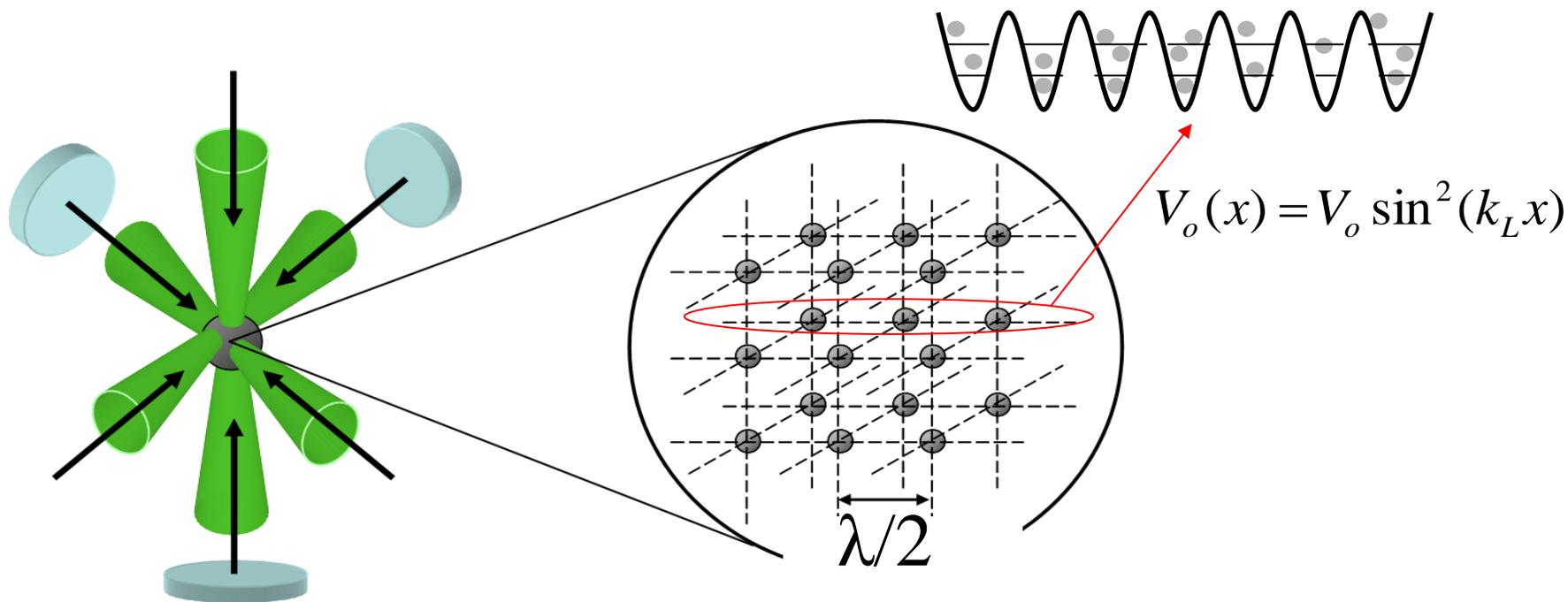


分子のBEC



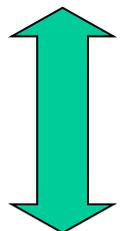
フェッシュバツハ共鳴

— 光格子量子シミュレーション —



光格子の中を運動する原子

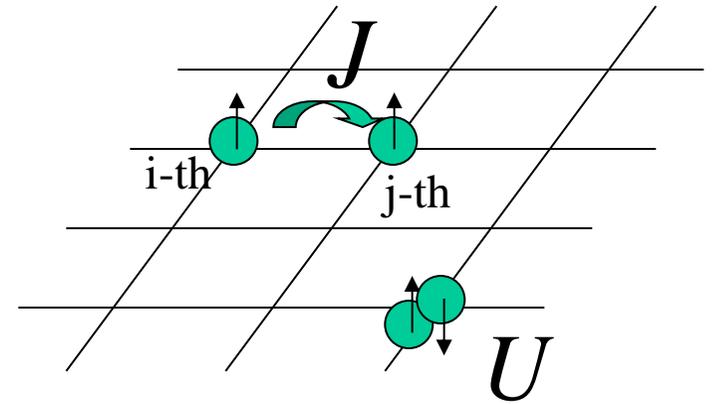
“ハバード模型”



固体：結晶格子の中を運動する電子

— ハバード模型 —

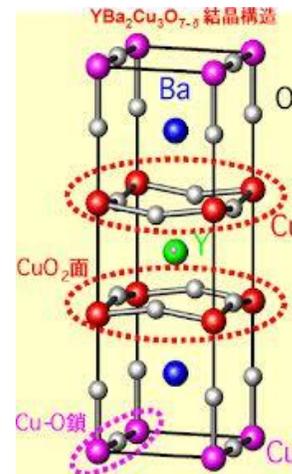
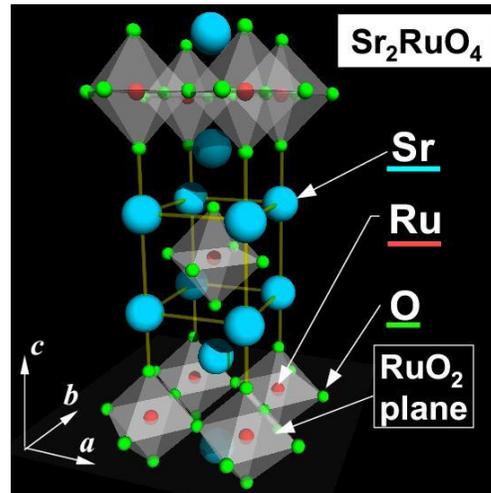
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} c_i^+ c_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



↑
ホッピング項

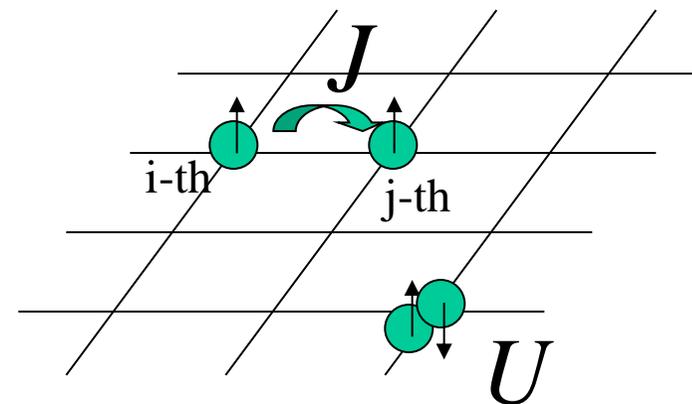
↑
(オンサイト)相互作用項

—————→ 磁性, 高温超伝導, ...



— ハバード模型 —

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} c_i^+ c_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



↑
ホッピング項

↑
(オンサイト)相互作用項

→ さまざまな数値計算の手法

DMFT(動的平均場)

Gutzwiller

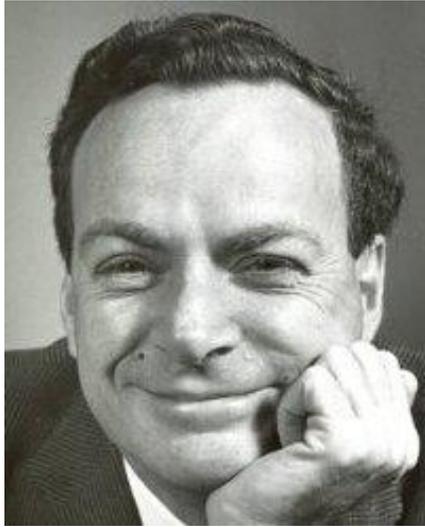
QMC(量子モンテカルロ)

DMRG(密度行列繰り込み群)

Exact Diagonalization(厳密対角化),...

— 量子シミュレーションって何？ —

R. Feynman



“**Simulating Physics with Computers**” by R. Feynman,
International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Nos.6/7
467-488(1982)

**CAN QUANTUM SYSTEMS BE
PROBABILISTICALLY
SIMULATED BY A CLASSICAL
COMPUTER?**

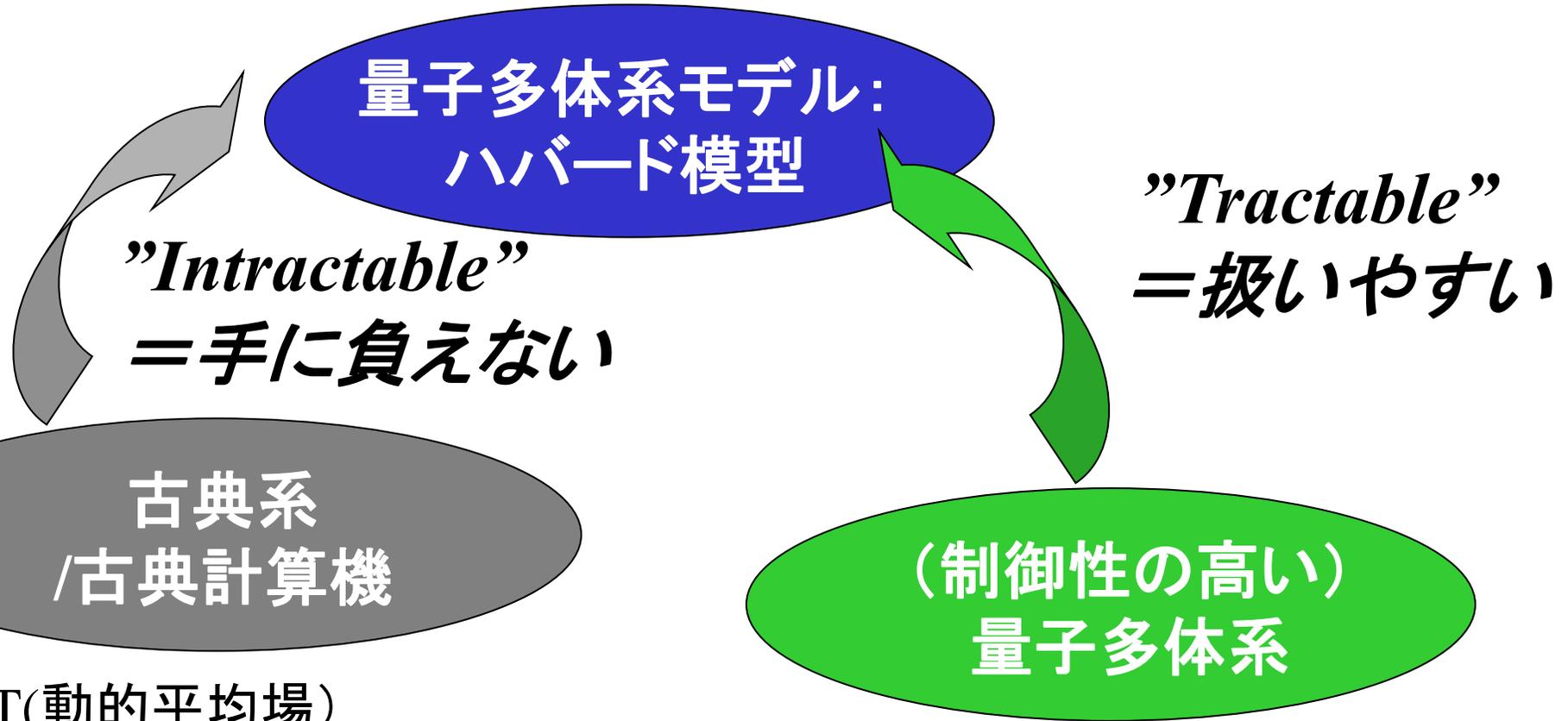
<http://ijinwarosu.seesaa.net/article/169371287.html>

The answer is certainly, NO!

量子多体系を、(量子コンピューターではない)古典計算機で、(効率的に)シミュレートすることはできない

例： 40個のスピン1/2の系： $2^{40}=10^{12}$

ハバード模型の 光格子量子シミュレーション



DMFT(動的平均場)

Gutzwiller

QMC(量子モンテカルロ)

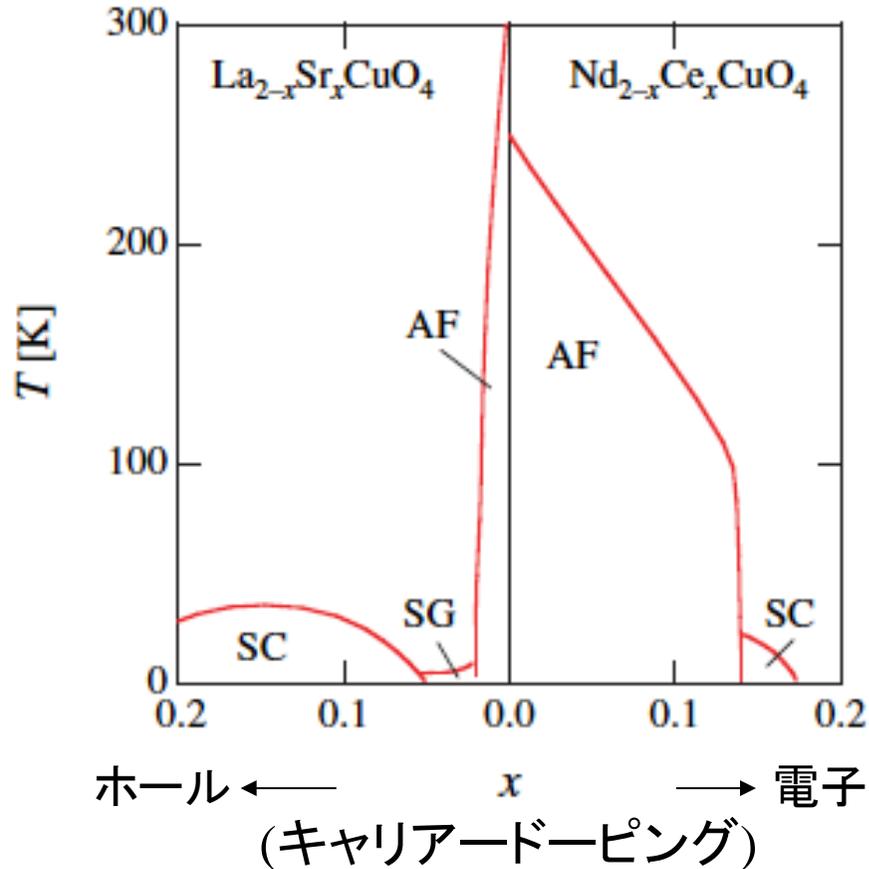
DMRG(密度行列繰り込み群)

Exact Diagonalization(厳密対角化)

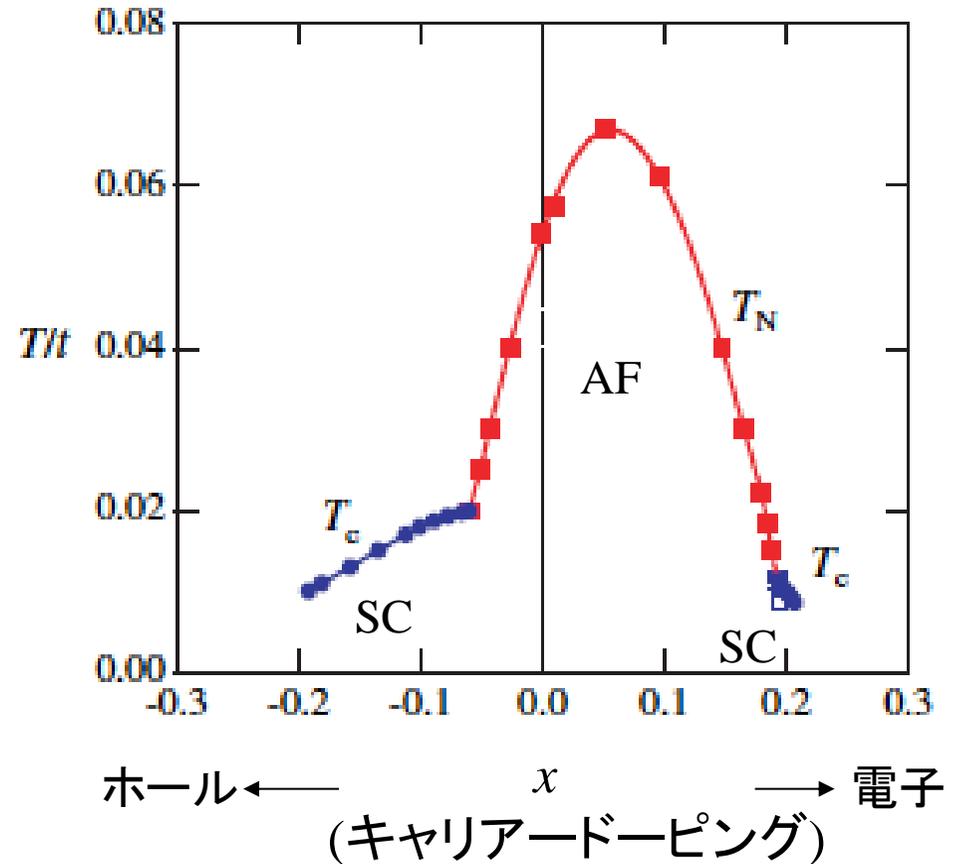
“光格子中の冷却原子”

一つのゴール： 高温超伝導(銅酸化物)の量子シミュレーション

固体実験



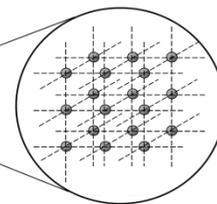
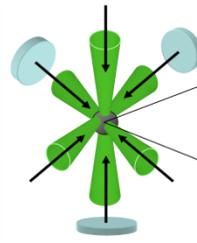
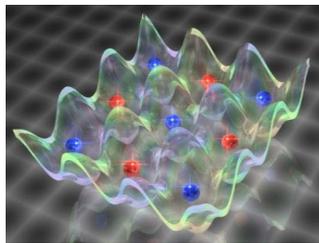
数値計算



[in T. Moriya and K. Ueda, Rep. Prog.Phys.66(2003)1299]

冷却原子量子シミュレーターの特徴

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



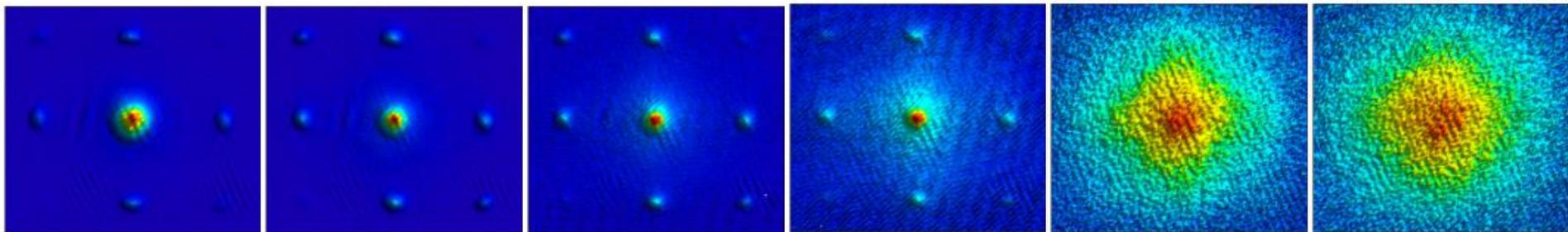
$$V = V_o \sin^2(kx)$$

1) 大規模量子多体系: 典型的原子数 $\sim 10^5$ 個以上

2) 不純物・格子欠陥無

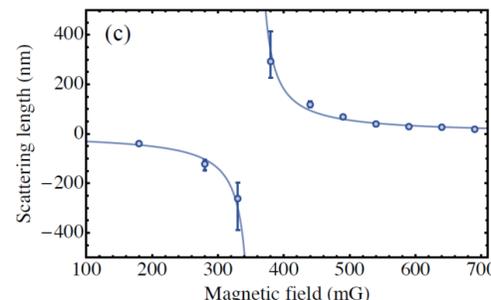
3) 高い制御性:

UとJの比を光格子レーザーの強度を変えることで高精度に**実時間**制御可能



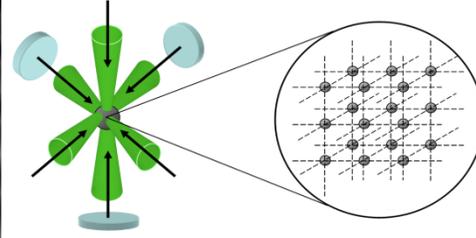
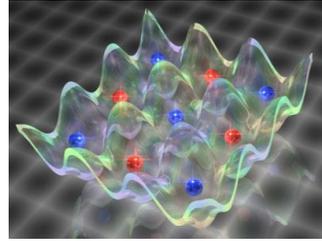
(超流動-モット絶縁体転移の原子波干渉による観測)

Uをフェッシュバツハ共鳴を用いて任意の大きさに制御可能
長距離双極子・双極子相互作用の導入も可能



冷却原子量子シミュレーターの特徴

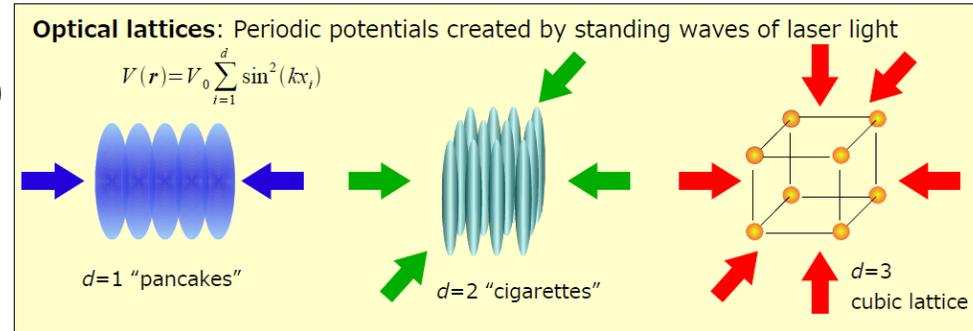
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



$$V = V_0 \sin^2(kx)$$

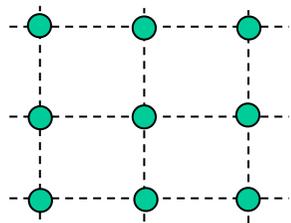
4) 多様性:

量子統計 (ボース・フェルミ・混合系)
次元性 (0次元、1次元、2次元)

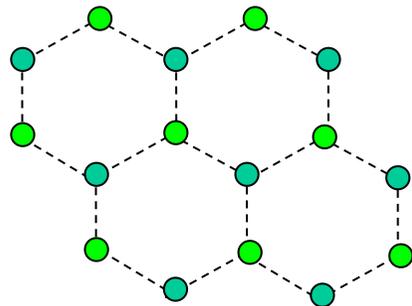


立方格子・非標準格子 (三角、カゴメ、ハニカム、リーブ)
バンド構造 (ディラックコーン、平坦バンド)

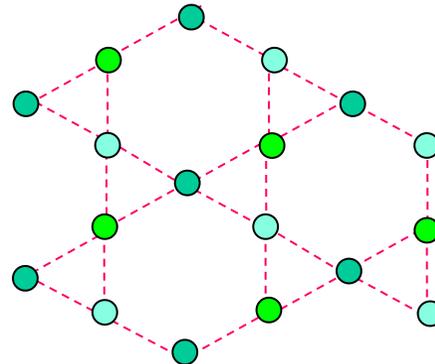
Cubic(Square)



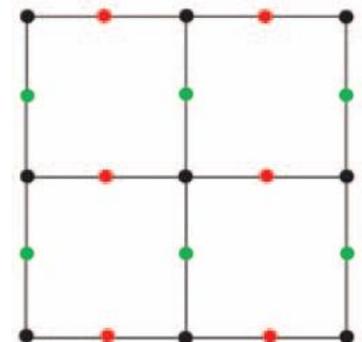
Honeycomb
(hexagonal)



Kagome

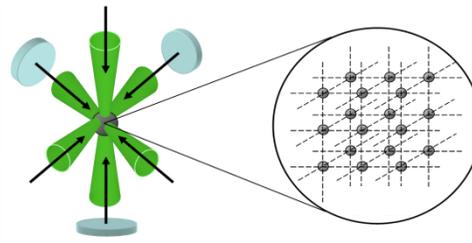
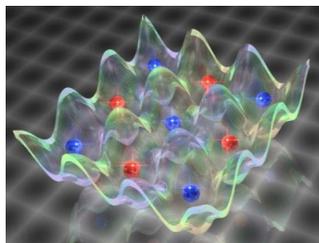


Lieb



冷却原子量子シミュレーターの特徴

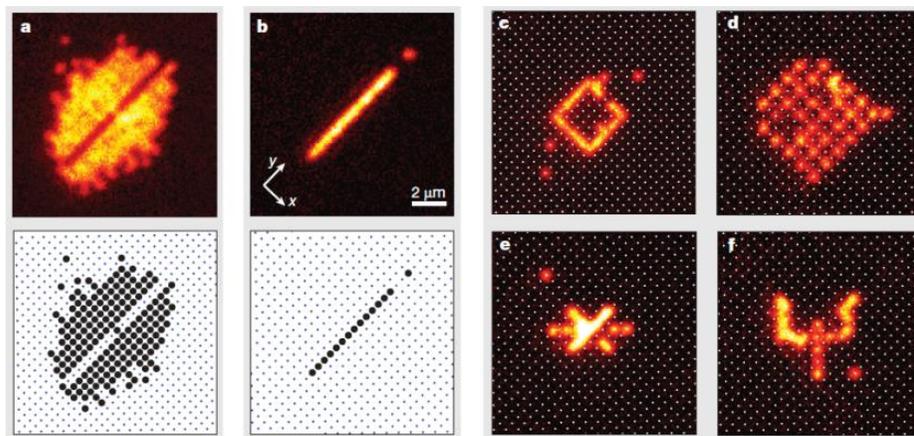
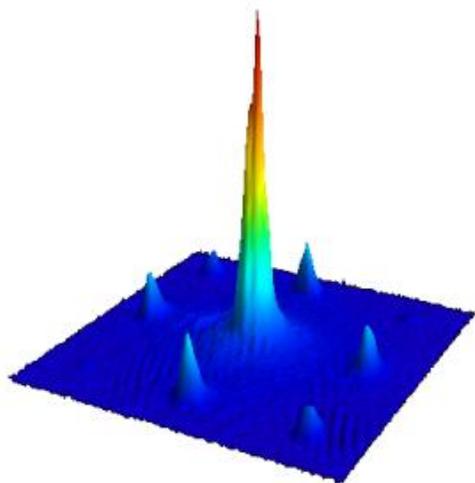
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



$$V = V_o \sin^2(kx)$$

5)優れた観測法

運動量測定 (ToF法)、単一サイト観測・制御 (量子気体顕微鏡)



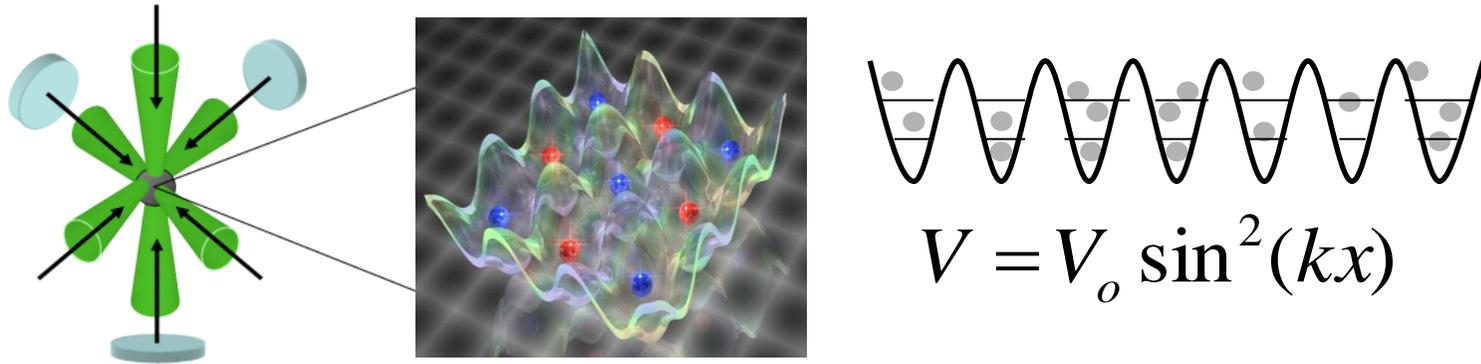
: アニメーション

量子多体系の非平衡実時間ダイナミクスの
量子シミュレーションに極めて有効

量子光学研究室の研究構想の概略

実験系:

光格子に導入した冷却イットテルビウム(Yb)原子



対象とする量子凝縮系の基本モデル:

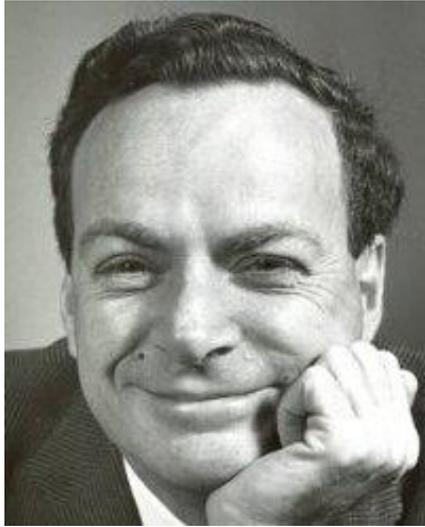
「ハバード模型」 「横磁場イジング模型」
「ハイゼンベルク模型」



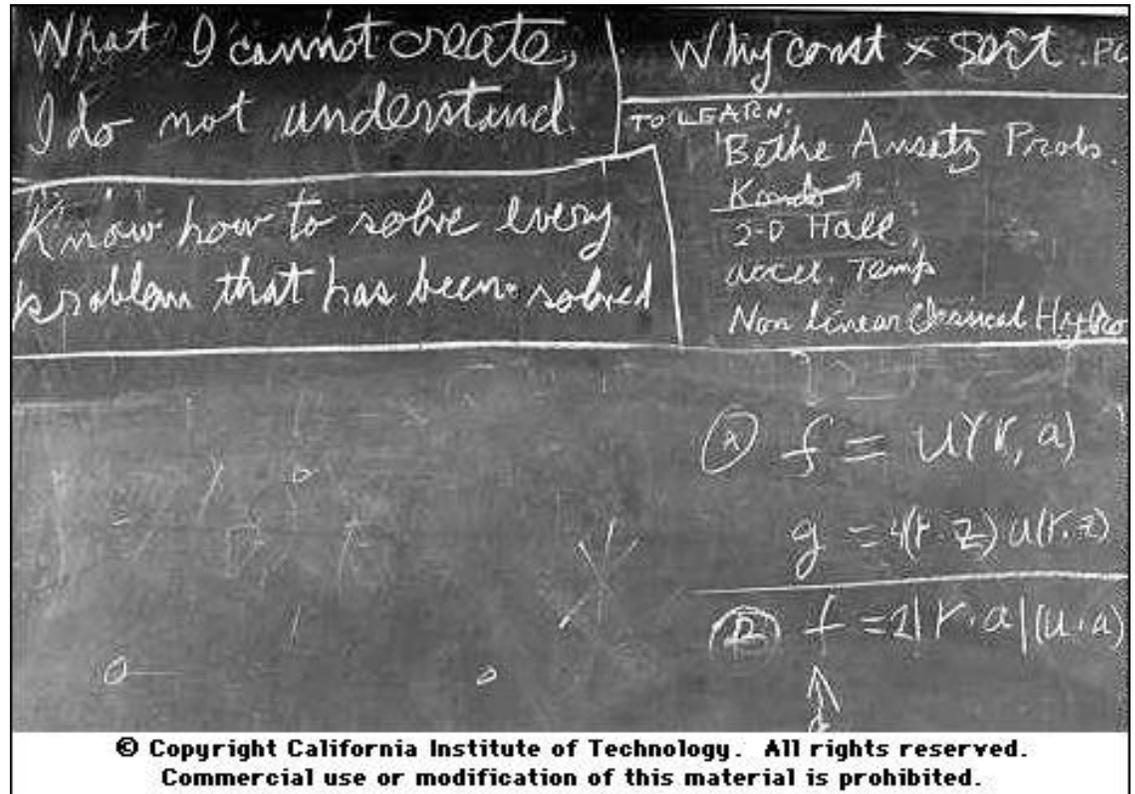
「問題」を理解し、「模型」を設計して、「実験」で確かめる

— “What I cannot create, I do not understand” —

R. Feynman

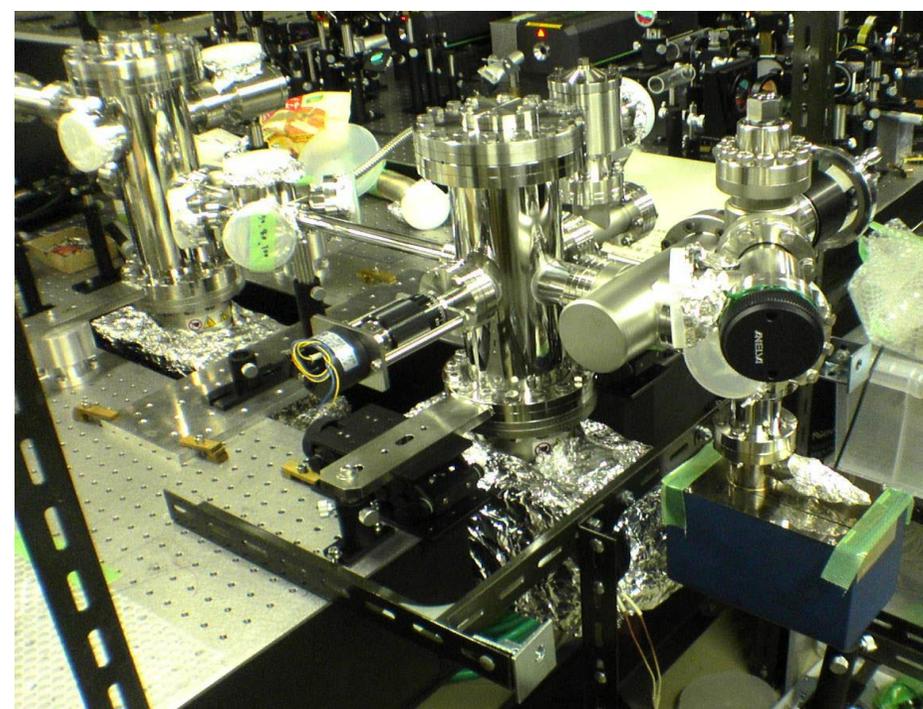
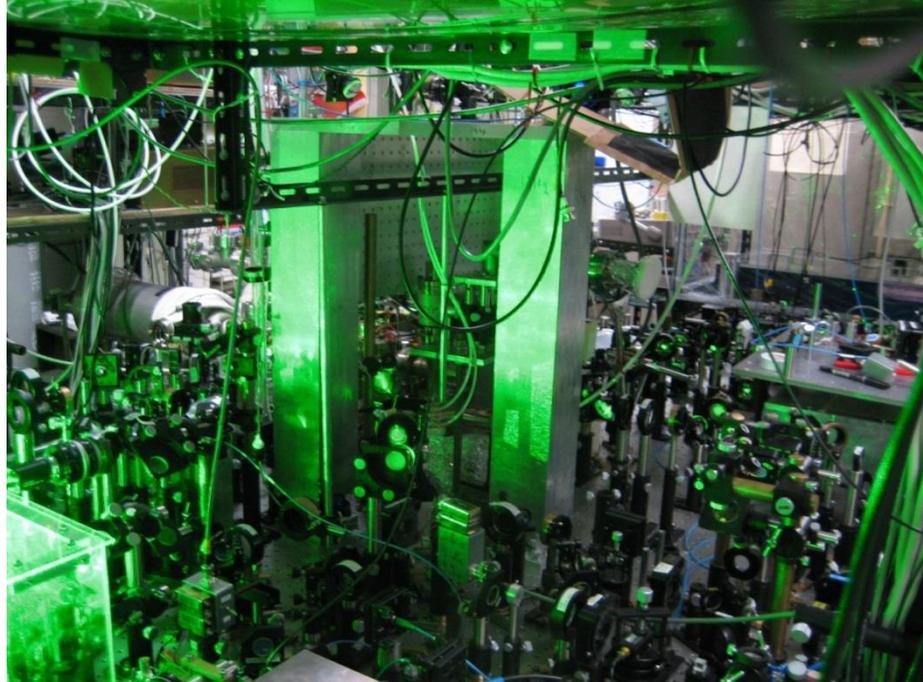


<http://ijinwarosu.seesaa.net/article/169371287.html>



“光格子中の冷却原子を使って量子シミュレーション
できなければ、凝縮系の物理を理解したと言えない”

光格子量子シミュレータ (または実験装置)



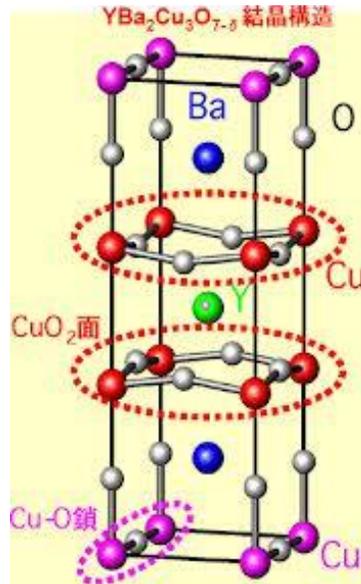
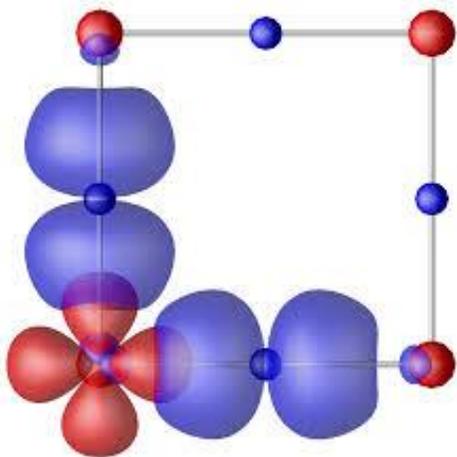
「ハバードモデル」

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} c_i^+ c_j + U \sum_i n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow}$$

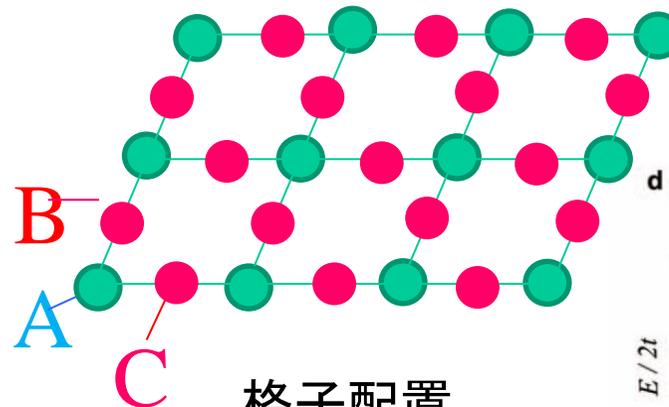
高温超伝導体を代表とする強相関電子系の基本模型:

銅酸化物の高温超伝導物質をより忠実に再現した
d-p模型(=Lieb格子) を実装する

“CuO₂ 2次元面 (d-p模型)”

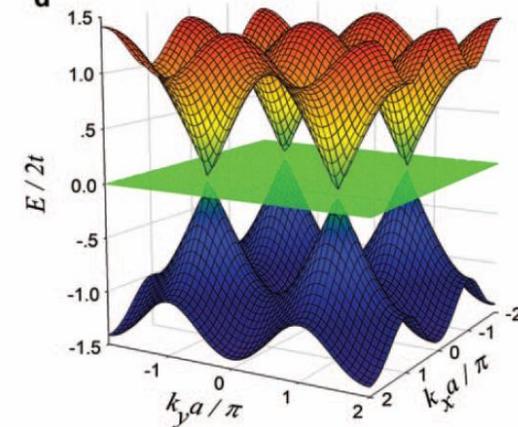


“リーブ格子”



格子配置
(実空間)

バンド構造
(k-空間)



「ハバード模型」

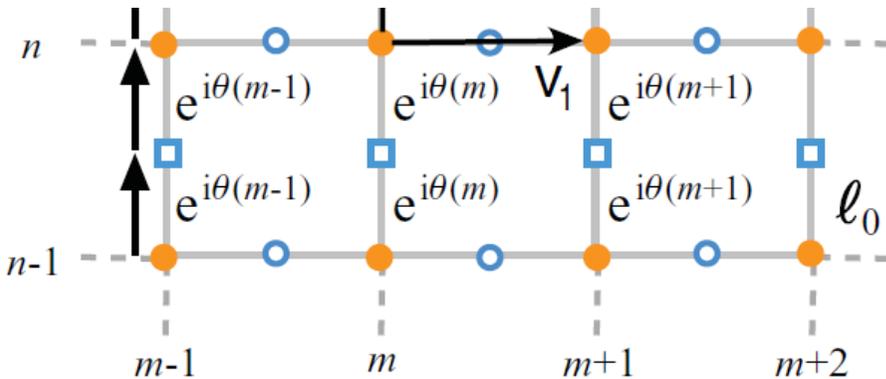
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} c_i^+ c_j + U \sum_i n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow}$$

“リープ光格子中で人工的に磁場を導入“

ラマンレーザー光によるホッピング

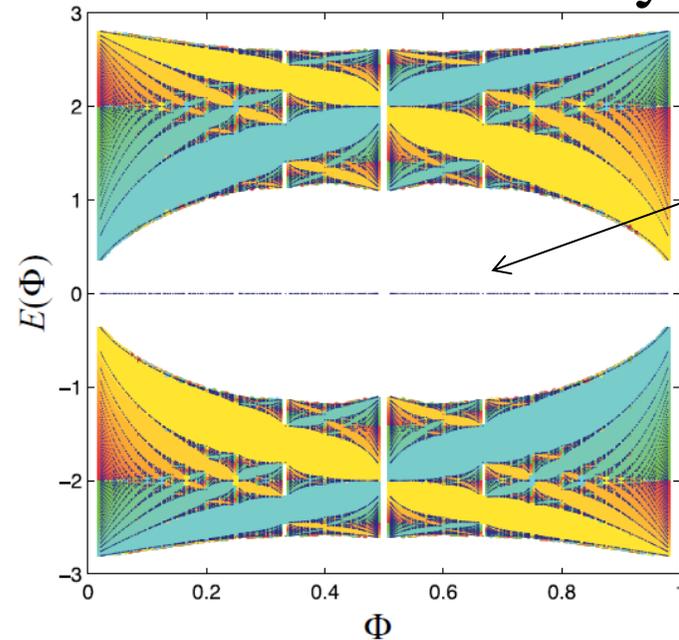
: 位相を印加することが可能

↔ パイエルス位相: $t \rightarrow te^{i\theta m}$



[N. Goldman et al,]

Hofstadter Butterfly



平坦
バンド

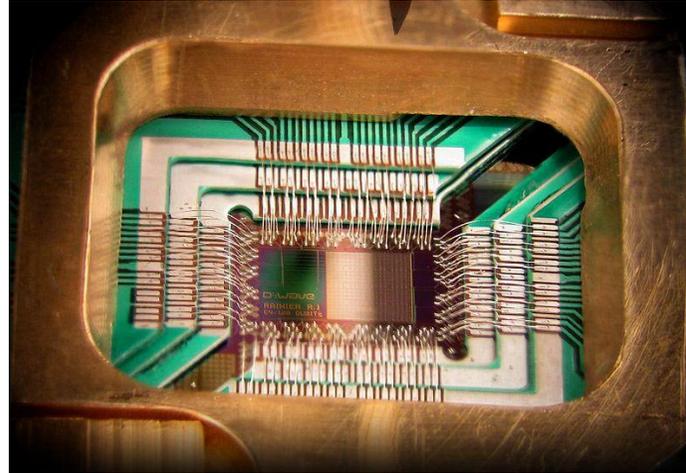
フラクタル的なバンド構造

→ ラフリン状態 (分数量子ホール効果), etc

「横磁場イジング模型」

$$H = - \sum_{\langle i, j \rangle} J_{i, j} S_z^i S_z^j - g \sum_i S_x^i$$

カナダ: D-Wave社: 超伝導素子を用いて横磁場イジング模型を実装:
量子アニーリング (パラメーター $g \gg 1$ を $g=0$ にゆっくりと変化)
の実演により、「量子コンピューター」を作った、と主張

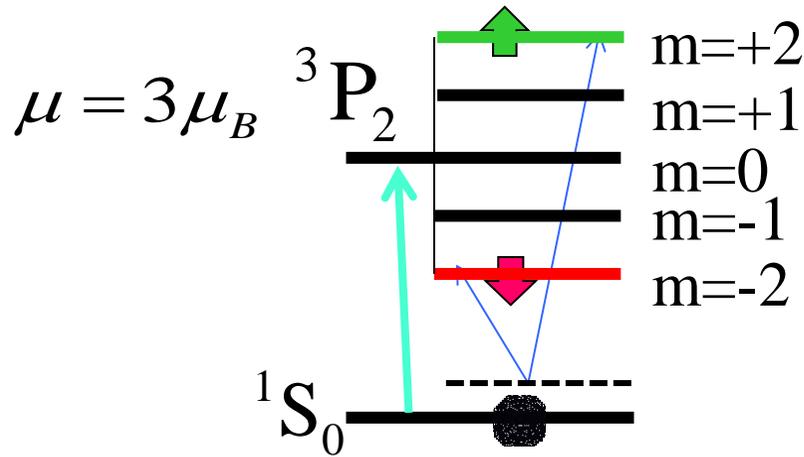


http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/17/DWave_128chip.jpg/800px-DWave_128chip.jpg

固体なので、緩和(デコヒーレンス)が速い!
量子ビットの数が少ない!(512個)

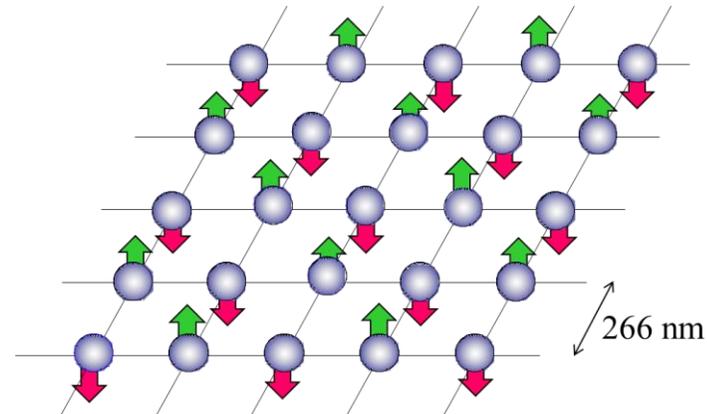
「横磁場イジング模型」

$$H = - \sum_{\langle i, j \rangle} J_{i, j} S_z^i S_z^j - g \sum_i S_x^i$$



“Yb原子間の磁気双極子相互作用”

緩和(デコヒーレンス)が遅い! (~1s)
量子ビットの数が多い! (10^5 個)



量子情報 \Leftrightarrow 統計力学

大規模状態生成: 反強磁性相, 強磁性相, スピン猫状態
量子アニーリング過程の理解・理論の発展に寄与

その他の研究:

量子磁性 (SU(6)、平坦バンド強磁性)

不純物問題 (アンダーソン局在)

人工ゲージ場 (スピン軌道相互作用)

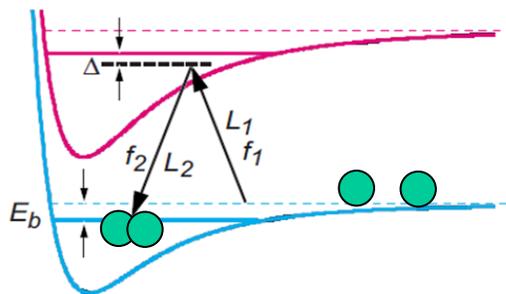
新奇BCS状態

格子ゲージ理論のシミュレーター

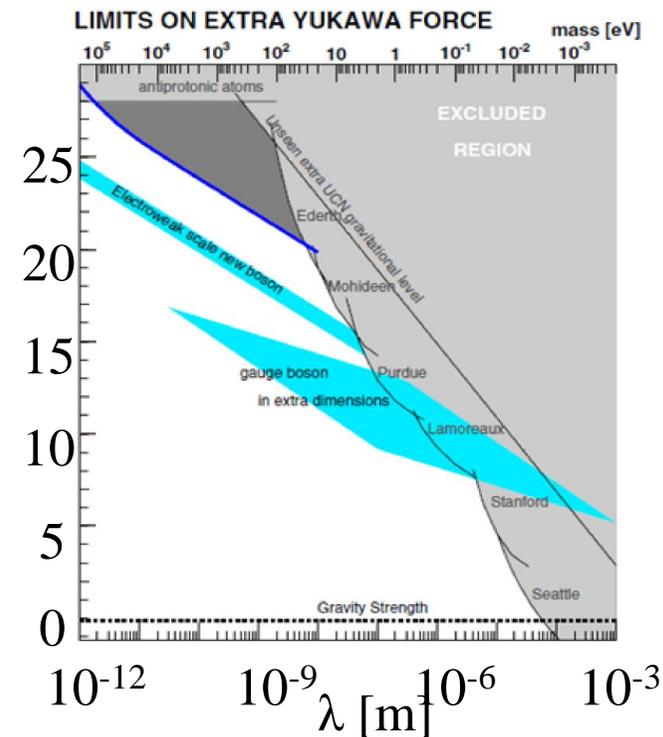
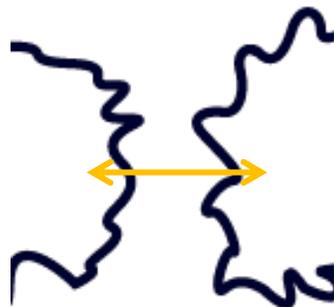
近距離重力補正項の検証

...

$$V(r) = -\frac{GM_1M_2}{r} \left(1 + \alpha e^{-r/\lambda} \right)$$



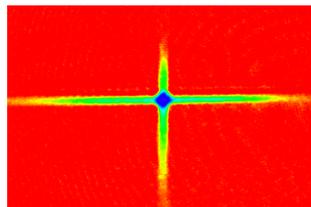
VS



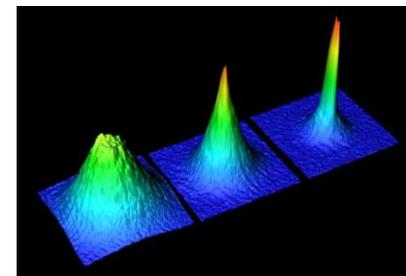
光周波数計測・標準

$$\delta f/f < 10^{-17}$$

重力シフト
物理定数の時間変化



レーザー冷却
< 1μK

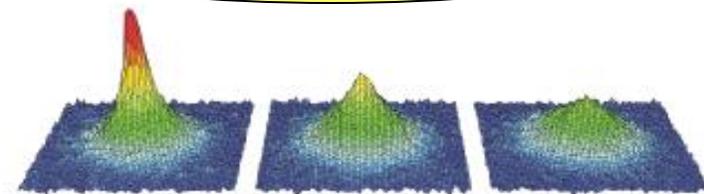


光の量子制御

原子

光

量子気体
BEC, Fermi縮退, BCS



量子光学

量子エンタングルメント
量子テレポーテーション

原子の量子制御

量子コンピューター

“原子・光の極限的量子制御”

