

仁科記念講演会

11/20 (2014)

冷却原子を用いた
量子シミュレーション

京都大学大学院理学研究科

高橋義朗

Outline

- はじめに: 原子物理学の発展
 - 「分光」から「制御」へ
- 凝縮系の量子シミュレーション
 - 光格子中の冷却原子
 - イッテルビウム原子を用いた研究

原子物理学の発展

「分光」の対象 : 原子の内部構造

量子力学の構築

精密測定:

永久電気双極子モーメント、パリティ非保存
原子時計、磁力計、...

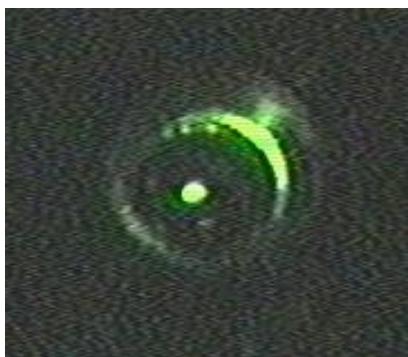
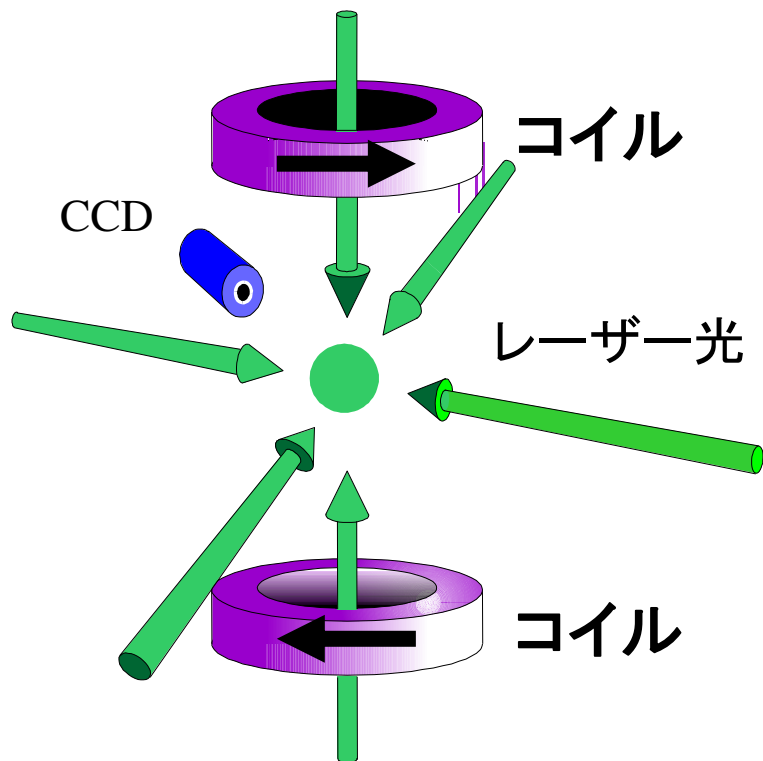


レーザー冷却・トラップ法の開発(1980年代)

「制御」の対象 : 原子の外部自由度

レーザー冷却・トラップ

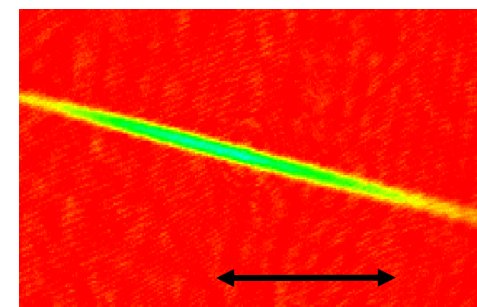
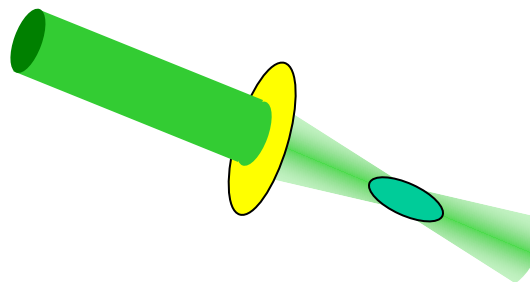
“磁気光学トラップ”



- 原子数: 10^7
- 密度: $10^{11}/\text{cm}^3$
- 温度: $10\mu\text{K}$

“光トラップ”

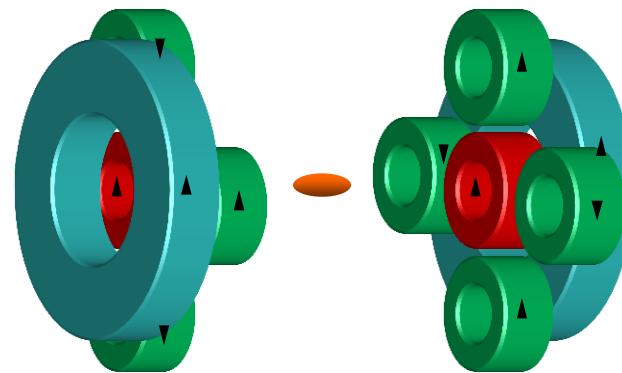
$$U_{pot}(r) = -\frac{\chi E(r)^2}{2}$$



500 μm

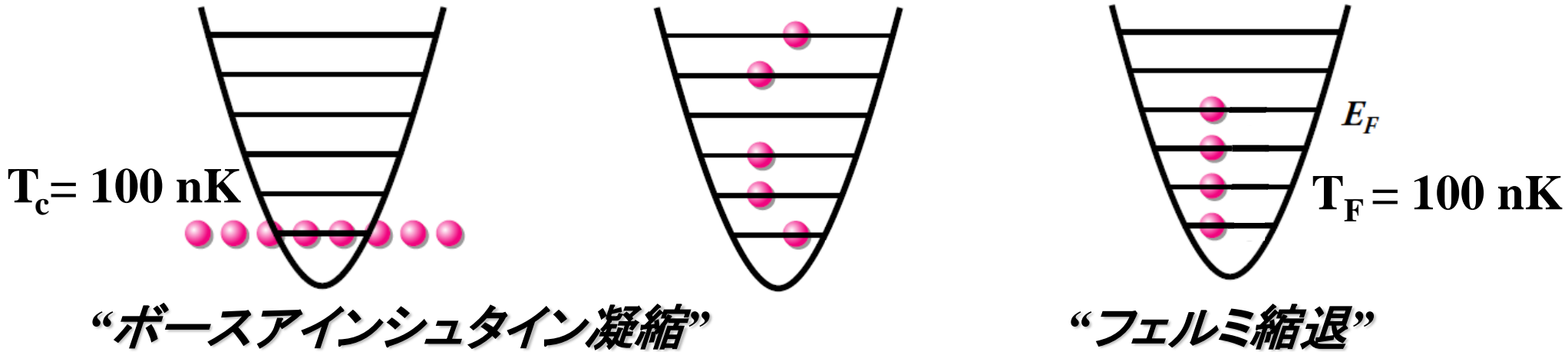
“磁気トラップ”

$$V_{int} = -\mu \cdot B$$

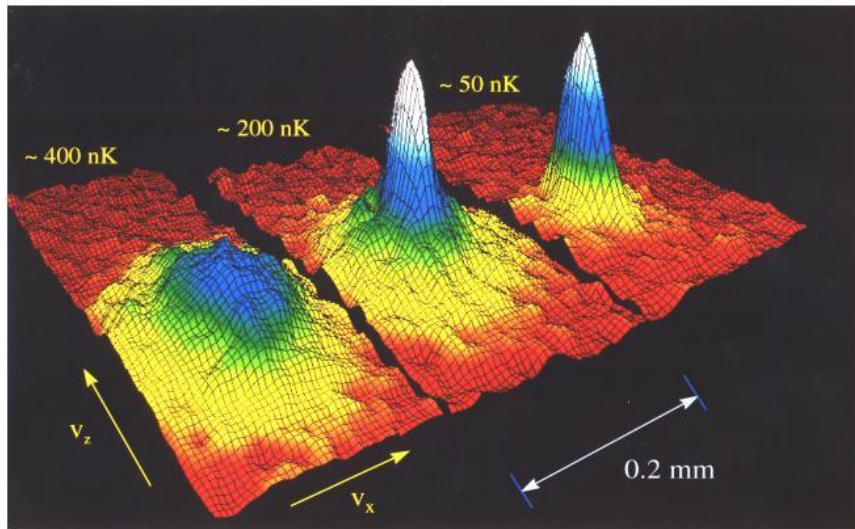


量子原子気体の実現

「古典系」から「量子多体系」

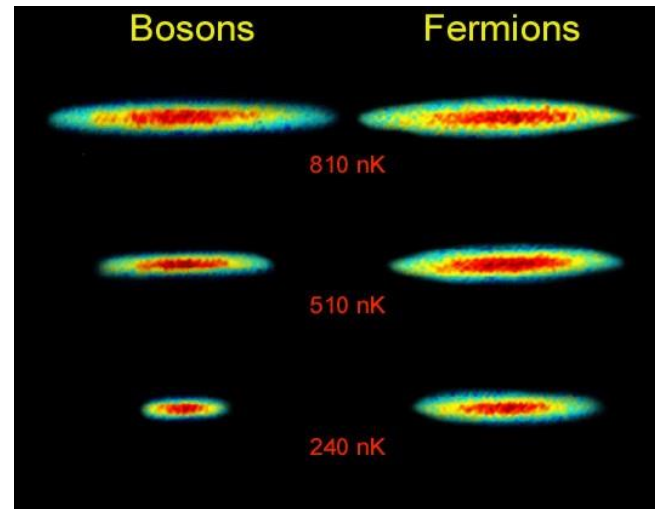


^{87}Rb



運動量分布

[E. Cornell et al, (1995)]



^6Li and ^7Li

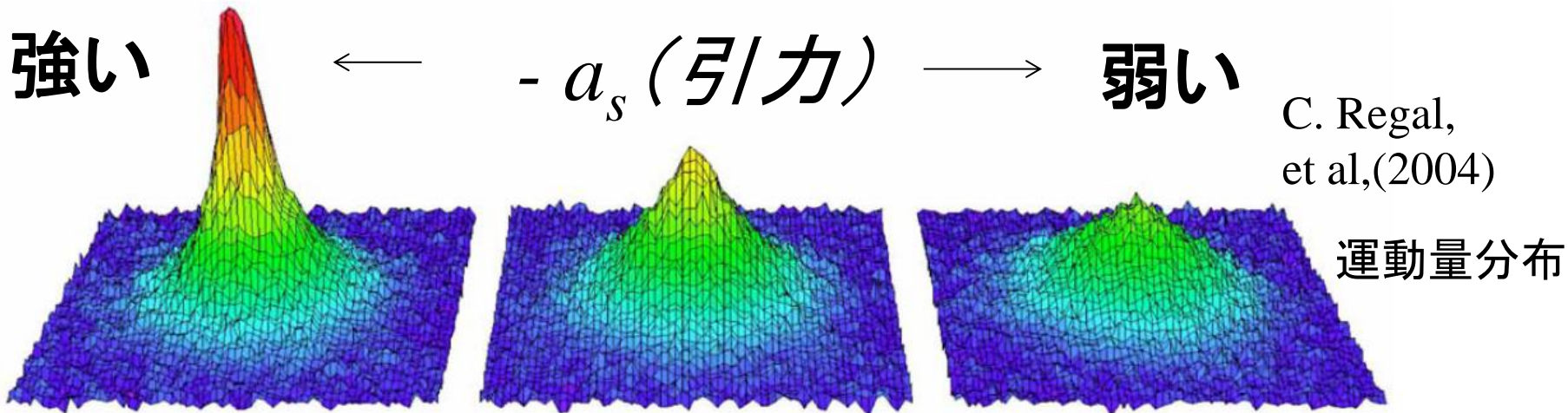
空間分布

[R. Hulet et al, (2000)]

— 中性フェルミ原子の対生成による超流動 —

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

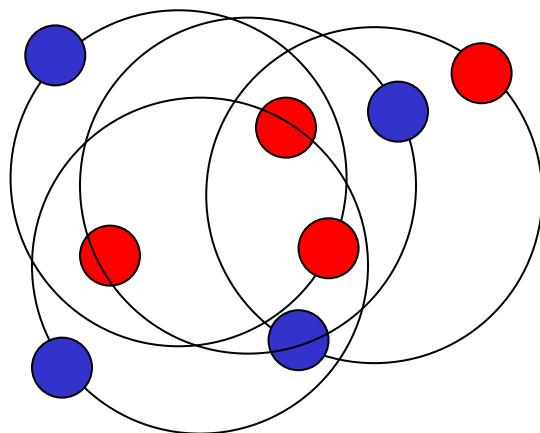
a_s : 散乱長



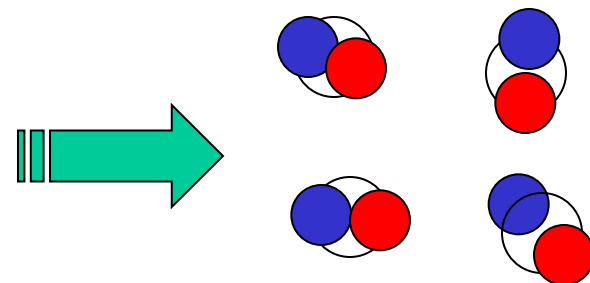
“フェツシュバツハ共鳴”

原子の2つの状態
(● ●)の相互作用
を磁場で制御

BCS

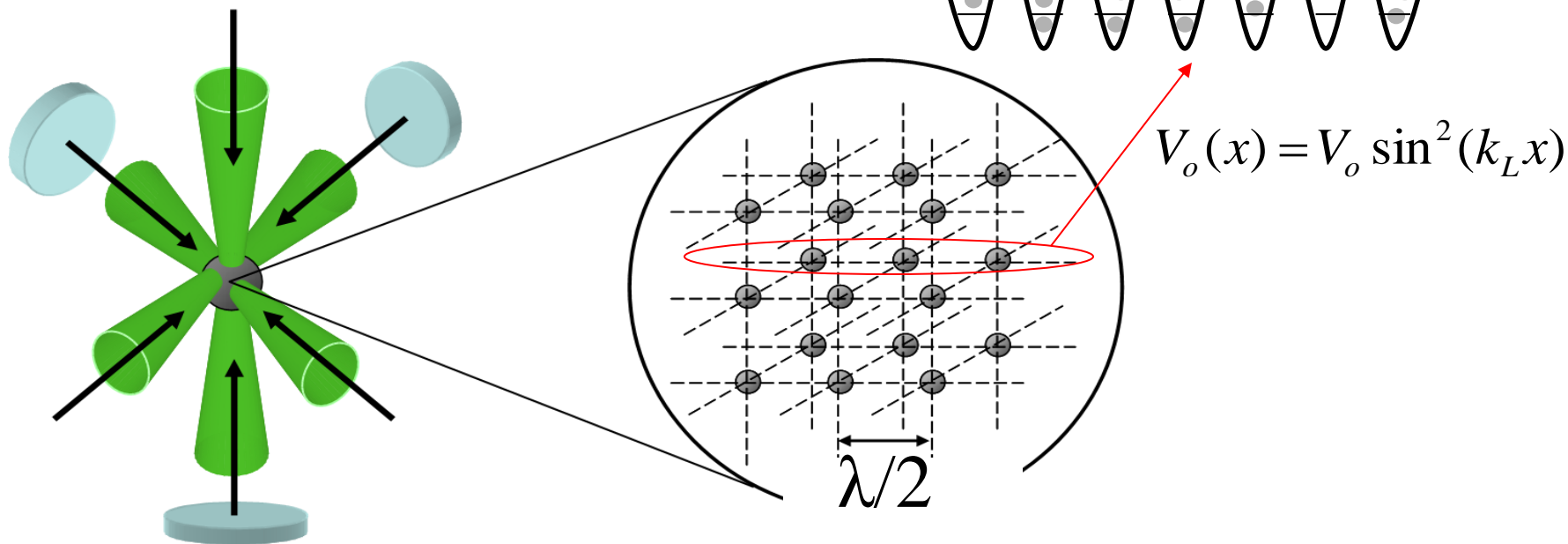


分子のBEC



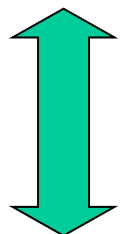
— 光格子量子シミュレーション —

“光格子” = 光で作られた原子に対する周期ポテンシャル



光格子の中を運動する原子

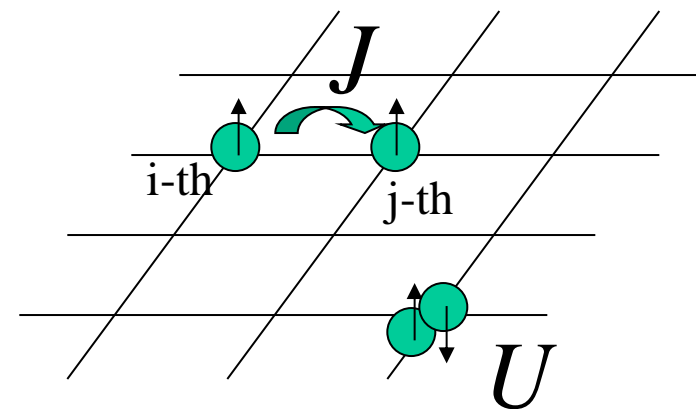
“ハバード模型”



固体：結晶格子の中を運動する電子

— ハバード模型 —

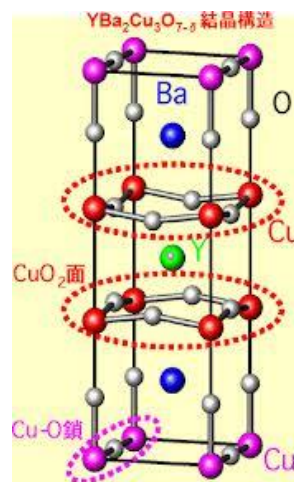
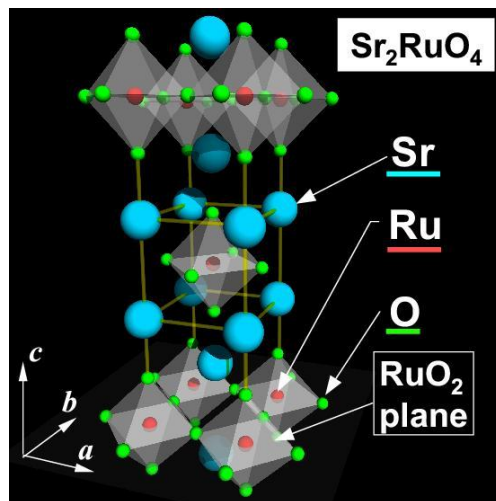
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} c_i^+ c_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



↑
ホッピング項

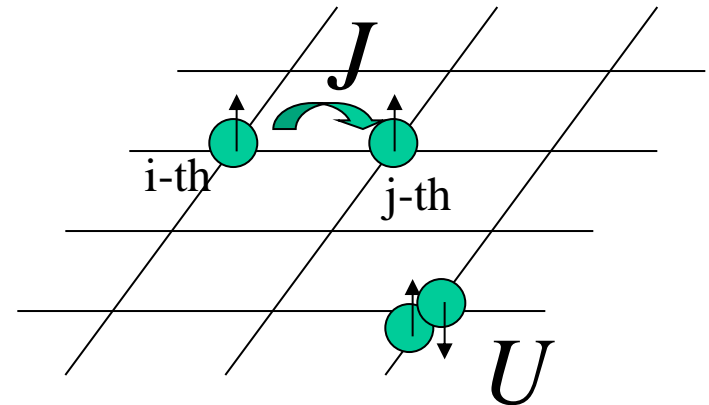
↑
(オンサイト)相互作用項

→ 磁性, 高温超伝導, ...



— ハバード模型 —

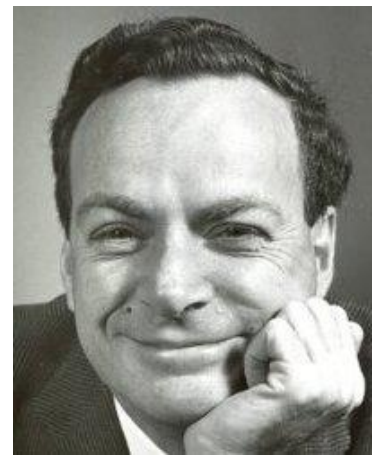
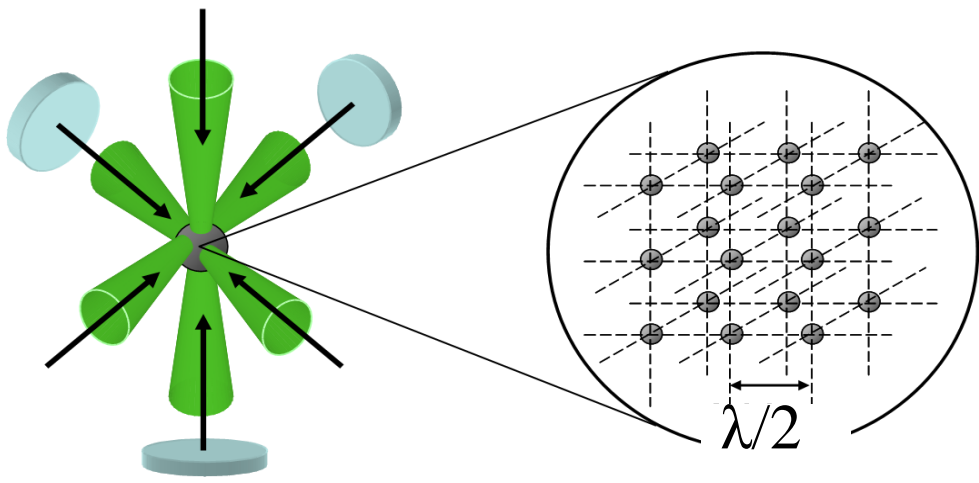
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} c_i^+ c_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



↑
ホッピング項

↑
(オンサイト)相互作用項

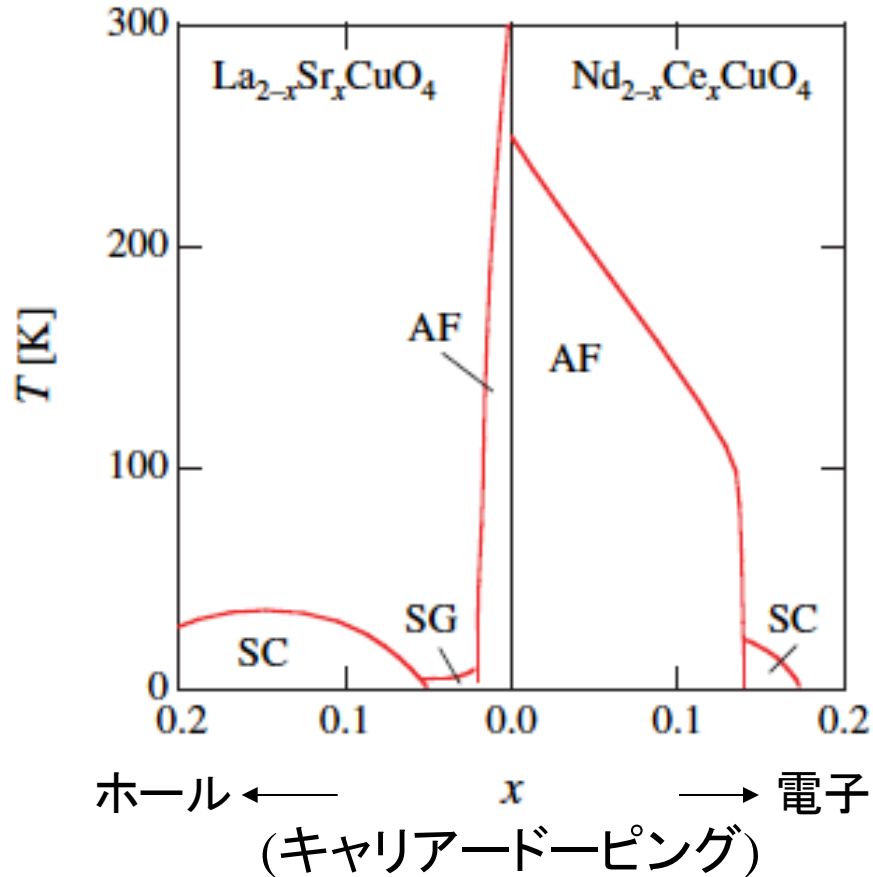
→ 光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション



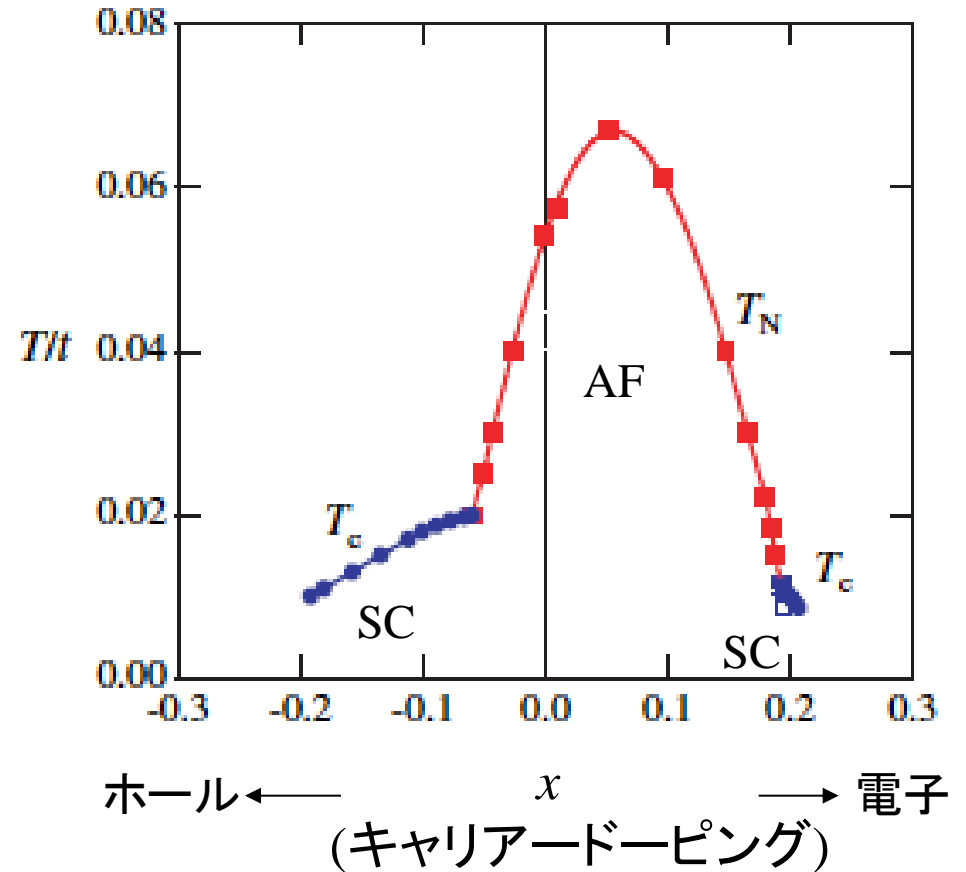
R. Feynman

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

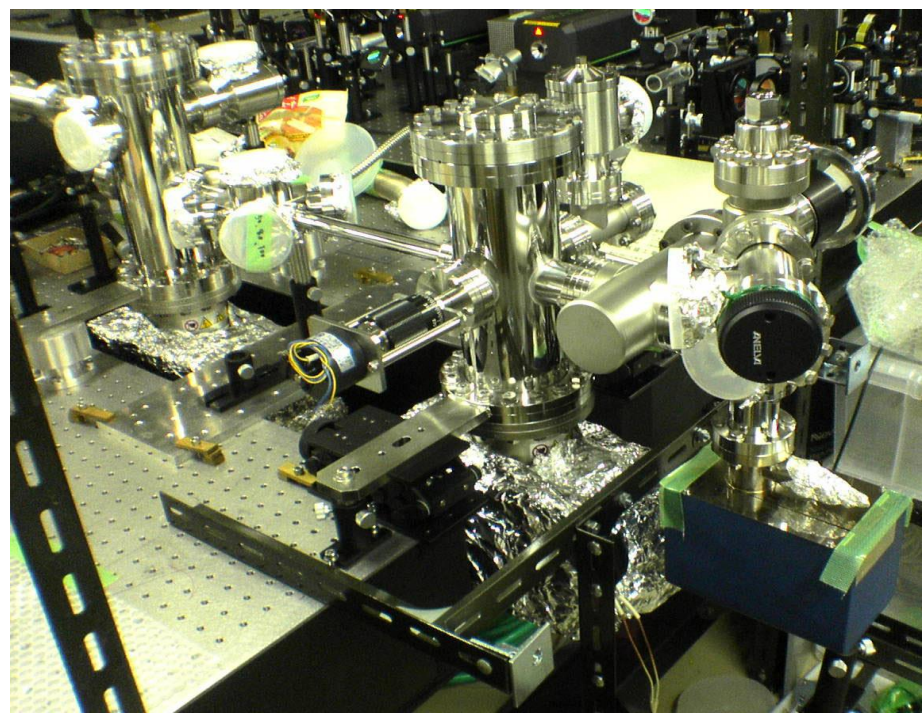
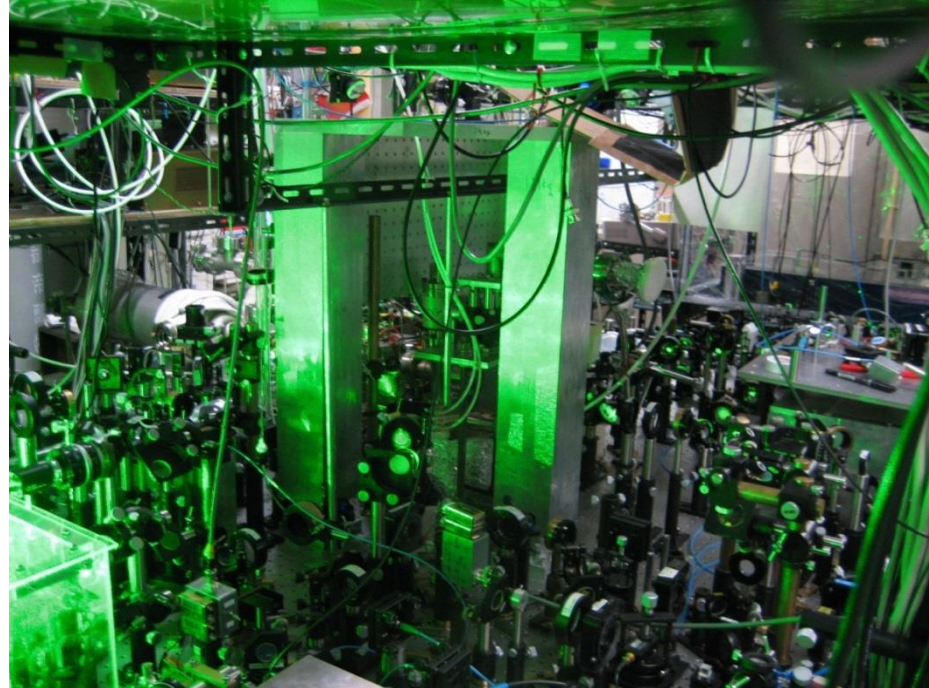


数値計算



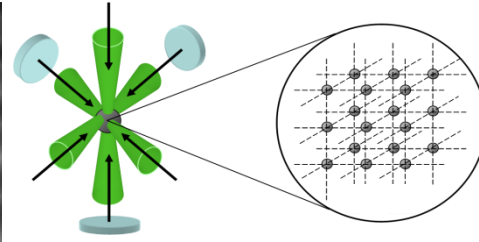
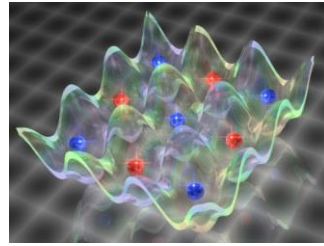
[in T. Moriya and K. Ueda, Rep. Prog.Phys.66(2003)1299]

光格子量子シミュレータ (実験装置)



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:

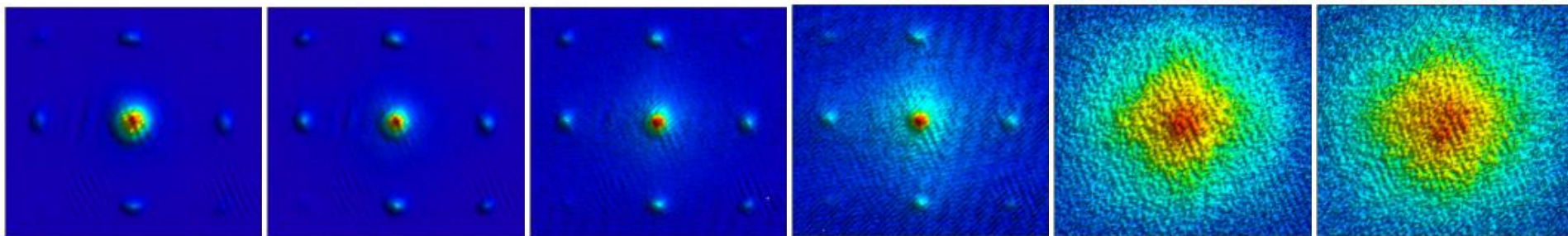
UとJの比: 光格子レーザーの強度を変えることで高精度に**実時間**制御可能

$$U / J = a_s k_L \sqrt{2} \exp(+2\sqrt{s})$$

$s \equiv V_o / E_R$, $E_R \equiv (\hbar k_L)^2 / 2m$: 反跳エネルギー, a_s : 散乱長

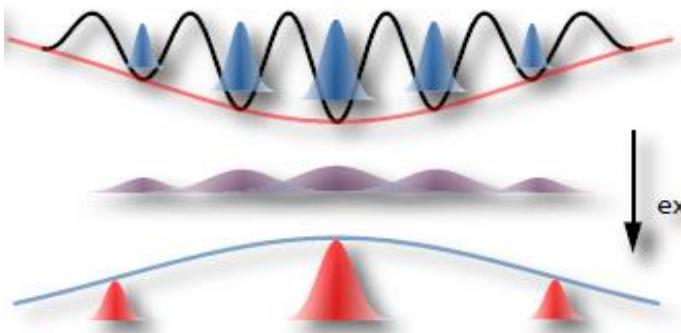
ボース・ハバードモデル: “超流動 – モット絶縁体 転移”

小 ← 光格子ポテンシャルの深さ: V_0 → 大
 U/J



“Time-Of-Flight 法による運動量分布の観測”

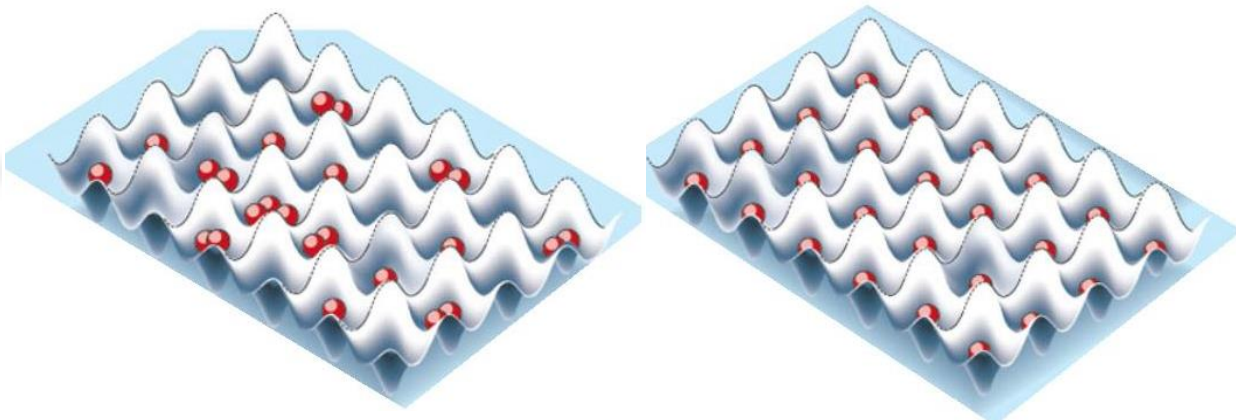
“干渉パターン:
位相コヒーレンスの証拠”



U/J :小
超流動状態

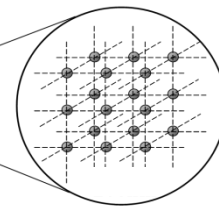
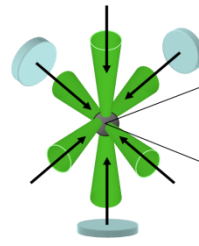
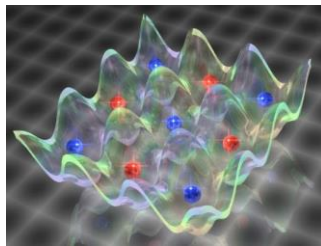
← →

U/J :大
モット絶縁体



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: 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

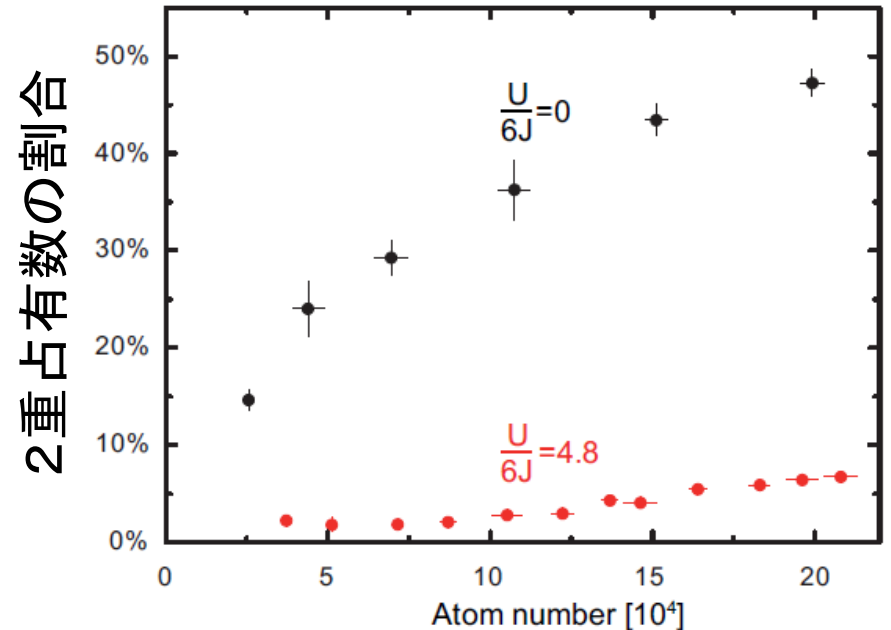
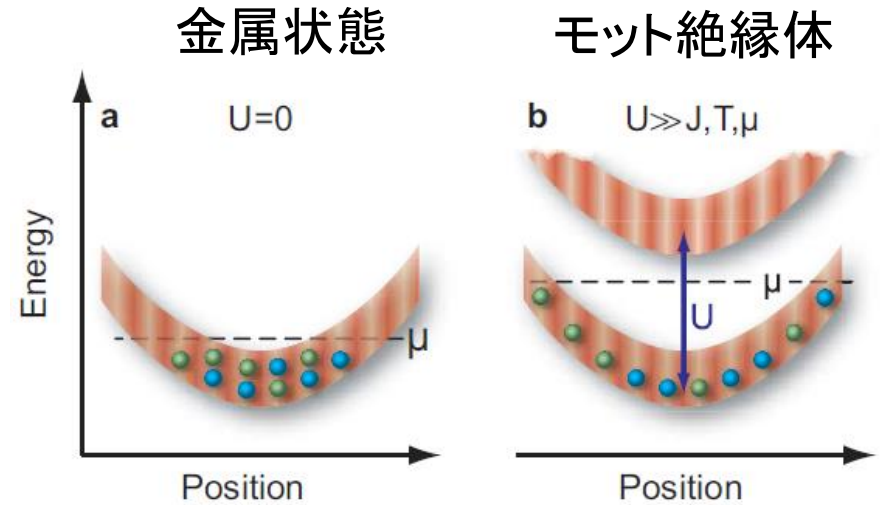
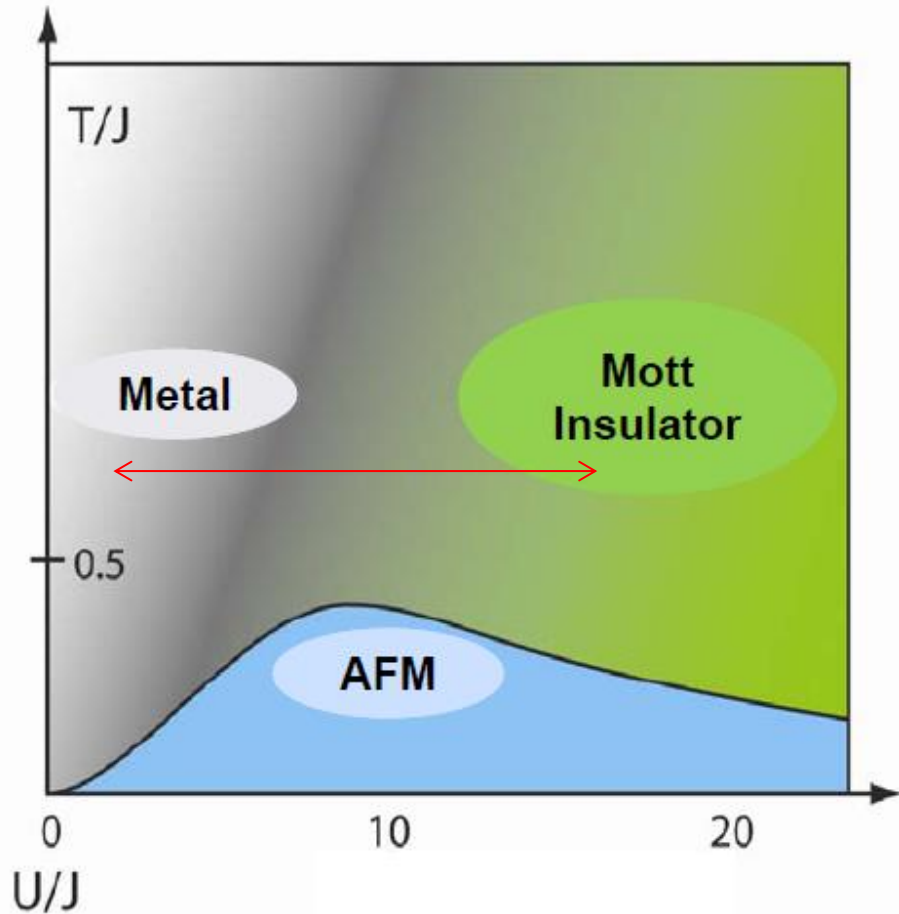
$$U / J = a_s k_L \sqrt{2} \exp(+2\sqrt{s})$$

$s \equiv V_o / E_R$, $E_R \equiv (\hbar k_L)^2 / 2m$: 反跳エネルギー, a_s : 散乱長

U: **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

フェルミ・ハバードモデル：“金属-モット絶縁体 転移”

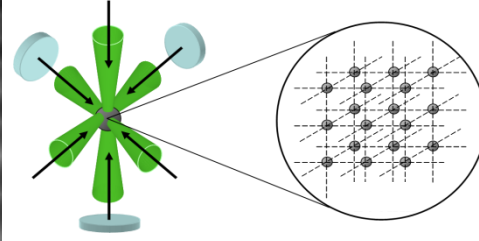
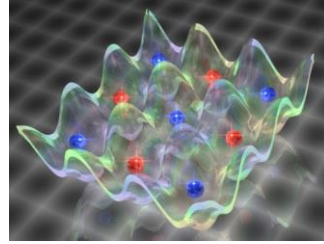
“フェルミハバードモデルの相図”



[R. Jördens *et al.*, Nature **455**, 204 (2008)]

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: 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

$$U / J = a_s k_L \sqrt{2} \exp(+2\sqrt{s})$$

$s \equiv V_o / E_R$, $E_R \equiv (\hbar k_L)^2 / 2m$: 反跳エネルギー, a_s : 散乱長

U: 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

J: 光格子の位相変調などにより任意の大きさ・位相に制御可能

三角格子のフラストレート磁性の量子シミュレーション

[Sengstockら]

光格子ポテンシャルの位相変調:

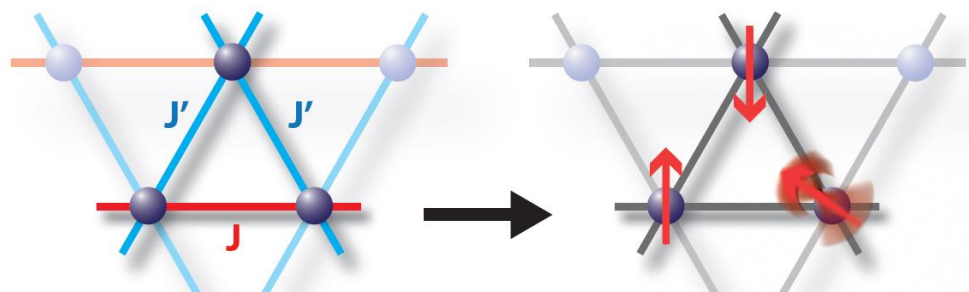


$$K \cos(\omega t)$$

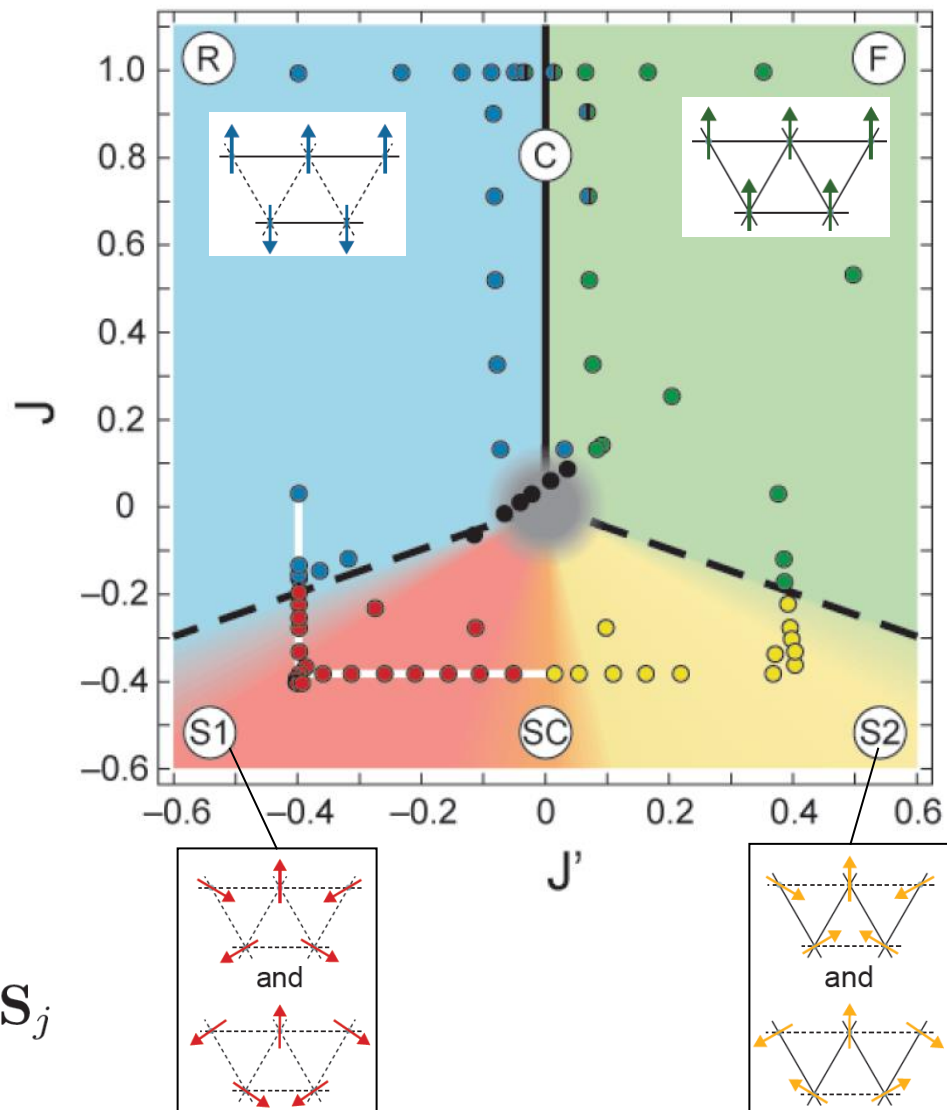


$J \rightarrow J \times J_0(\beta)$: ゼロ次のベッセル関数

$$\beta = K/\omega$$



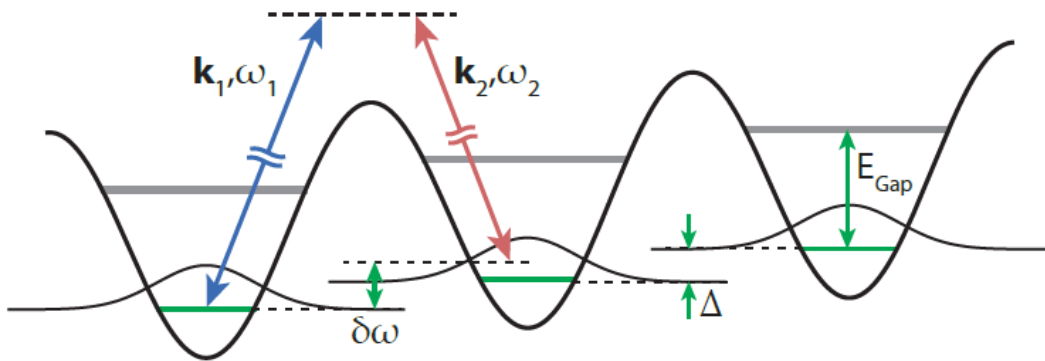
$$E(\theta_i) = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$



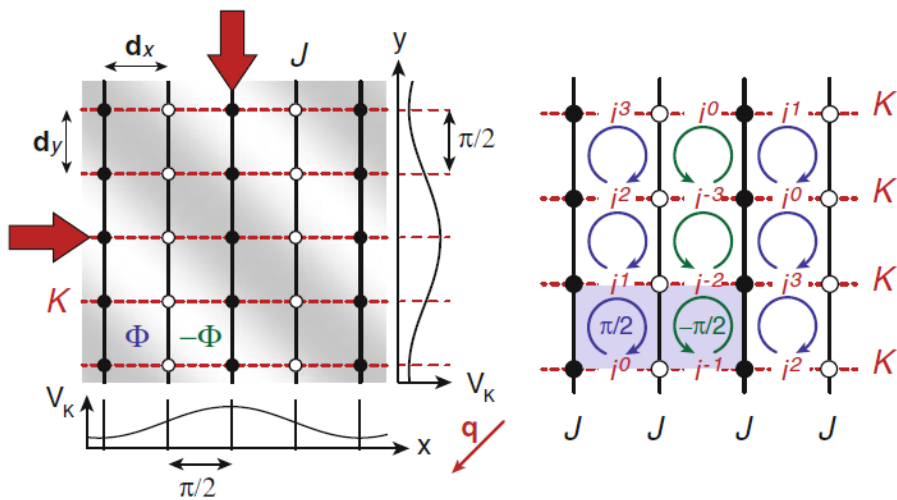
人工“強磁場”の生成

[Ketterle, Blochら]

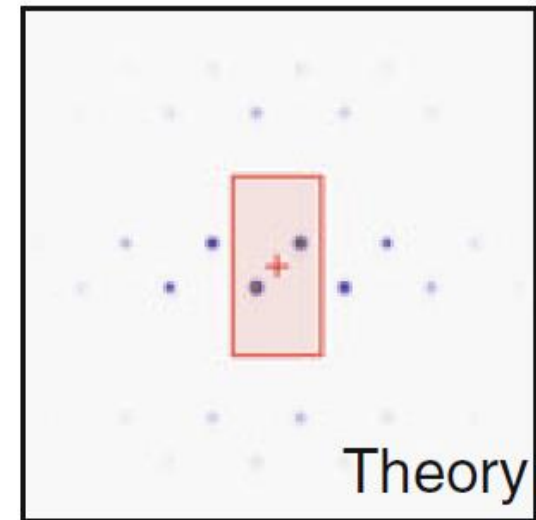
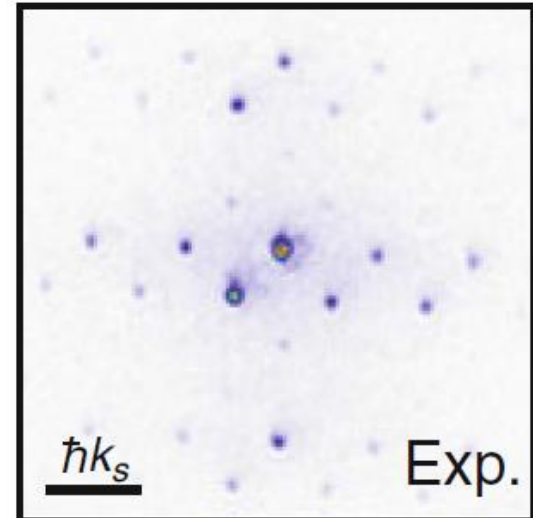
ラマンレーザー光によるホッピング:



パイエルス位相の導入: $J \rightarrow J' e^{i\theta m}$

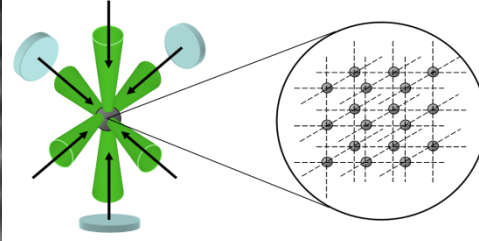
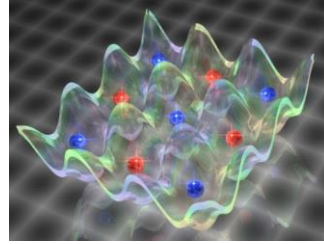


特徴的な干渉パターンの観測



冷却原子量子シミュレーターの特徴

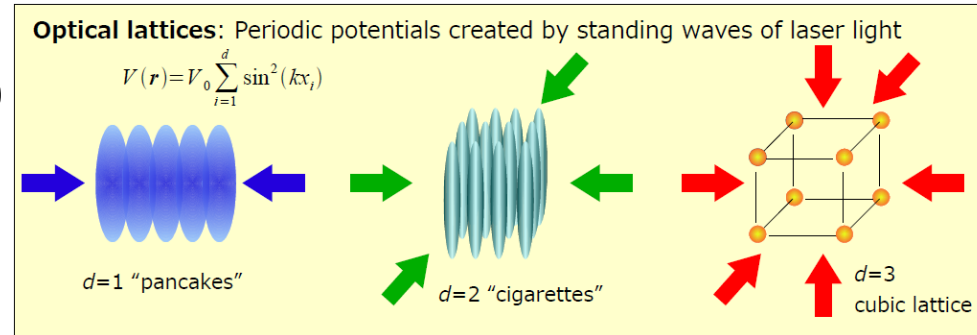
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



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

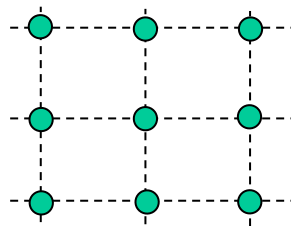
4) 多様性:

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)

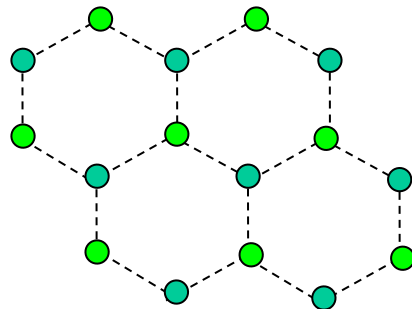


立方格子・非標準型格子 (三角、カゴメ、ハニカム、リーブ)
バンド構造 (ディラックコーン、平坦バンド)

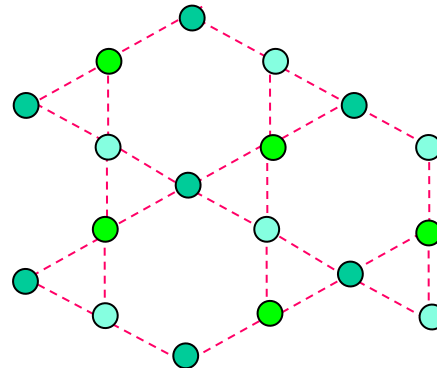
Cubic(Square)



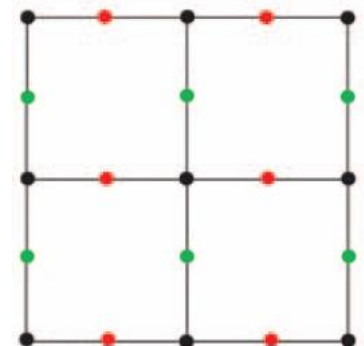
Honeycomb
(hexagonal)



Kagome



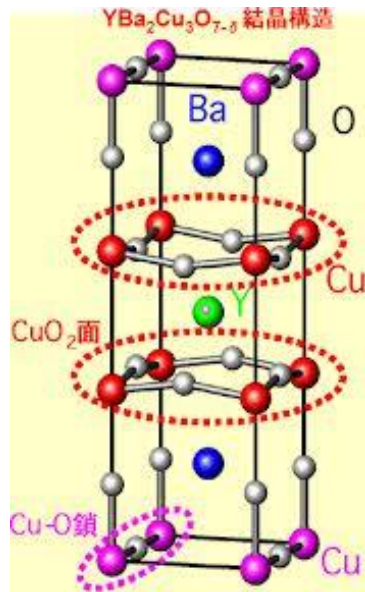
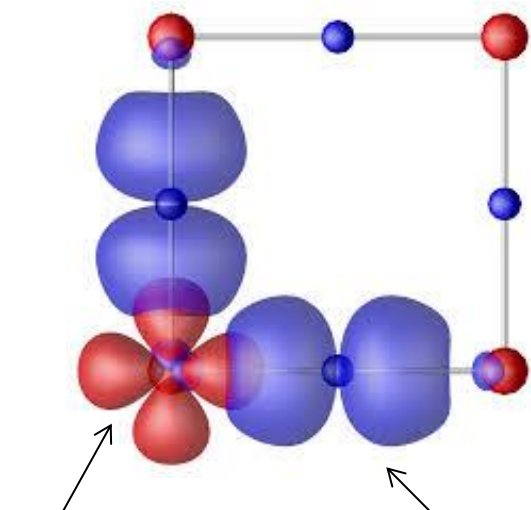
Lieb



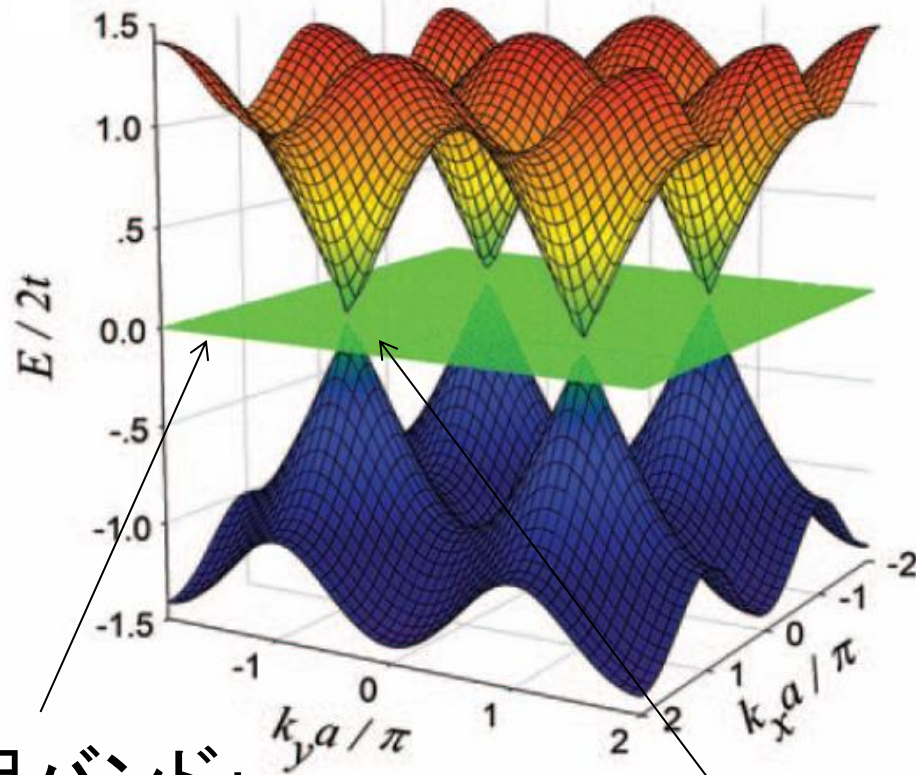
Lieb格子(=d-p模型)

銅酸化物の高温超伝導物質をより忠実に再現した格子モデル

“CuO₂ 2次元面”



バンド構造(k-空間)

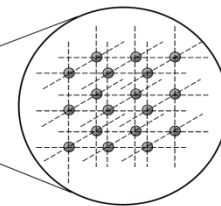
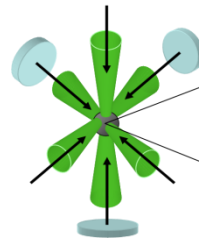
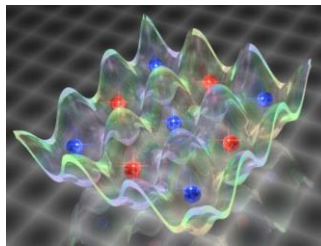


平坦バンド:
遍歴強磁性
超固体

ディラックコーン:
線形分散

冷却原子量子シミュレーターの特徴

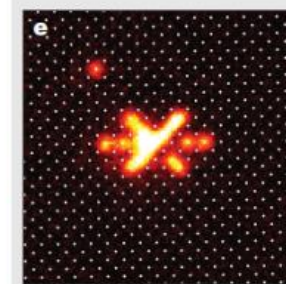
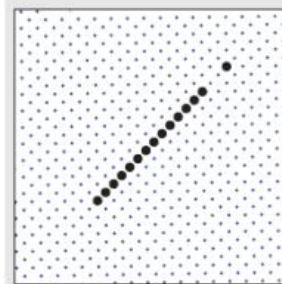
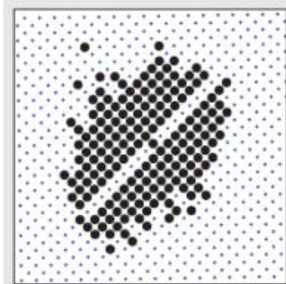
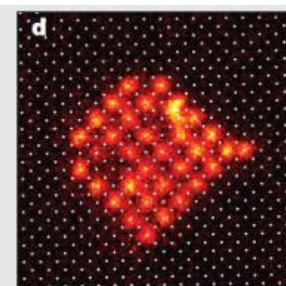
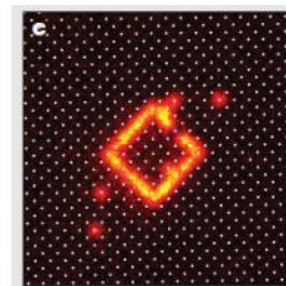
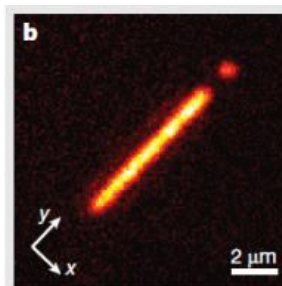
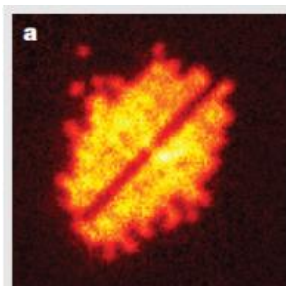
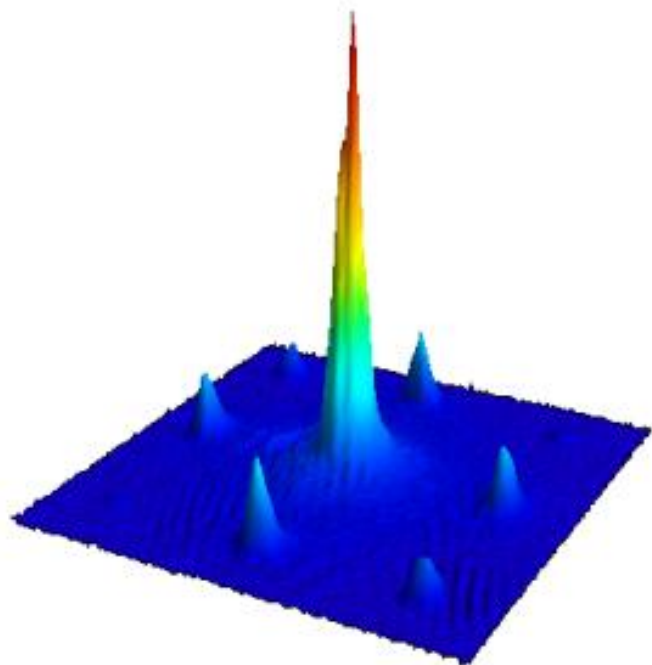
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



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

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)



[I. Blochら]

格子ゲージ-ヒッグスモデルの量子シミュレーション

Kasamatsu *et al*, PRL 111, 115303(2013)

用いる原子系: ボース・ハバードモデル:

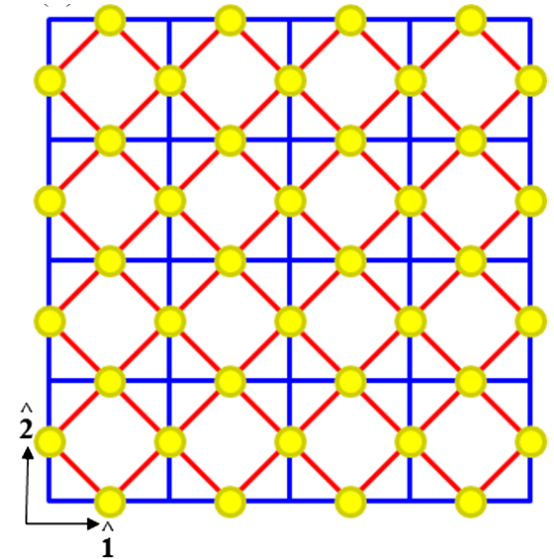
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i(n_i - 1) + \frac{V}{2} \sum_{\{i,j\}} n_i n_j$$

ホッピング項
(赤線 + 青線)

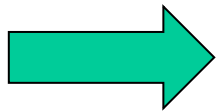
オンサイト相互作用
(黄色の点)

オフサイト相互作用
(赤線 + 青線)

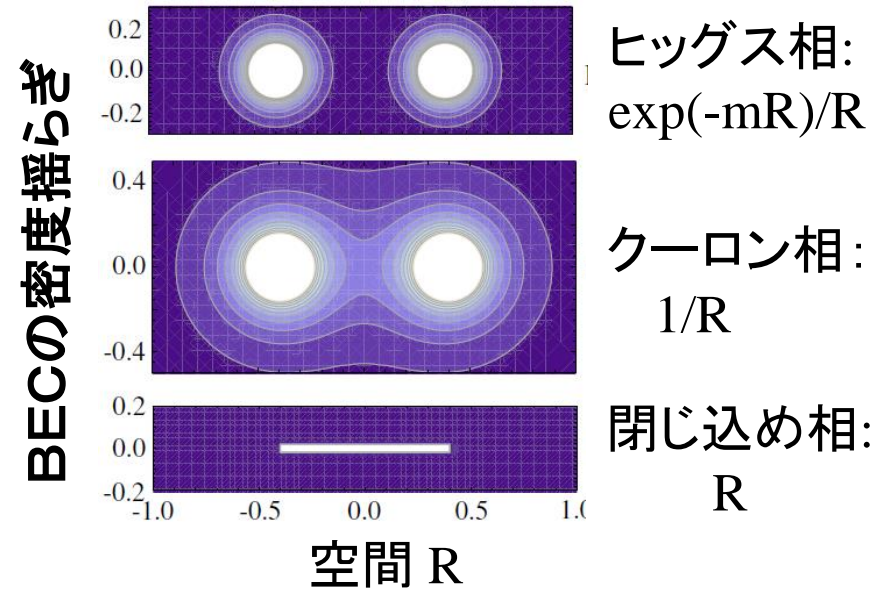
Mielke(ミールケ)格子



“BEC原子は黄色の点(リンク)に存在”



U(1) ゲージヒッグス
モデルの分配関数
を与える



まとめ1

“光格子中の冷却原子系は
ハバード模型の理想的な量子シミュレーターである”

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) ハバードパラメーターの高い制御性

U/J , U (フェッシュバツハ共鳴). J (位相変調など)

4) 多様性

量子統計、次元性、標準・非標準格子

5) 優れた観測法

まとめ1

“光格子中の中性原子系はハバードモデルとして記述される”である”

1) 大

2)

3)

4) 多

量子

5) 優れた観

当初の
ほとんどの研究が
アルカリ原子
を用いて行われてきた

まとめ1

“光格子中の原子系はハバードモデルである”

1) 大

我々のアプローチ:

2)

イッテルビウム原子

3)

に着目

4) 多

量子

5) 優れた観

PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

NIST

National Institute of Standards and Technology
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

Frequently used fundamental physical constants
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ¹³³Cs

Ytterbium atom

$R_{\infty}c$ 3.289 842 × 10¹⁵ Hz
 $R_{\infty}hc$ 13.6057 eV
Boltzmann constant k 1.3807 × 10⁻²³ J K⁻¹

Physics Laboratory physics.nist.gov
Standard Reference Data Group www.nist.gov/srd

Group 1 IA	Group 2 IIA	Group 3 IIIB	Group 4 IVB	Group 5 VB	Group 6 VIB	Group 7 VIIB	Group 8 VIII	Group 9 VIII	Group 10 VIII	Group 11 IB	Group 12 IIB	Group 13 IIIA	Group 14 IVA	Group 15 VA	Group 16 VIA	Group 17 VIIA	Group 18 VIIIA	
1 H Hydrogen 1.00794 1s 13.598	2 He Helium 4.002602 1s ² 24.5874											5 B Boron 10.811 1s ² 2s ² 2p 8.2980	6 C Carbon 12.0107 1s ² 2s ² 2p ² 11.2603	7 N Nitrogen 14.0067 1s ² 2s ² 2p ³ 14.5341	8 O Oxygen 15.9994 1s ² 2s ² 2p ⁴ 13.6181	9 F Fluorine 18.9984032 1s ² 2s ² 2p ⁵ 17.4228	10 Ne Neon 20.1797 1s ² 2s ² 2p ⁶ 21.5645	
2 Li Lithium 6.941 1s ² 2s 5.3917	Be Beryllium 9.012182 1s ² 2s ² 9.3227											13 Al Aluminum 26.981538 [Ne]3s ² 3p 5.9858	14 Si Silicon 28.0855 [Ne]3s ² 3p ² 8.1517	15 P Phosphorus 30.973761 [Ne]3s ² 3p ³ 10.4867	16 S Sulfur 32.065 [Ne]3s ² 3p ⁴ 10.3600	17 Cl Chlorine 35.453 [Ne]3s ² 3p ⁵ 12.9676	18 Ar Argon 39.948 [Ne]3s ² 3p ⁶ 15.7596	
3 Na Sodium 22.989770 [Ne]3s 5.1391	Mg Magnesium 24.3050 [Ne]3s ² 7.6462																	
4 K Potassium 39.0983 [Ar]4s 4.3407	Ca Calcium 40.078 [Ar]4s 6.1132	Sc Scandium 44.955910 [Ar]3d ¹ 4s ² 6.5615	Ti Titanium 47.867 [Ar]3d ² 4s ² 6.8281	V Vanadium 50.9415 [Ar]3d ³ 4s ² 6.7462	Cr Chromium 51.9961 [Ar]3d ⁵ 4s 6.7665	Mn Manganese 54.938049 [Ar]3d ⁵ 4s ² 7.4340	Fe Iron 55.845 [Ar]3d ⁶ 4s ² 7.9024	Co Cobalt 58.933200 [Ar]3d ⁷ 4s ² 7.8810	Ni Nickel 58.6934 [Ar]3d ⁸ 4s ² 7.6398	Cu Copper 63.546 [Ar]3d ¹⁰ 4s 7.7264	Zn Zinc 65.409 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 9.942	Ga Gallium 69.723 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p 5.9993	Ge Germanium 72.64 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ² 7.8994	As Arsenic 74.92160 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³ 7.8866	Se Selenium 78.96 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴ 9.7524	Br Bromine 79.904 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵ 11.8138	Kr Krypton 83.798 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 13.9996	
5 Rb Rubidium 85.4678 [Kr]5s 4.1771	Sr Strontium 87.62 [Kr]5s ² 5.6949	Y Yttrium 88.90585 [Kr]4d ⁵ 5s 6.2173	Zr Zirconium 91.224 [Kr]4d ⁵ 5s ² 6.6339	Nb Niobium 92.90638 [Kr]4d ⁴ 5s 6.7589	Mo Molybdenum 95.94 [Kr]4d ⁵ 5s 7.28	Tc Technetium (98) [Kr]4d ⁵ 5s ² 7.28	Ru Ruthenium 101.07 [Kr]4d ⁷ 5s 7.3605	Rh Rhodium 102.90550 [Kr]4d ⁸ 5s 7.4589	Pd Palladium 106.42 [Kr]4d ¹⁰ 8.3369	Ag Silver 107.8682 [Kr]4d ¹⁰ 5s 7.5762	Cd Cadmium 112.411 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 8.9938	In Indium 114.818 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p 5.7864	Sn Tin 118.710 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ² 7.3439	Sb Antimony 121.760 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³ 8.6084	Te Tellurium 127.60 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴ 9.0096	I Iodine 126.90447 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵ 10.4513	Xe Xenon 131.293 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ 12.1298	
6 Cs Cesium 132.90545 [Xe]6s 3.8939	Ba Barium 137.327 [Xe]6s ² 5.2117		Hf Hafnium 178.49 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² 6.8251	Ta Tantalum 180.9479 [Xe]4f ¹⁴ 5d ³ 6s ² 7.5496	W Tungsten 183.84 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² 7.8640	Re Rhenium 186.207 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ² 7.8335	Os Osmium 190.23 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ² 8.4382	Ir Iridium 192.217 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ² 8.9670	Pt Platinum 195.078 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s 8.9588	Au Gold 196.96655 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s 9.2255	Hg Mercury 200.59 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 10.4375	Tl Thallium 204.3833 [Hg]6p 6.1082	Pb Lead 207.2 [Hg]6p ² 7.4167	Bi Bismuth 208.98038 [Hg]6p ³ 7.2655	Po Polonium (209) [Hg]6p ⁴ 8.414	At Astatine (210) [Hg]6p ⁵	Rn Radon (222) [Hg]6p ⁶ 10.7485	
7 Fr Francium (223) [Rn]7s 4.0727	Ra Radium (226) [Rn]7s ² 5.2784		Rf Rutherfordium (261) [Rn]5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ² 6.0 ?	Db Dubnium (262)	Sg Seaborgium (266)	Bh Bohrium (264)	Hs Hassium (277)	Mt Meitnerium (268)	Uun Ununnilium (281)	Uuu Unununium (272)	Uub Ununbium (285)	Uuq Ununquadium (289)	Uuh Ununhexium (293)					
			La Lanthanum 138.9055 [Xe]5d ¹ 6s ² 5.5769	Ce Cerium 140.116 [Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s ² 5.5387	Pr Praseodymium 140.90765 [Xe]4f ³ 6s ² 5.473	Nd Neodymium 144.24 [Xe]4f ⁴ 6s ² 5.5250	Pm Promethium (145) [Xe]4f ⁵ 6s ² 5.582	Sm Samarium 150.36 [Xe]4f ⁶ 6s ² 5.6437	Eu Europium 151.964 [Xe]4f ⁷ 6s ² 5.6704	Gd Gadolinium 157.25 [Xe]4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 6.1496	Tb Terbium 158.92534 [Xe]4f ⁹ 6s ² 5.8638	Dy Dysprosium 162.500 [Xe]4f ¹⁰ 6s ² 5.9389	Ho Holmium 162.93032 [Xe]4f ¹¹ 6s ² 6.0215	Er Erbium 167.259 [Xe]4f ¹² 6s ² 6.1077	Tm Thulium 168.93421 [Xe]4f ¹³ 6s ² 6.1843	Yb Ytterbium 173.04 [Xe]4f ¹⁴ 6s ² 6.2542	Lu Lutetium 174.967 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 5.4259	
			Ac Actinium (227) [Rn]6d ¹ 7s ² 5.17	Th Thorium 232.0381 [Rn]6d ² 7s ² 6.3067	Pa Protactinium 231.03588 [Rn]5f ¹ 6d ² 7s ² 5.89	U Uranium 238.02891 [Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ² 6.1941	Np Neptunium (237) [Rn]5f ⁴ 6d ¹ 7s ² 6.2657	Pu Plutonium (244) [Rn]5f ⁶ 7s ² 6.0260	Am Americium (243) [Rn]5f ⁷ 7s ² 5.9738	Cm Curium (247) [Rn]5f ⁸ 6d ¹ 7s ² 5.9914	Bk Berkelium (247) [Rn]5f ⁹ 7s ² 6.1979	Cf Californium (251) [Rn]5f ¹⁰ 7s ² 6.2817	Es Einsteinium (252) [Rn]5f ¹¹ 7s ² 6.42	Fm Fermium (257) [Rn]5f ¹² 7s ² 6.50	Md Mendelevium (258) [Rn]5f ¹³ 7s ² 6.58	No Nobelium (259) [Rn]5f ¹⁴ 7s ² 6.65	Lr Lawrencium (262) [Rn]5f ¹⁴ 7s ² 7p ¹ 4.9 ?	

Atomic Number: 58
Ground-state Level: 1G₄
Symbol: Ce
Name: Cerium
Atomic Weight: 140.116
Ground-state Configuration: [Xe]4f¹5d¹6s²
Ionization Energy (eV): 5.5387

[†]Based upon ¹²C. () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit physics.nist.gov/data

仏：パリ高等師範学校
(ダリバード教授)

独：ハンブルグ大学
(ゼンクストック教授)

ワシントン大学
(グプタ教授)

メリーランド大学
/NIST (ポルト教授)

独：マックスプランク研究所
(ブロッホ教授)

韓国ソウル大学

中国

伊：フィレンツェ大学
(イングッシオ教授)

京都大学

英：ダーラム大学
(コーニッシュ教授)

世界的な広がりを見せるYb原子量子気体の研究

イッテルビウム原子の特徴

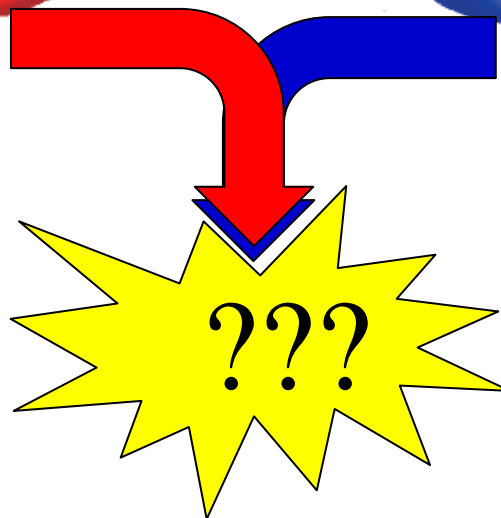
豊富な同位体

^{168}Yb (0.13%)	^{170}Yb (3.05%)	^{171}Yb (14.3%)	^{172}Yb (21.9%)	^{173}Yb (16.2%)	^{174}Yb (31.8%)	^{176}Yb (12.7%)
Boson	Boson	Fermion	Boson	Fermion	Boson	Boson

モット絶縁体
(ボース粒子)



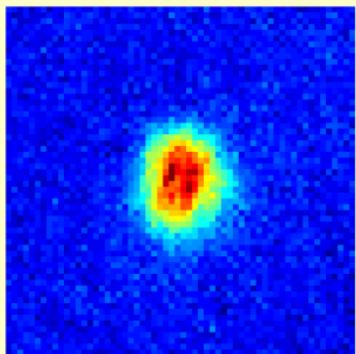
モット絶縁体
(フェルミ粒子)



強く相互作用する2重モット絶縁体

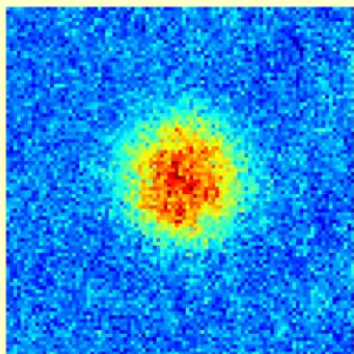
ボース凝縮

: ^{174}Yb

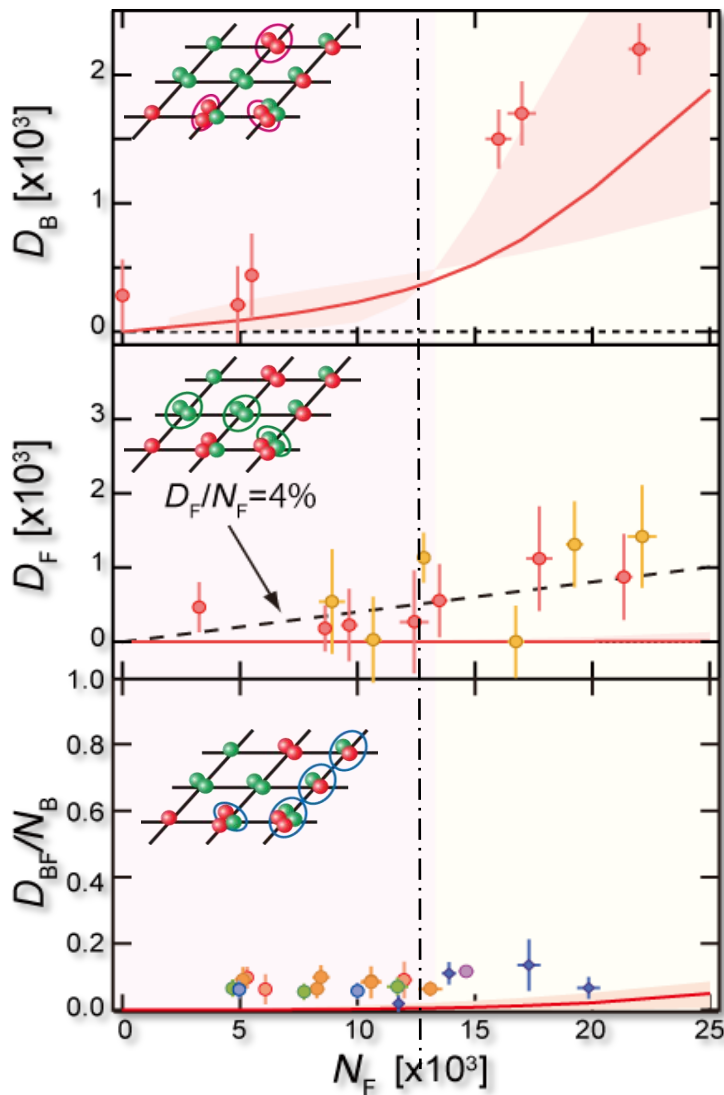


フェルミ縮退

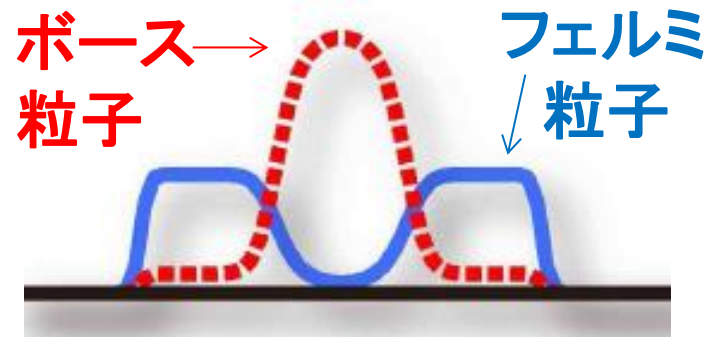
: ^{173}Yb



$T/T_F = 0.17$

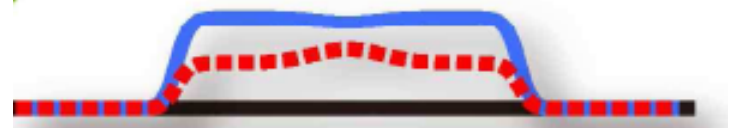


“相分離”

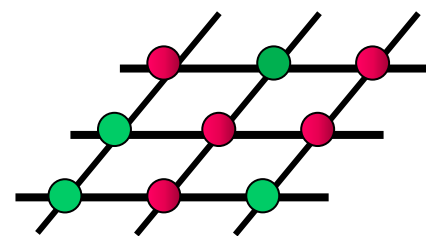


$N_F = 2 \times 10^4$

“混合モット絶縁体”



$N_F = 1 \times 10^4$



[S. Sugawa, *et al.*, NP.7, 642(2011)]

イッテルビウム原子の特徴

豊富な同位体

^{168}Yb (0.13%)	^{170}Yb (3.05%)	^{171}Yb (14.3%)	^{172}Yb (21.9%)	^{173}Yb (16.2%)	^{174}Yb (31.8%)	^{176}Yb (12.7%)
Boson	Boson	Fermion	Boson	Fermion	Boson	Boson
$I=0$	$I=0$	$I=1/2$	$I=0$	$I=5/2$	$I=0$	$I=0$

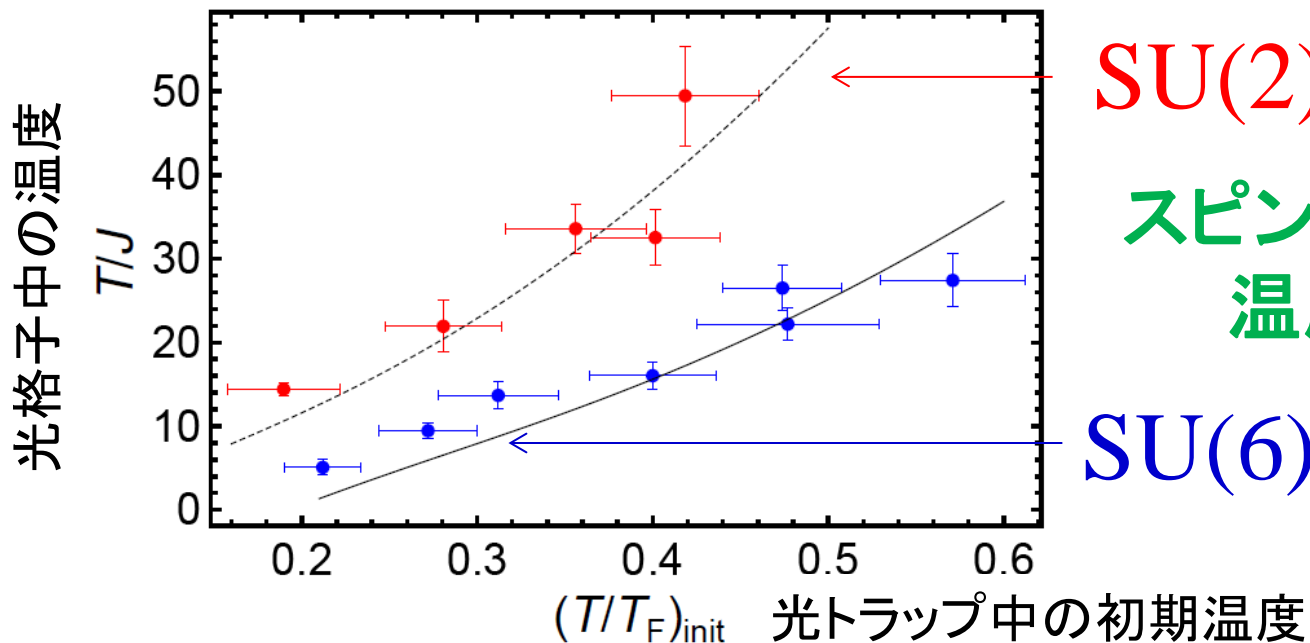


$^{173}\text{Yb}(I=5/2): \text{SU}(6)$

カイラルスピン液体
バレンスボンド結晶
 $\text{SU}(N)$ 強磁性
他



スピン自由度の活用: ポメランチュク冷却



スピン自由度が多い方が
温度が冷える! ?



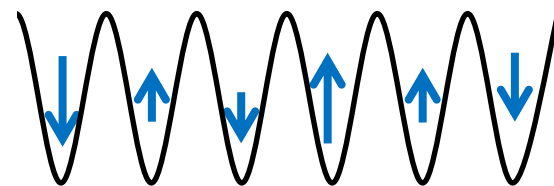
[Pomeranchuk, (1950)]

ポメランチュク冷却!!

超流動 ^3He の実現
(Osheroff, Lee,
Richardson)

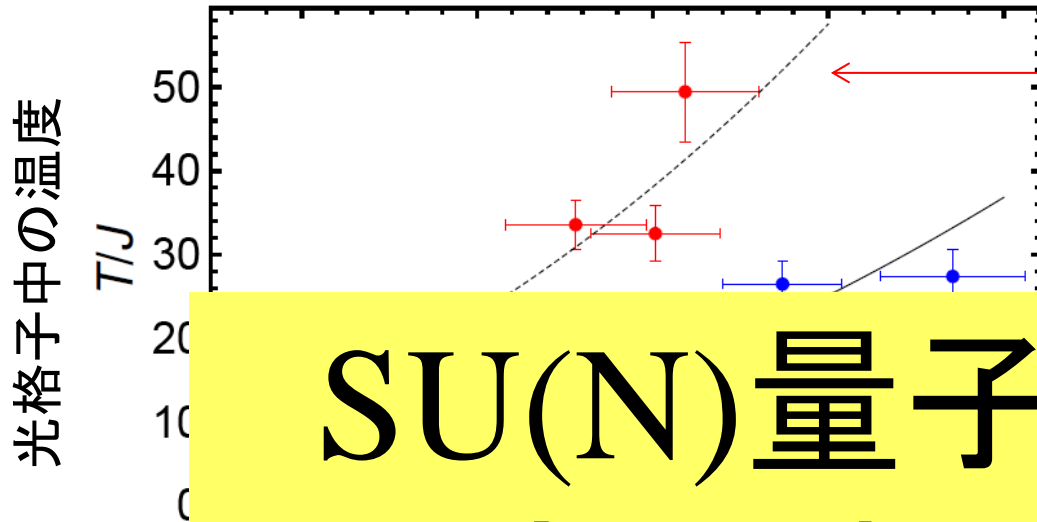
局在スピンの持つ
大きなエントロピー:

$$s \sim k_B \ln(N)$$



固体 ^3He **モット絶縁体状態**

スピン自由度の活用: ポメランチュク冷却



$SU(2)$

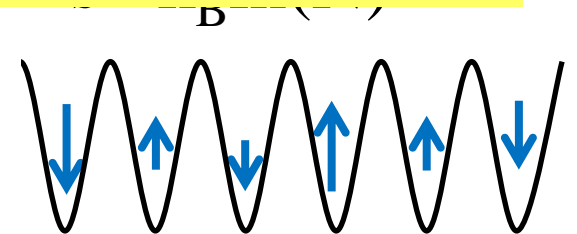
スピン自由度が多い方が
温度が冷える

$SU(N)$ 量子磁性相を
実現するための
重要な冷却法



[Pomeranchuk, (1950)]

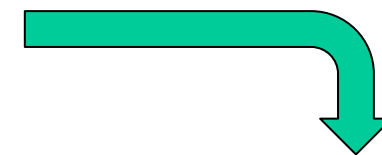
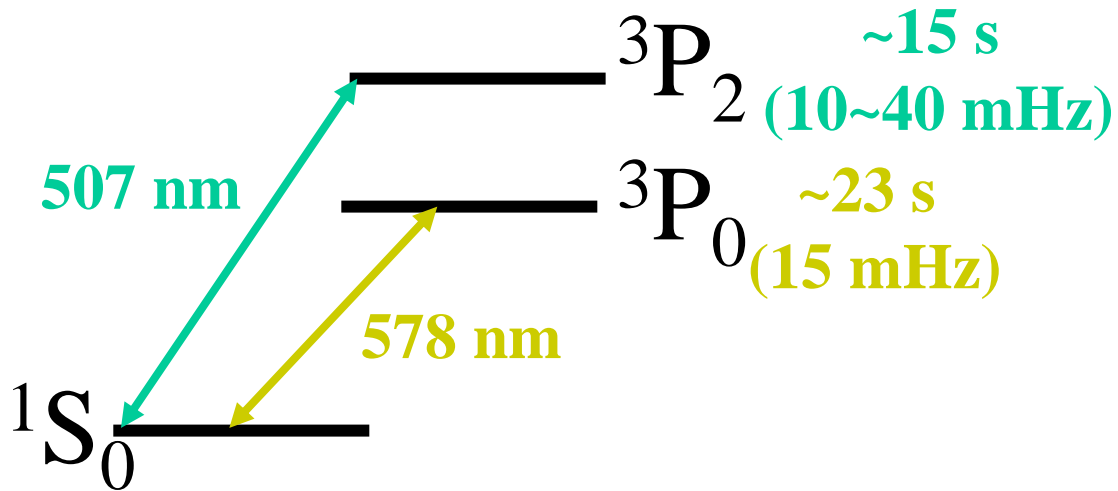
超流動 ^3He の実現
(Osheroff, Lee,
Richardson)



固体 ^3He **モット絶縁体状態**

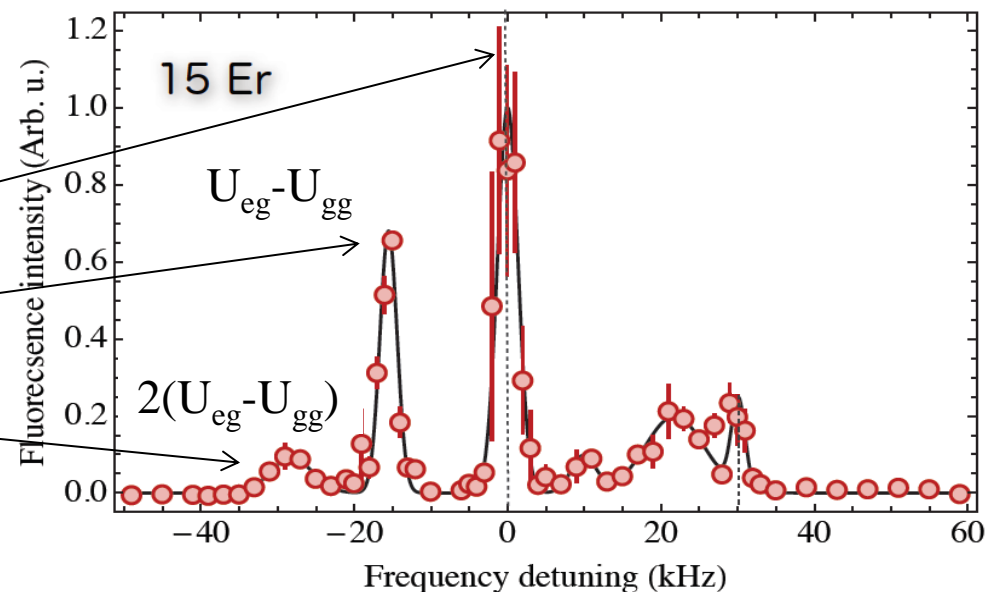
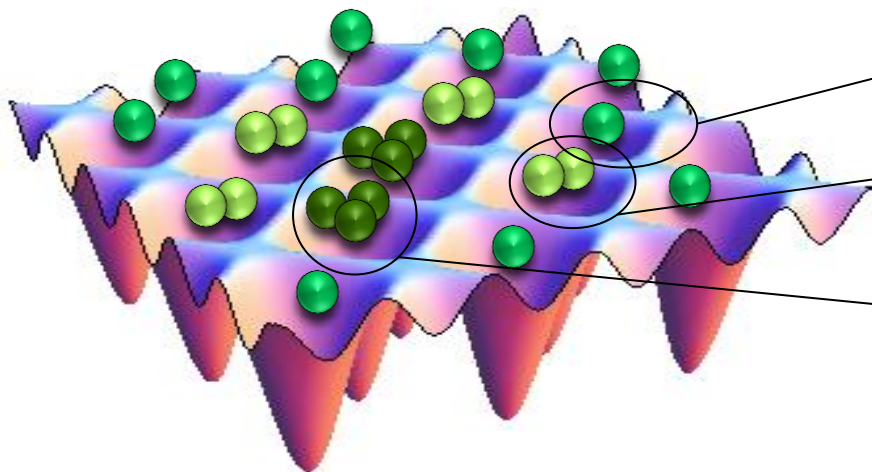
イッテルビウム原子の特徴

長寿命の励起状態の存在



高分解能なプローブ
軌道自由度 (近藤効果他)

“光格子中原子の
占拠数選択プローブ”



まとめ2

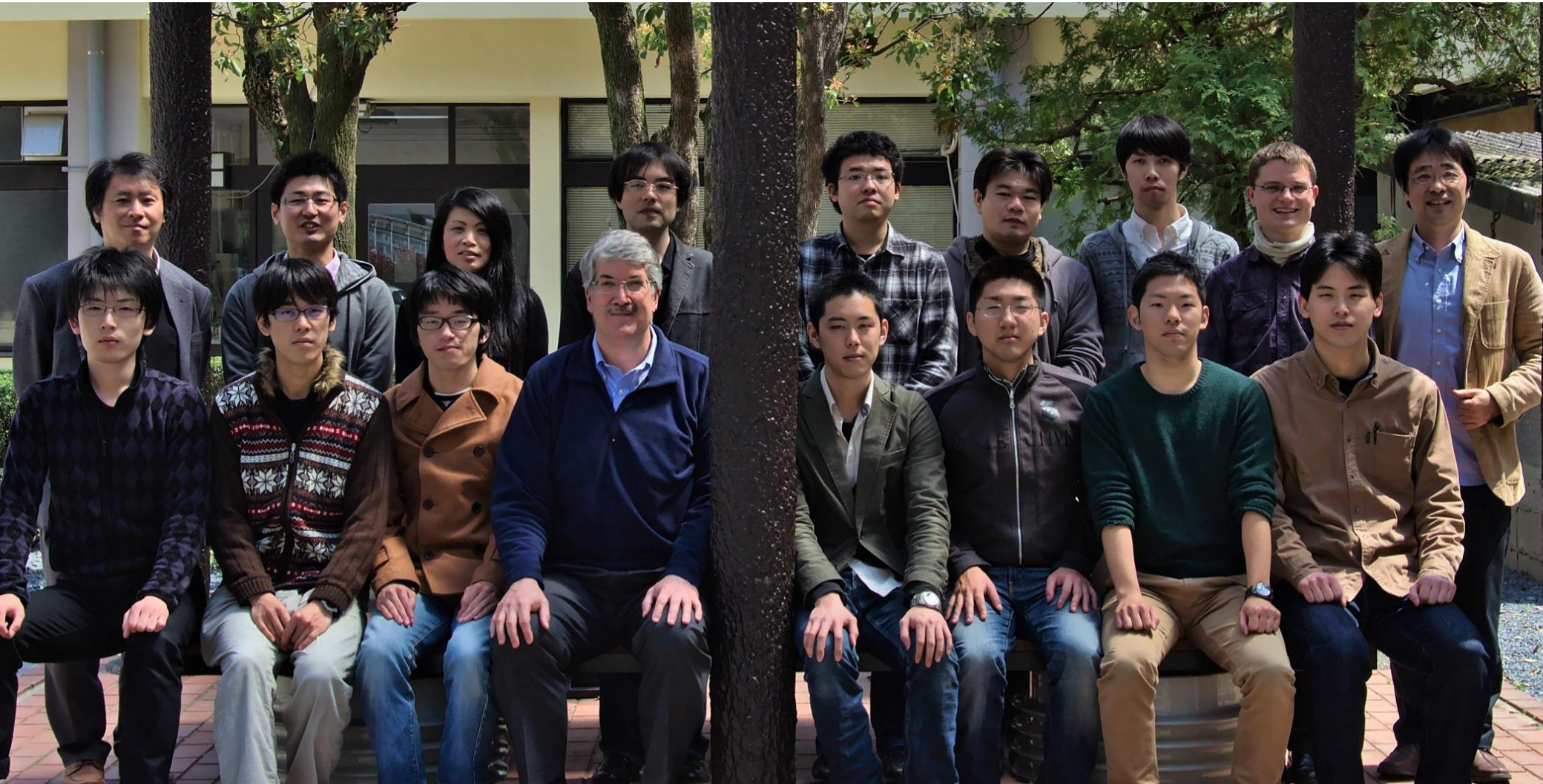
“光格子中の冷却イッテルビウム原子を用いて
ユニークな量子シミュレーション研究が可能である”

- 1) ボース・フェルミ2重モット絶縁体
- 2) SU(6)モット絶縁体
ポメラチュク冷却
- 3) 超高分解能レーザー分光

現在進行中の研究テーマ:

- SU(6)量子磁性
- 平坦バンドの強相関物理
- 不純物問題(アンダーソン局在)
- 新奇BCS状態
- 量子断熱操作(トポロジカルポンピング、量子アニーリング)
- ボース凝縮体を用いた近距離重力の検証

京都大学 量子光学研究室のメンバー



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

$$< 1\mu\text{K}$$

光の量子制御

原子

光

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

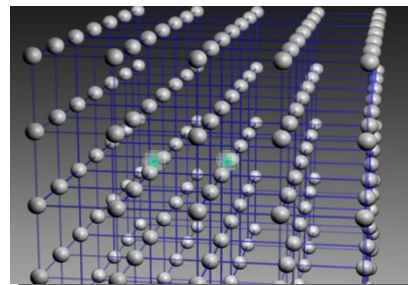
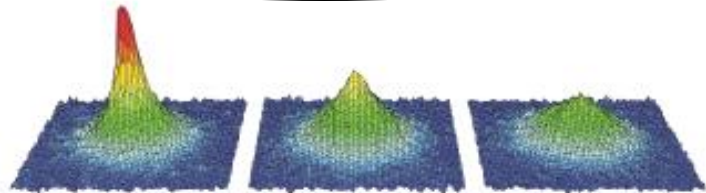
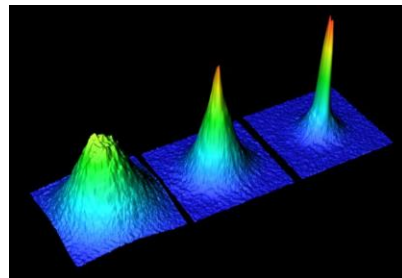
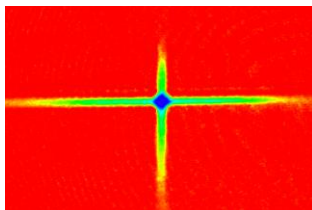
原子の量子制御

量子コンピューター

量子気体

BEC, Fermi縮退, BCS

“原子・光の極限的量子制御”



ご清聴どうも有難うございました



16 August Mount Daimonji at Kyoto