

### 11/29 2014

### 冷えた原子でつくる 新しい物質の状態



京都大学大学院理学研究科 物理学·宇宙物理学専攻 物理第一分野 量子光学研究室

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

# 極低温原子がもたらす物性物理学の新展開

### レーザー冷却・トラップ:

#### ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ原子超流動

### 光格子中の冷却原子:

多様性 強い相関を持った原子集団 大きなスピン自由度を持った系 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態 各格子点の単一原子の観測と制御 素粒子理論のシミュレーション

### 中性原子のレーザー冷却法の開発



・ザー冷却・トラップ



- **原子数**:10<sup>7</sup>
- 密度: 10<sup>11</sup>/cm<sup>3</sup>
- •温度:10µK



-冷却・トラップ





原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の実現

レーザー冷却の技術を駆使して、 1995年に実現したルビジウム金属 の原子のボース・アインシュタイン 凝縮は100 nK という非常に低い 温度で実現しました!

気体を冷却していくと、液体へ、 そして、固体へと変化するはずで すが、、、

この凝縮体の原子の密度は低く、あくまで、気体のままです

気体の過冷却した、寿命の長い特別な状態が原子気体のボース凝縮であると言えます。



原子はランダム に 熱運動をする  $l >> \lambda_{dB}$ 

低温になった原子 では、波動性が顕 著に表れる

 $l > \lambda_{dB}$ 



互いの波が重なり 合い量子力学的 相転移が起きる

 $l \approx \lambda_{dB}$ 

#### 下の図はRb(ルビジウム)原子の速度分布の変化を示しています。左から右に行くにつれて、 原子の温度は低くなっています。

[M. H. Anderson, et al, Science, 269, 198(1995)]

0.2 mm



#### 量子力学によれば、原子には、 「ボース粒子」と「フェルミ粒子」(電子のなかま) の2種類があります

#### 超低温で

「ボース粒子」はボース・アインシュタイン凝縮を起こしますが、 「フェルミ粒子」はどんな現象が起こるでしょうか?

#### 固体の超伝導:ペアーになった電子の凝縮 0.15 0.125 H. Kamerlingh Onnes, Hg Akad. Van Wetenschappen 0.10 14, 113 818 (1911) ି **ଅ** 0.075 0.05 0.025 10<sup>-5</sup>Ω 0.00 http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meissner\_effect\_p13 4.20 4.30 4.00 4.10 4.40 90048.jpg#mediaviewer/File:Meissner effect p1390048.jpg **T**[K] Bardeen-Cooper-Schriefer 理論 "格子振動を媒介 とした引力"

http://www.phys.shimaneu.ac.jp/mutou\_lab/ zakki/super/pair\_const.html





#### "原子対"を"分子"に変換



# 極低温原子がもたらす物性物理学の新展開

### レーザー冷却・トラップ:

#### ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ原子超流動

### 光格子中の冷却原子:

多様性 強い相関を持った原子集団 大きなスピン自由度を持った系 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態 各格子点の単一原子の観測と制御 素粒子理論のシミュレーション

### 光が作る周期構造:「光格子」



## 隣の格子点へ(トンネル)移動

### 粒子間の相互作用



「「」」」 いろいろな原子を 利田オスーレができる							artment of Commerce rd Reference ta Group v.nist.gov/srd 16 17
13     IIA       3     2s <sub>1/2</sub> 1 * s <sub>0</sub> 2     Lithium 6.941 13 <sup>2</sup> 2s     1 eryllium 0.12182 15 <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 11     2s <sub>1/2</sub> 11     2s <sub>1/2</sub> 12     1s <sub>0</sub> 3     Sodium	proton mat fine-structu Rydberg cu Boltzmann	►UC ss m <sub>e</sub> c <sup>c</sup> m <sub>e</sub> c m <sub>e</sub> c m m m m m m m m m m m m m m m m m m m	0.5110 MeV 1.6726 × 10 <sup>-27</sup> kg 1/137.036 10 973 732 m <sup>-1</sup> 3.289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz 13.6057 eV 1.3807 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>		Artificially Prepared	Boron     Carbon       10.811     12.0107       1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p     1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> 13 <sup>2</sup> P <sup>o</sup> <sub>1/2</sub> 14       All     Si       Silicon     Silicon	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
22.983770 [Ne]3s 24 19 'S <sub>17</sub> 20 'S <sub>0</sub> 19 'S <sub>17</sub> 20 'S <sub>0</sub> CCa 19 Solution 24 Potassium 39.0983 [Ar]4s 13407 2400 2	3     4       IIIB     IVB       21 <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> 22 <sup>3</sup> I       Sandum     Z     Tianu     Tianu       A 955910     Tianu     Tianu     7.867       An33d4s <sup>3</sup> 6.5615     6.8281     39       39 <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> 40     31	5 6 VB VIB 7 23 <sup>4</sup> F <sub>37</sub> 24 <sup>7</sup> V Vanadium 50.9415 (Ar]3d <sup>4</sup> 45 (Ar]3d <sup>4</sup> 45 (A	7 8 VIIB s <sup>3</sup> 25 <sup>6</sup> S <sub>672</sub> 26 <sup>5</sup> C Mn Hanganese 51.938049 Arija <sup>4</sup> 4s <sup>2</sup> 7.4340 3 43 <sup>6</sup> S <sub>572</sub> 44 <sup>5</sup> F	9 10 VIII 24 27 <sup>4</sup> F <sub>972</sub> 28 <sup>3</sup> F <sub>2</sub> Cobalt 58.933200 [Ar]3d <sup>4</sup> 43 <sup>2</sup> 7.8810 55 45 <sup>4</sup> F <sub>972</sub> 46 <sup>1</sup> So	11     12       IB     IIB       29     2s.12       Copper     30       63.546     54.09       7.7264     9.3942       47     2s.12       48     1s.0	Addinincum     Sincon       26.981558     28.0855       [Nej3 <sup>2</sup> 3p     S.0855       5.9858     8.1517       31 <sup>2</sup> P <sup>0</sup> / <sub>12</sub> 32 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> Gaa     Germanium       69.723     (Arj3d <sup>10</sup> 4 <sup>3</sup> 4p       72.64     (Arj3d <sup>10</sup> 4 <sup>3</sup> 4p       5.9993     7.8994       49_ <sup>2</sup> P <sup>2</sup> <sub>12</sub> 50 <sup>3</sup> P <sub>0</sub>	1105/moles 30104 32.055 35.0473761 32.055   10.867 10.3600 12.9676 15.7598   10.4867 10.3800 12.9676 15.7598   33 45.32 34 <sup>3</sup> P <sub>2</sub> 35 <sup>2</sup> P <sub>302</sub> AS Selenium 78.904 16.163 16.163 16.163   74.92160 Selenium 78.904 17.92460 16.173 17.904   9.7886 9.7524 11.8138 13.9996 13.9996   51 45.32 52 <sup>3</sup> P <sub>2</sub> 53 <sup>2</sup> P <sub>302</sub>
5 Rb Sr Rubidiur 85.4578 Sr KrK5s Kr/R15 <sup>2</sup> 5.6949 5 S1/2 CS Cesium 132.90545 [Xe]68 Xel68 <sup>2</sup>	Y ttrium 8:90585 6:2173 Zirconium 4:1242 (Kr)4d53 <sup>2</sup> 6:6339 Z2 4 Kr)4d5 6:6339 Z2 4 Hff Hafnun 178.49 [Xe]41 <sup>4</sup> 5 <sup>2</sup> 6	Nb     Mc       Niobium     92.90538       82.90538     KrJad <sup>5</sup> 5       6.7589     7.0924       =     73 <sup>4</sup> F <sub>312</sub> 74 <sup>5</sup> Tantalum     183.84     Yungste       183.84     YxeJat <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 65 <sup>2</sup> YxeJat <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 65 <sup>2</sup>	TC     Ru       Jam     Technetium (98)     Ruthenium 101 07       s     Ikrlad/Ss2     Krklad/Ss2       D0     75     6S <sub>512</sub> Ree     OS     OS       n     Rbenium 186 207     OS smium 190 23       6s²     [Xelq41 <sup>4</sup> 5s <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> ]       [Xelq41 <sup>4</sup> 5s <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> ]     [Xelq41 <sup>4</sup> 5s <sup>4</sup> 5s <sup>4</sup>	Rh     Pd       Rhodium     2.90550       102.90550     Palladium       106.42     Palladium       106.42     8.3369       107 <sup>4</sup> F <sub>972</sub> 11     77       11     Platinum       192.217     Platinum       195.078     [Xelq1 <sup>4</sup> 5d <sup>2</sup> 65 <sup>2</sup>	Ag Silver 107.8682 [Kr14d <sup>10</sup> 5s 7.5762 <b>8 9938</b> <b>79</b> <sup>2</sup> S <sub>112</sub> <b>80</b> <sup>1</sup> S <sub>0</sub> <b>AU</b> Gold 196.96655 [Xe]41 <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s [Xe]41 <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s	In Sn Indium Tin 114.818 118.710 [Kr14d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p 5.7864 5.7864 5.73439 81 <sup>2</sup> P <sup>*</sup> 1/2 82 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> 714 <b>Pb</b> Thallium Lead 204.3833 207.2 [Hg]6p [Hg]6p <sup>2</sup>	Sb     Te     I     Value       Antimony     121.00     Iodine     126.90447     Xenon       121.700     127.00     126.90447     141.293     Xenon       124.94 <sup>db</sup> 55 <sup>4</sup> 59 <sup>3</sup> Kr14 <sup>db</sup> 5s <sup>4</sup> 59 <sup>4</sup> Kr14 <sup>db</sup> 5s <sup>4</sup> 59 <sup>4</sup> Xenon     131.293       83 <sup>4</sup> S <sub>92</sub> 84 <sup>3</sup> P <sub>2</sub> 85 <sup>2</sup> P <sub>32</sub> 86 <sup>1</sup> S <sub>0</sub> Bi     POO     Astatine     Astatine     Radon     Radon     Radon       1Haj5p <sup>3</sup> (Haj5p <sup>4</sup> )     Haj5p <sup>5</sup> IHaj5p <sup>5</sup> IHaj5p <sup>5</sup> IHaj5p <sup>5</sup>
3 8939   5 2117     87   2S <sub>1/2</sub> 88   1S <sub>0</sub> Fr   Ra     Francium   (228)     [Rn]7s   [Rn]7s <sup>2</sup> 4.0727   5.2784	6.8251 <b>104</b> <sup>3</sup> F <b>Rf</b> Rutherfordia (261) (261) (261) (261) 6.0 ? <b>57</b> <sup>2</sup> D	7,5496 7,5496 7,5496 7,5490 7,5490 106 Sg Seaborgit (262) Seaborgit (266) 106 Sg Seaborgit (266)	7.8335     8.4382       107     108       Bh     108       Bohrium     108       (264)     108       ***     60       ***     60       ***     60	8.9670 8.9588 109 Mt Meitnerium (268) 110 Ununnilium (281) 0 62 7Ea 63 85°	9.2255 10.4375 111 Uuuu Unununuium (272) Uuub Ununbium (285) 64 °D <sup>o</sup> 65 °H <sup>o</sup> .	6.1082 7.4167 114 Ununquadium (289) 66 °1 67 41°co 4	7.2855 8.414 10.7485 116 Ununhexium (292) 88 <sup>3</sup> H S9 <sup>2</sup> F <sup>2</sup> 70 <sup>1</sup> S 71 <sup>2</sup> Den
Number Level Symbol 58 <sup>1</sup> G <sup>o</sup> Ce Cerium Atomic Level Cerium Atomic [Xe]4f5d6 <sup>2</sup> 5.5387 Ground-state Ionization Configuration Energy (eV)	Laathanur 138.9056 55769 89 <sup>2</sup> D 89 <sup>2</sup> D 89 <sup>2</sup> D AC (227) [Rh[6d7 <sup>2</sup> ] 5.17	Ceium     Praseodym       140.116     Praseodym       140.116     [Xel4f5ds <sup>2</sup> 5.5387     5.473       90 <sup>3</sup> F <sub>2</sub> Thorium     232.0381       [Rnipid <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> 5.897       [Rnipid <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> 5.897       5.3067     5.897	ium     Neodymium     Promethiur       144.24     Ixel4f6s <sup>2</sup> 5.550       1/2     92     5.62       1/2     92     5.682       1/2     92     5.6       1/2     92     5.6       0     0     Np       1/2     92     5.6       0     0     Np       1/2     92     5.6       0     0     Np       0     0     Np       1/2     0     1/2     Np       0     0     1/2     Np       1/2     1/2     1/2     Np       1/2     1/2     1/2     1/2       1/2     1/2     1/2     1/2       1/2     1/2     1/2     1/2       1/2     1/2 <th>Samanum 150.36 [Xe)44<sup>7</sup>6s<sup>2</sup> 5.6437     Europium 151.964 [Xe)44<sup>7</sup>6s<sup>2</sup> 5.6704       94     <sup>7</sup>F<sub>0</sub>     95     <sup>8</sup>S<sup>9</sup>/2 <b>Put</b>       Plutonium (244) (Rnj6<sup>4</sup>7s<sup>2</sup> 6.0.26     Americium (243) (Rnj6<sup>4</sup>7s<sup>2</sup> 6.0.26     Americium (243)</th> <th>Gdd     Tb       Gadolinium     Terbiuh       157.25     Terbiuh       158.92634     [Xe]41<sup>2</sup>5363<sup>2</sup>       6.1498     5.8638       96     9D<sup>o</sup> Curium     2       Curium     2471       [Rn]51<sup>2</sup>637<sup>2</sup>     5.991<sup>2</sup>       5.991<sup>2</sup>     6.1979</th> <th>Dysprosium 162,500     Holmium 84.9303;       ysa     1       93     1       Cf     Essteinium (251)       Raj51<sup>4</sup>7s<sup>2</sup>     Einsteinium (252)       Ignj51<sup>4</sup>7s<sup>2</sup>     Einsteinium (252)       Ignj51<sup>4</sup>7s<sup>2</sup>     6,2217</th> <th><math display="block"> \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c </math></th>	Samanum 150.36 [Xe)44 <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> 5.6437     Europium 151.964 [Xe)44 <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> 5.6704       94 <sup>7</sup> F <sub>0</sub> 95 <sup>8</sup> S <sup>9</sup> /2 <b>Put</b> Plutonium (244) (Rnj6 <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> 6.0.26     Americium (243) (Rnj6 <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> 6.0.26     Americium (243)	Gdd     Tb       Gadolinium     Terbiuh       157.25     Terbiuh       158.92634     [Xe]41 <sup>2</sup> 5363 <sup>2</sup> 6.1498     5.8638       96     9D <sup>o</sup> Curium     2       Curium     2471       [Rn]51 <sup>2</sup> 637 <sup>2</sup> 5.991 <sup>2</sup> 5.991 <sup>2</sup> 6.1979	Dysprosium 162,500     Holmium 84.9303;       ysa     1       93     1       Cf     Essteinium (251)       Raj51 <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> Einsteinium (252)       Ignj51 <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> Einsteinium (252)       Ignj51 <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> 6,2217	$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $

<sup>†</sup>Based upon <sup>12</sup>C. () indicates the mass number of the most stable isotope.

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

NIST SP 966 (September 2003)



三角格子

http://hiroi.issp.u-tokyo.ac.jp/data/crystal\_gallery/crystal\_gallery-Pages/Image31.html

## 高温超伝導物質 をより忠実に再現したモデル 酸素: 銅:



### 新しい物質の状態

極低温に冷えた原子の集団を使うことによって、極めて高 い制御性で、新しい物質の状態を作り出すことができるよ うになり、物性物理学に新展開をもたらしています。

### 強い相関を持った原子の集団 ボース粒子とフェルミ粒子の混合系 大きなスピン自由度を持った系 長距離で相互作用を及ぼしあう粒子の系 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態

### 強い相関を持った原子の集団





証拠"

http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/mulslid.html#c4

### 粒子間の相互作用 大:U>>J



### 粒子間の相互作用 大:U>>J 格子点に局在

### 強い相関: 隣に原子があるから隣にいけない "モット絶縁体" N. F. Mott





小 ← 光格子ポテンシャルの深さ: $V_0 \longrightarrow$  大 U/J



"運動量分布の観測"

*U/J*:大







### 新しい物質の状態

極低温に冷えた原子の集団を使うことによって、極めて高い制御性で、新しい物質の状態を作り出すことができるようになり、物性物理学に新展開をもたらしています。

強い相関を持った原子の集団 ボース粒子とフェルミ粒子の混合系 大きなスピン自由度を持った系 長距離で相互作用を及ぼしあう粒子の系 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態

#### "電子"はスピン(内部自由度)が2成分ある 雷子 "原子"は内部自由度が多い 電子 中性子 陽子 (原子は、"電子"と"原子核" 電子 電子 からできています) http://www.vonden.co.ip/life/kids/museum/survev/atom <sup>173</sup>Yb原子:スピンが6成分 例: さらに対称性が高い SU(6)対称性

### SU(N)対称性とスピンの量子状態

N=2の場合:

長距離の磁気秩序 (反強磁性ネール秩序)



### N>2になると 量子揺らぎが大きくなり長距離の磁気秩序が失われる!?



A. V. Gorshkov et al. Nature Physics, 6, 289 (2010)



P. Corboz et al.

P. Corboz et al. Phys. Rev. X 2, 041013 (2012) PRB 86, 041106(R) (2012)

### 新しい物質の状態

極低温に冷えた原子の集団を使うことによって、極めて高い制御性で、新しい物質の状態を作り出すことができるようになり、物性物理学に新展開をもたらしています。

強い相関を持った原子の集団 ボース粒子とフェルミ粒子の混合系 大きなスピン自由度を持った系 長距離で相互作用を及ぼしあう粒子の系 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態

### 2次元平面を運動する電子に高磁場を加えると...



### 2次元平面を運動する中性原子に高磁場を加えると...

### "何も起きない":電荷q=0!

### 実効的に"磁場"を生成させることが可能!!







### 実効的な"強磁場"の生成



# 極低温原子がもたらす物性物理学の新展開

### レーザー冷却・トラップ:

#### ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ原子超流動

### 光格子中の冷却原子:

多様性 強い相関を持った原子集団 大きなスピン自由度を持った系 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態 各格子点の単一原子の観測と制御 素粒子理論のシミュレーション







[WS Bakr, et al., Science 329, 547(2010)]





# 極低温原子がもたらす物性物理学の新展開

### レーザー冷却・トラップ:

ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ原子超流動

### 光格子中の冷却原子:

多様性: さまざまな原子、さまざまな格子 強い相関を持った原子集団:超流動ーモット絶縁体転移 大きなスピン自由度を持った系:SU(N)磁性 人工的に極めて高い"磁場"が印加された状態 各格子点の単一原子の観測と制御 素粒子理論のシミュレーション



<sup>[</sup>I. Bloch et al, RMP80,885(2008)]