

光格子中の冷却原子気体を用いた量子シミュレーション

光格子はレーザー光でつくった人工の結晶です。本稿では、ナノ・ケルビンという極低温まで冷却させた原子の気体をこの中に閉じ込めて、物質が示す多様な特性を探求する量子シミュレーションについて解説します。さらに、この技術を応用して、京都大学とNTTが世界で初めてつくり出すことに成功した物質の新しい量子状態についての研究成果を紹介します。

やました まこと いなば けんすけ
山下 眞 / 稲葉 謙介

NTT物性科学基礎研究所

極低温の原子気体を使った究極のシミュレーション

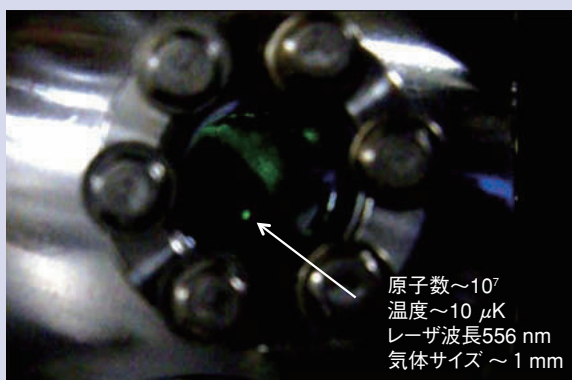
まず、図1の写真をご覧ください。矢印で示された中央にある緑色の小さな点は、超高真空装置の中でレーザー冷却され、蛍光を発しているイッテルビウム (Yb) という原子の気体です。気体のサイズは1 mm程度で、その中に約1 000万個のイッテルビウム原子が含まれています。このときの気体温度は10マイクロ・ケルビン（絶対零度に対して10万分の1度）程度しかありません。このままでも十分に低温なのですが、現在では蒸発冷却と呼ばれる冷却技術を併用して、温度をさらに4桁

近く下げて、ナノ・ケルビン（絶対零度に対して10億分の1度）にまで気体を冷却することが可能になっています。これは気体ではありますが、人類が地球上で手にするもっとも冷たい物質だと考えられており、そこでは、我々の日常生活からは想像できないような物理法則、すなわち量子力学によって支配された世界が実現しています。

最近、上述のナノ・ケルビンにまで冷却された原子気体を用いて、量子力学を研究する新しいアプローチが注目を集めています。これは単純で制御しやすい原子を用いて、難解な量子力学的な現象をシミュレーションしようとする試みということで、「量子シミュ

レーション」と呼ばれています⁽¹⁾。実は、我々の身近に見られる金属・絶縁性、磁性や超伝導などの物質の示す多様な性質は、量子力学的な効果に支配されていることが知られています。しかし、物質中の量子現象は複雑すぎて、現在の大型コンピュータを使っても理論的解析が困難です。例えば高温超伝導発現のメカニズムは、発見から30年経ってもいまだ完全には解明されていません。このような難問が、近い将来、冷却原子を用いた量子シミュレーションにより解決されるのではと期待されています。さらには、新機能物質や高機能デバイスの設計方針を原子気体から得ようとする、応用面を目指した研究も進んでいます。また一方で、最近著しい進展を見せている原子を制御・測定する技術を応用すれば、1個1個の原子を量子ビットとする量子コンピュータも実現できるのではないかと考えられています。NTT物性科学基礎研究所では将来技術として大きな可能性を秘めた冷却原子気体の研究を理論と実験⁽²⁾の両面で進めています。

本稿では、冷却原子気体による量子シミュレーションを解説し、さらに、京都大学 高橋義朗教授の研究室とNTT物性科学基礎研究所による、イッテル



原子数 $\sim 10^7$
温度 $\sim 10 \mu\text{K}$
レーザー波長556 nm
気体サイズ $\sim 1 \text{ mm}$

撮影：京都大学 栗川靖司博士

図1 超高真空装置内に閉じ込められたイッテルビウム原子気体

ビウムの原子気体を使って世界で初めて実現させた物質の新しい量子状態の研究成果を紹介したいと思います⁽³⁾。

光格子：光でつくる人工の結晶

量子シミュレーションで鍵となる実験技術が光格子です⁽¹⁾。図2に示されるように、光格子はレーザー光を冷却原子気体に対向的に照射することによってつくられます。このときのレーザー光の波長は原子の共鳴波長から大きくずらしているため、光の吸収によってレーザー光が原子気体を加熱することはありません。その代わりに、対向的に照射されたレーザー光は定在波となり、場所に応じて周期的に変化する格子状のポテンシャルを形成します。この周期ポテンシャルを光格子と呼び、冷却原子はこの中に閉じ込められます。図2のように原子気体に対して6方向からレーザー光を照射した場合、光格子は立方格子構造となり、その格子間隔はレーザー光の波長の半分となっています。

図2の右側に、立方格子内のある平面上での光格子とその中に閉じ込められた冷却原子の様子を模式的に描いています。周期的に変化するポテンシャル中を原子は量子力学的なトンネル効果を通して動き回り、同じ格子点上に原子が複数個存在する場合は原子どうしの衝突によって相互作用が生じます。このように、光格子はレーザー光でつくられた人工の結晶と見なすことができ、その中に原子をとどめておくことで、あたかも固体中を電子が動き回っているのと同じ状況が擬似的に実現されることとなります。しかも、高度に安定化されたレーザー光を使うことで、格子振動や格子欠陥、そして不純物が全く存在しないクリーンで理想的な結晶になっています。さらに、入射させるレーザー光の強度を変えること

で、光格子のポテンシャルの深さは変化し、その結果、格子内で動き回っている原子の運動を制御することも可能です。このような光格子の実験技術が確立することで、物質の研究に極低温の原子気体を使う、これまでになかった画期的なアプローチが可能になりました。

ボソンとフェルミオン

物質が示すさまざまな特性（すなわち物性）には、量子力学が深くかかわっています。量子力学ではすべての粒子は統計性の違いに応じて、ボソン（ボース粒子）とフェルミオン（フェルミ粒子）の2種類に分類されます。図3は絶対零度でのボソンとフェルミオンのエネルギー分布を示したものです。

図から明らかなようにボソンは1つのエネルギー状態に任意の数の粒子が存在できるという性質を持っています。身近なものとして、光子や質量数4のヘリウム（He）原子などがボソンに属します。液0体ヘリウムが低温で起こす超流動現象はヘリウム原子のボソンとしての性質に起因するものです。一方、フェルミオンは、1つのエネルギー状態に複数の粒子は存在できず、ボソンとは全く違った性質を持ちます。電子、陽子、中性子などがフェルミオンの代表例です。金属や半導体が示す多くの性質は電子がフェルミオンであることを基本として説明されています。さらに、超伝導はその電子がペアを組んでボソンとなることで生じる現象であると理解されています。

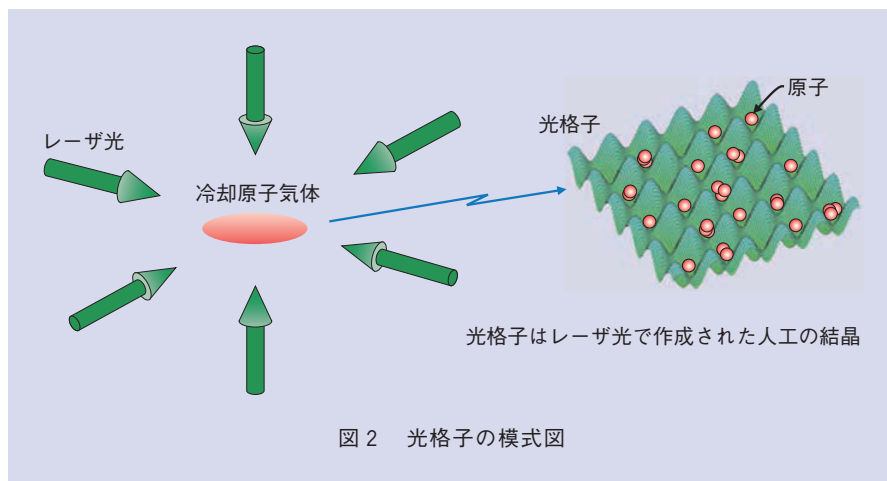


図2 光格子の模式図

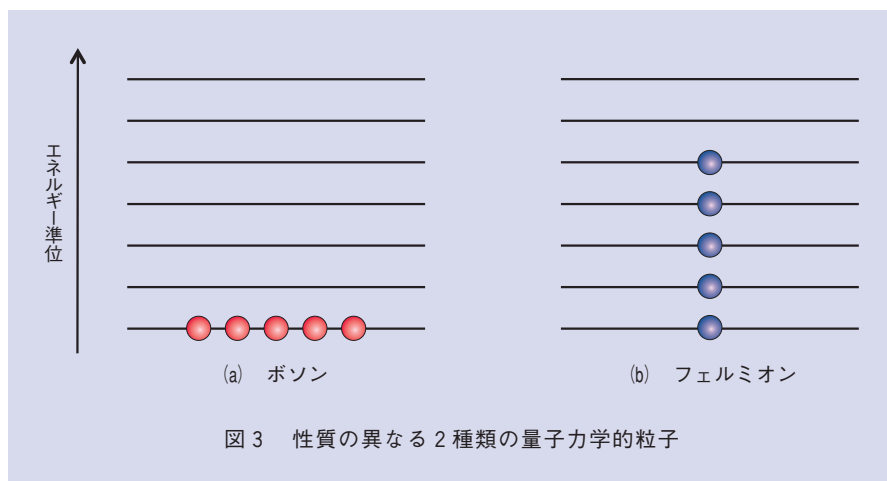


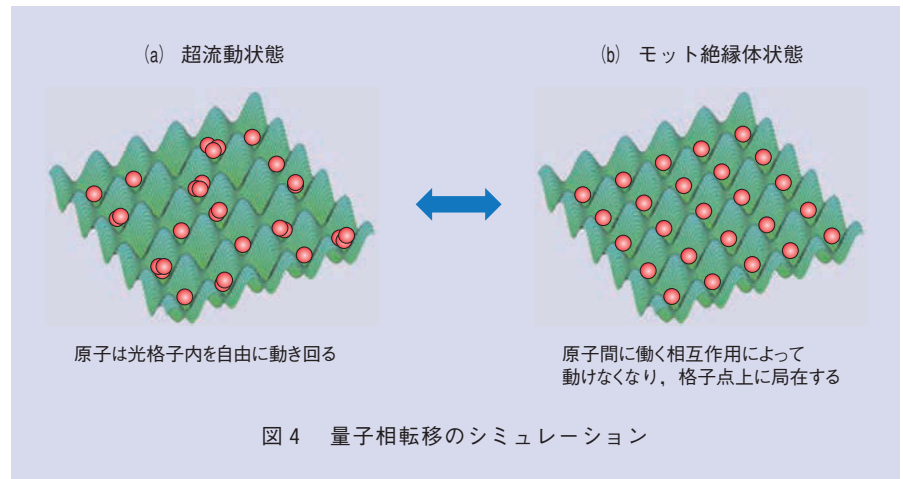
図3 性質の異なる2種類の量子力学的粒子

これまで物性の研究では、物質を幅広く変えながら、その中に見出される普遍的な性質を調べていました。しかしながら、光格子中の冷却原子気体による量子シミュレーションでは、これとは大きく異なります。原子やレーザー光を使って、単純で制御性の高い系を物質に似せて人為的に作成して、普遍的な性質を直接探求する取り組みとなります。このとき重要となるのが同位体の存在です。自然界には同じ原子でも原子核の中に含まれる中性子の数が違う同位体があります。例えば、図1のイッテルビウム原子は7種類の豊富な安定同位体を持ち、そのうちの5種類がボソンに、2種類がフェルミオンに属します。この同位体を利用すれば、ボソンとフェルミオンを自由に選択でき、1つの原子で超流動から金属や磁性、さらには超伝導等のさまざまな物性研究が可能となるのです。

量子相転移のシミュレーション

次に、光格子が大きな注目を集めるきっかけとなった、ドイツのマックス・プランク研究所で行われた研究を紹介したいと思います⁽⁴⁾。

実験はボソンである質量数が87のルビジウム (Rb) 原子の気体をナノ・ケルビンの極低温まで冷却させ、そしてその気体を光格子の中に閉じ込めて行われました。通常ボソンの場合、図4(a)に描かれているように原子気体は超流動状態にあり、原子は光格子の中を自由に動き回ることができます。しかし、これは光格子を作成するためのレーザー光の強度が弱く、光格子のポテンシャルが浅い場合のみ成り立ちます。レーザー光強度が強くと、原子間に働く相互作用が原子の状態そのものに大きな影響を与えるように



なってきます。相互作用が斥力で原子が反発し合う場合は、図4(b)に示されるように、原子は動けなくなり、格子点上に局在するようになります。物質で例えれば、これは絶縁体に転移したことに対応しています。相互作用によって生じたこの絶縁体状態は、提唱者であるネヴィル・モットの名にちなんでモット絶縁体と呼ばれています。

物質としての性質が著しく変化してしまう量子相転移は多数の粒子（原子、電子等を総称して粒子とします）が関与して引き起こされる現象で、物性研究の中心課題の1つとなっています。図4のように光格子中の冷却原子気体を用いれば、光格子のレーザー光強度を変えるだけで、超流動状態からモット絶縁体状態へ量子相転移する様子がシミュレーションできることが示されました。特に、モット絶縁体状態は高温超伝導のメカニズムとも関係が深いことから、電子と同じフェルミオンの原子気体を用いた同様の研究も行われています。一方で、図4から明らかのように、モット絶縁体では格子点上に原子がきちんと整列した状態が実現しています。この状態を利用して、原子1個1個を量子ビットとするスケラビリティに優れた量子コンピュータを光格子上で実現しようとする試みも

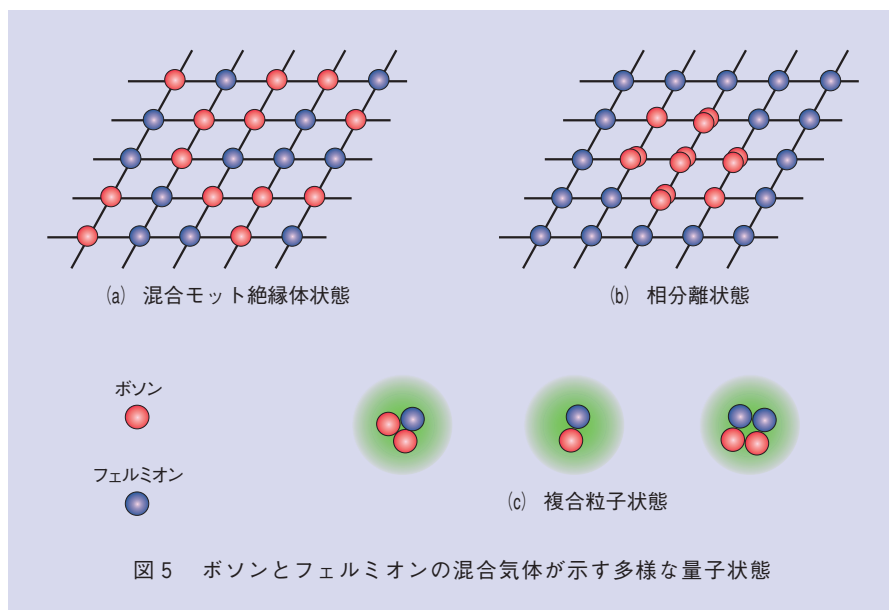
精力的に進められています。

ボソンとフェルミオンの混合気体が示す多様な量子状態

物質が示すさまざまな特性にはボソンとフェルミオンの性質の違いが深くかかわっていることは前述のとおりです。それでは、これら2種類の基本粒子を光格子の中で混ぜたら、一体どのような状態が実現するのだろうかという素朴な疑問が浮かんできます。もちろん、このような混合物は自然界には存在しません。この未解明の問いに対して、京都大学とNTTが共同で挑みました⁽³⁾。

まず、京都大学が実験を担当し、イッテルビウム原子のボソンとフェルミオンの同位体をそれぞれナノ・ケルビン領域にまで冷却し、これらを光格子の中で混合させました。ボソンとフェルミオン間に働く相互作用に注目して、光格子のポテンシャルが深くモット絶縁体に量子相転移するような条件で実験は行われています。一方NTTは理論を担当し、グッツヴィラー近似*と呼ばれる手法を有限温度に拡張したNTT

* グッツヴィラー近似：マーティン・グッツヴィラーによって提案された物性物理における重要な近似計算の手法です。格子点上での原子間に働く相互作用の影響を効率良く解析することができます。



オリジナルな理論計算を用いて、京都大学の超高精度の測定データを精密に解析しました。実験と理論を詳細に比較することによって、単純なモット絶縁体状態ではなく、光格子中でボソンとフェルミオンが複雑に絡み合った新奇な量子状態が形成されることが明らかになりました。

図5に解明された量子状態をまとめています。ボソンとフェルミオンの間に互いに反発するような斥力が働く場合、ボソンとフェルミオンの個数が同じくらいだと、図5(a)のように、ボソンとフェルミオンは避け合いながら、格子点上でそれぞれ1個ずつランダムに入り混じった状態が形成されます。これは混合モット絶縁体状態と呼ばれ、世界で初めて確認された全く新しい物質の量子状態です。フェルミオンの数がボソンの数よりも多くなると、図5(b)のように、ボソンとフェルミオンが空間的に分離した状態が実現します。これは、図3のボソンとフェルミオンの性質の違いを反映した状態です。ボソンは格子点上を複数個で存在したが、逆にフェルミオンは1個のまま孤立したがる性質を示すのです。

一方、ボソンとフェルミオンの間にお互い引き合うような引力が働く場合は、斥力の場合とは全く違った状態が実現されます。図5(c)のように、複数のボソンとフェルミオンが合わさって1つの粒子のようになった複合粒子状態が光格子の上で形成されるのです。また、この複合粒子は混合させるボソンとフェルミオンの数に応じて構成要素が異なり、何種類もの状態が実現されることも明らかになりました。

以上のように、基本粒子であるボソンとフェルミオンを光格子の中で混合させると、それぞれの量子力学的な性質の違いと粒子間に働く相互作用が相まって多様な量子状態を発現させるという物性の基本原理が量子シミュレーションの結果として得られました。

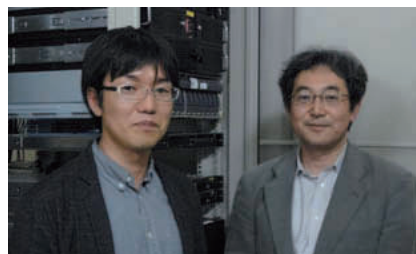
今後の展望

光格子に閉じ込められた冷却原子気体による量子シミュレーションはまだ端緒が開かれたばかりですが、物性物理から量子情報、さらには量子化学にまでと多くの研究分野を融合させながら現在急速な勢いで進展しています。今後は基礎から応用までを視野に入れ

た幅広い研究が重要になってくると思われる。理論面でも解決しなければならない問題がまだまだたくさん残っています。NTT物性科学基礎研究所では理論と実験とを組み合わせ、最終ゴールである原子を用いた量子コンピュータの実現を目指しながら、世界に先駆けた技術の開発を行っていきたいと思います。

参考文献

- (1) I. Bloch: "Ultracold quantum gases in optical lattices," *Nature Physics*, Vol.1, No.1, pp.23-30, 2005.
- (2) 向井: "原子でつくる量子コンピュータ," *NTT技術ジャーナル*, Vol.19, No.11, pp.24-27, 2007.
- (3) S. Sugawa, K. Inaba, S. Taie, R. Yamazaki, M. Yamashita, and Y. Takahashi: "Interaction and filling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions," *Nature Physics*, Vol.7, No.8, pp.642-648, 2011.
- (4) M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch, and I. Bloch: "Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms," *Nature*, Vol. 415, No.6867, pp.39-44, 2002.



(左から) 稲葉 謙介 / 山下 眞

量子力学に支配された不思議な原子の世界を解き明かそうと、理論家としてのひらめきを基に、計算用紙と鉛筆、そして数値シミュレーションを駆使して、日々奮闘しています。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部
量子光制御研究グループ
TEL 046-240-3486
FAX 046-240-3494
E-mail yamashita.m@lab.ntt.co.jp