

見られていると絶縁体が安定化する

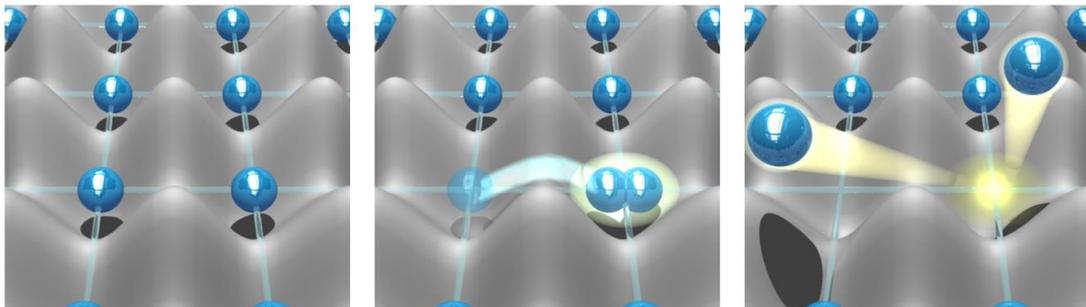
—観測による量子多体状態の制御技術を確立—

概要

富田隆文 理学研究科博士課程学生、高橋義朗 教授、段下一平 基礎物理学研究所助教らのグループは、レーザー光を組み合わせて作る光格子¹に極低温の原子気体²を導入し、周囲の環境との相互作用によるエネルギーや粒子の出入り（以下、散逸）が量子相転移³に与える影響を観測することに世界で初めて成功しました。

本研究では、「モット絶縁体—超流動相転移」と呼ばれる量子相転移に対して、制御性の高い散逸を人工的に導入し、その影響を調べました。その結果、モット絶縁体状態から超流動状態への相転移が散逸によって妨げられ、超流動状態へと変化するダイナミクスに遅れが見られることが分かりました。この現象は、環境との相互作用によって原子が常に周囲から「見られている」ことが原因で起こる量子力学的な効果によるものです。

物質中で起きる複雑な物理現象を人工的に作成した制御性の高い別のシステムを使ってシミュレートするこの実験は、量子シミュレーションと呼ばれています。本研究により、散逸を適切に導入することで量子多体状態を制御する基本的な技術が確立され、量子シミュレーション実験の範囲を散逸のある量子多体系にまで拡張することができたと言えます。論文は米国東部時間 12 月 22 日付で *Science Advances* に掲載されました。



各格子点に1つずつ整列させた原子（左）は、隣の格子点へと移動すると分子を形成し（中央）、その後直ちに崩壊して環境へと飛び出す（右）。隣の格子点への移動を常に「見られている」ために、移動ができない。

1. 背景

我々の身の回りにある金属の中では、規則的にイオンが配列した結晶構造の中を電子が動き回っています。電子に代表されるような量子力学に従う粒子が多数集まり互いに相互作用している系を量子多体系といい、このような系で起こる物理現象を解明することは物質の性質を理解する上で非常に重要です。

近年、極低温の希薄な原子気体を、レーザー光を組み合わせてできる光格子という人工的な結晶格子構造の中に閉じ込めることで、金属中の電子と類似した量子多体系を実現し、その性質を明らかにしようとする実験が注目を集めています。物質中で起きる複雑な物理現象を、人工的に作成した制御性の高い別のシステムを使

¹ レーザー光で作成された山と谷を周期的に繰り返す格子構造。原子を光格子の中に閉じ込めることで、あたかも電子が固体物質の中を動き回るような状況を作ることができる。

² レーザー冷却、蒸発冷却などを施し、真空容器中の気体を絶対温度でナノケルビン（ナノは 10 億分の 1）の温度にまで液化・固化させることなく冷却させたもの。

³ 相転移とは、氷から水への融解や水から水蒸気への気化のように物質の状態が異なる状態へと変わること。熱による変化の他に、圧力や磁場を変化させた際に量子力学的なゆらぎが相転移を引き起こす場合があり、これを量子相転移という。

ってシミュレートするこの実験は、量子シミュレーションと呼ばれています。コンピューターを用いて量子多体系の振舞いを計算するには膨大なリソースが必要であり実行不可能なケースが多い一方で、この実験では実際に量子力学に従う粒子を自在に制御することで、興味のある物質中の多体の振舞いを模倣し量子多体系の物理現象を明らかにすることができます。

光格子によって真空中に捕獲された原子集団は、まわりを取り囲む環境から孤立しているため環境の影響を受けません。一方で、実際の物質では、周囲の環境と相互作用してエネルギーや粒子の出入りがしばしば存在します。このような効果を散逸と呼びます。量子力学に従う物質で構成された系は、散逸の影響で容易にその状態が変わってしまうため、量子多体系に対して散逸がどのような影響を及ぼすかを明らかにすることは、物質中で起こる物理現象の理解や量子技術を用いたデバイスの開発にとって重要です。

散逸の影響で状態が変化するという性質は、量子力学において重要な概念である「観測」と強く関係しています。普通、我々の身の回りのものに対しては、観測をするという行為が観測対象に影響を及ぼすことはありませんが、量子力学に従う物質や光子では、観測という行為によってその量子状態が変化してしまう場合があります。例えば、量子力学的効果として代表的な「重ね合わせ状態」は、観測によって壊されて重ね合わせの要素のいずれかの状態へと変化します。量子力学において、観測という行為は注目している対象と環境との相互作用によって記述できますが、散逸もまた同様に環境との相互作用であるため、量子多体系に対する散逸の影響には、観測と関連した量子力学特有の性質が現れることが予想されます。

散逸の影響をシミュレートするターゲットとして興味深いのが量子相転移という現象です。通常は熱ゆらぎの影に隠れて見ることができない量子力学的な効果が物質全体の状態を左右するほど強く現れるという意味で、量子相転移は劇的な現象です。本研究では、散逸が制御可能な量子シミュレーターを用いて、このような巨視的な量子現象に対して「見られている」という観測の効果が大きな影響を与えうることを世界で初めて明らかにしました。

2. 研究手法・成果

本研究では、光格子中に捕捉された極低温イッテルビウム原子に対して散逸を与える特殊なレーザーを照射し、量子多体系への影響を調べました。具体的な量子相転移現象として、光格子中のボース粒子⁴系で現れる「モット絶縁体→超流動相転移」を採用しました。この転移では、光格子の各格子点が十分に深いとき、同じ格子点に同席した原子同士はお互いに反発しエネルギーが上昇するため、同席する原子の数をなるべく減らし、原子は各格子点に決まった数だけ局在した「モット絶縁体状態」と呼ばれる状態となる一方で、光格子を浅くして隣の格子点との間の障壁を下げると、原子が格子点間を動き回る「超流動状態」へと相転移します。

散逸の導入には、レーザー光を照射することで2つの原子を結合させて人工的に分子を作る、光会合という技術を用います。同じ格子点に同席した（「2重占有」になった）2つの原子は、光会合を起こすために照射するレーザー光（光会合光）を吸収して分子になり、その後の崩壊の際に放出するエネルギーによって、原子は周囲の環境へと吹き飛びます。このプロセスにより、同席した原子を選択的に除去することができます。光会合を起こす頻度は、光会合光の強度を変えて調整することができるため、散逸の大きさを制御することがで

⁴ 量子力学によって記述される粒子の種類の一つ。量子力学的な自由度を示すスピンの値が整数値をとり、複数の粒子が同一の量子状態をとることができる。

きます。

この実験では、1格子点あたり1原子が局在しているモット絶縁体状態を初期状態として、光会合光を照射しながら光格子の深さを浅くしました。その結果、光会合光による強い散逸を導入した場合には、モット絶縁体状態から超流動状態への相転移が散逸によって妨げられ、超流動状態へと変化するダイナミクスに遅れが見られることが分かりました。これは、量子ゼノ効果と呼ばれる量子力学特有の奇妙な現象によって説明することができます。量子ゼノ効果とは、観測を頻繁に行うと量子力学的なダイナミクスが抑えられる、「見られていると動けなくなる」という現象です。光格子中の原子集団は、2重占有ができていないかどうかを光会合によって常に観測されている状態にあるため、隣の格子点に原子が飛び移って同じ格子点に2つ原子が同席するプロセスが起こりにくくなり、結果的に、原子が格子点間を動き回る超流動状態へと移りにくくなってしまいます。この振舞いは、散逸を強くするほど顕著になります。

3. 波及効果、今後の予定

今回の研究により、冷却原子を用いた量子シミュレーターが扱うことのできる物理現象の範囲が、散逸のある開放量子多体系にまで拡張され、より広範囲の物理現象を実験的に研究できるようになったと言えます。また、今回の結果を定量的に記述できる理論は現在のところ存在しませんが、この量子シミュレーション結果をベンチマークとして利用することで、開放量子多体系を記述する理論が今後大きく発展すると期待されます。

実際の物質はほとんどの場合何らかの散逸の影響を受けているため、散逸の影響がある中での量子多体系の振舞いを明らかにする研究は、より現実的な量子多体系の理解につながります。またこの他にも、量子力学の原理を利用したデバイスの開発をする上での基礎的な知見を与えると予想されます。

また近年、散逸の影響をうまく利用して、興味のある特定の量子状態へと誘導する理論が提案されるなど、散逸を使った新たな量子状態制御技術の開発の機運が高まっています。今回の研究で導入した制御可能な散逸はそのような技術の一端を担う可能性を秘めています。今回は様々な種類の散逸のうち特定のもののみを取り扱っていますが、他にも光散乱や電子ビームの照射といった技術を用いて散逸を人工的に作り出す研究も存在します。量子状態制御技術の確立に向けて、これら多様な散逸の影響を明らかにしていくことは今後の重要な課題の一つです。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業(JP25220711,JP26247064, JP16H00990, JP16H01053, JP16H00801, JP16J01590)、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST JPMJCR1673)、松尾学術振興財団の支援を受けました。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system

著者 : Takafumi Tomita, Shuta Nakajima, Ippei Danshita, Yosuke Takasu, Yoshiro Takahashi

掲載誌 : *Science Advances*