

新たな対称性を持つ反強磁性状態を実現

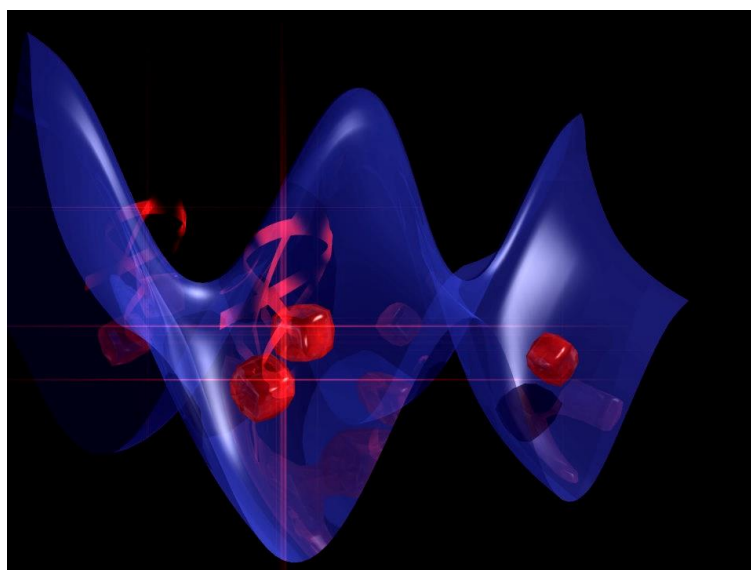
—光格子による磁性の解明へ期待—

概要

量子コンピュータの発展が日々注目を浴びるニュースになってきましたが、これと同様に重要な概念に「量子シミュレーション」があります。これは計算機のような汎用性を持たない代わりに、高温超伝導や素粒子物理など、特定の興味深い物理現象についての理論通りにふるまう、高度に制御された物質系^{*1}のことです。

京都大学大学院理学研究科 高橋義朗 教授、田家慎太郎 同助教、および米ライス大学 Kaden Hazzard 教授らの国際共同研究グループは、SU(N)ハバードモデル^{*2}と呼ばれる理論モデルの量子シミュレーションの先駆けとして、反強磁性^{*3}の相関（結晶格子の中で隣り合うスピンの向きが異なる向きに配列しようとする傾向）を観測することに成功しました。ここで「量子シミュレータ」として活躍したのは光格子^{*4}と呼ばれる、レーザー光で作った格子に原子を閉じ込めるもので、ここ十数年で量子シミュレータとして大きく発展してきたものです。本研究ではこの光格子量子シミュレータとしてこれまでにない低温を実現することにも成功しました。この研究成果が、ハバードモデルを使って長年議論されてきた磁性や高温超伝導の理解を加速し、また、これまでに現実に存在しなかった新奇な物質の状態の実現に近づく重要な一歩になることが期待されます。

本成果は、2022年9月1日（現地時刻）に英国の国際学術誌「Nature Physics」にオンライン掲載されました。



光格子のイメージ図。青はレーザー光による格子パターン、赤は相互作用する原子を表す。

1. 背景

量子コンピュータと量子シミュレータ

近年量子コンピュータの発展が著しく、一般向けのニュースになることも多くなってきました。量子コンピュータとは、コンピュータが扱う情報である0と1のビット（情報量の最小単位）を「量子ビット」に置き換えることで、ある種の問題を従来のコンピュータより早く計算できるものです。このように、一般的なコンピュータと同じ汎用性を持つ量子コンピュータに対し、物理学の特定の問題の解決に特化したものが量子シミュレータです。物理学では興味深い現象を理解するために、一定の仮説の下に数学的な理論モデルを立てて研究が行われますが、そのモデルは多くの場合現在の計算機でも容易に解けないものです。その代わりに、モデルをそっくりそのまま再現する現実の物質系を用意して実験することで理解しようとするものが量子シミュレータです。量子コンピュータで高速に解ける問題は限られており、量子コンピュータと量子シミュレータは互いに補い合って発展することが期待されています。

量子磁性の問題とSU(N)ハバードモデル

磁石がなぜ鉄を引き付けるのか？という大昔からの問いに始まる磁性の問題は、今でも物性物理学の主要なテーマの一つとして活発に研究されています。磁性の理解には本質的に量子力学が必要であり、無数の粒子が相互作用する「多体問題」でもあることから非常に難解であることが知られています。ハバードモデルと呼ばれる理論モデルはこの磁性だけでなく、実用性の観点からも関心の的である高温超伝導の問題も内包する重要なモデルとして長年研究されてきました。磁性や超伝導の発現に不可欠な役割を担うのが電子の持つスピンと呼ばれる自由度です。これは通常SU(2)と呼ばれる対称性を持っていて、最も単純な表現は図1の矢印の↑、↓や、コインの表裏に例えられる2つの状態を持つものです。格子に並んだスピンの向きがどんな条件でどんなパターンになるか、を解明するのが磁性の問題と言えます。ここでスピンの取れる状態の数を任意のN個に増やしたらどうなるか？という発想から生まれたのがSU(N)ハバードモデルです。本研究ではSU(6)対称なモデルを扱っており、これはさながら格子上に並んだサイコロの出目のパターンを考えることと似ています。サイコロの面の数が変わることによってパターンがどうなるか、より一般性の高い視点から物理を眺めることで深い理解につながることはこれまでの物理学の発展の歴史でも見られてきたことです。



図1 SU(2)とSU(6)スピン系のイメージ図

ハバードモデルにおいて、格子点一つあたり一個の電子が存在するような密度では低温で反強磁性の状態が実現することが知られています。この状態は密度を少し増減させることで高温超伝導が現れるなど、さらに興味深い状態の母体となっているため、反強磁性の兆候をとらえることは極めて重要です。本研究ではSU(N)ハバードモデルとして初めて、反強磁性を確認することを目指して実験を行いました。

2. 研究手法・成果

本研究では、量子シミュレータとして光格子を用いました。光格子は、レーザー光の干渉が作る規則正しいパターンに原子を閉じ込めることができます。光格子は多くの原子を捕獲でき、不純物が無く制御性に優れて

いることから量子シミュレータの有力候補として以前から注目されていました。光格子はハバードモデルを正確に再現することから、磁性や高温超伝導の量子シミュレータを目指して活発に研究がおこなわれています。特筆すべきこととして、光格子に導入する原子を適切に選ぶことで SU(N)対称なハバードモデルも実現することができます。本研究では、イッテルビウム(Yb)原子の同位体の一つ ^{173}Yb を用いることで SU(6)ハバードモデルを実現しています。

光格子は一般的な固体物質と全く異なる物理系であるため、状態を観測するために独特な手法が用いられます。磁性を調べる第一歩は隣り合うスピンのどのような状態になっているかを知ることです（最近接相関）。同じ状態のスピンの隣に来やすいことを強磁性的、異なるスピンの隣りに来やすいことを反強磁性的な相関があるといいます。前者はスピン 3 重項、後者は 1 重項と呼ばれる量子力学的な状態と結びついています。光が作る仮想的な磁場によってこの二つの状態間を振動させる手法でどちらの傾向が強いかを調べることができます。我々は 1 次元、2 次元、3 次元の結晶格子に対してこの測定を行い、SU(6)対称なハバードモデルに従う系で初めて強い反強磁性的な相関を観測することに成功しました。（図 2）

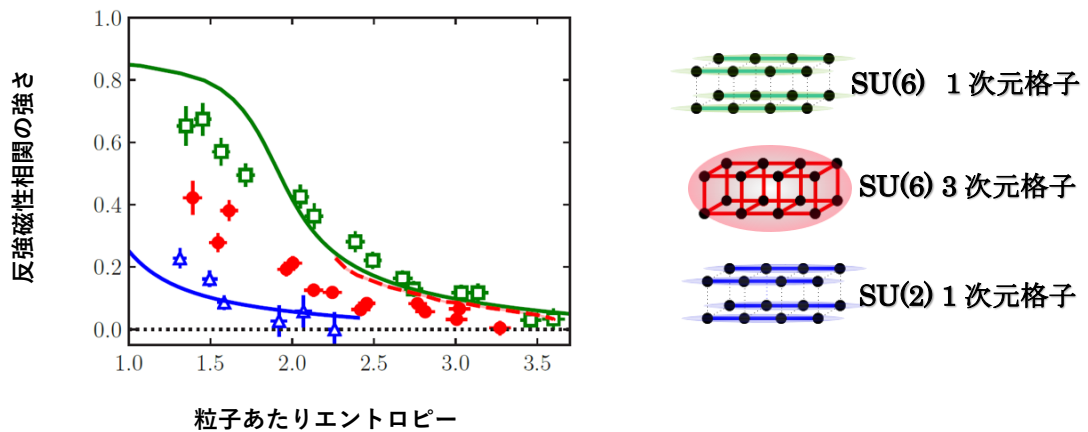


図 2 光格子中で測定された SU(N)スピン相関。

グラフの左ほど低温であり、より反強磁性的な相関が発達していることが分かる。

3. 波及効果、今後の予定

SU(N)ハバードモデルは現実の物質で実現することが稀であることから純理論的な存在とみなされてきた面もありますが、SU(N)磁性の量子シミュレーションとして確かな成果が得られたことから、理論・実験の両面において研究の活発化が進むと思われます。これまでにない新たな物質の状態について理解が進むこと、そして、得られた知見がなじみの深い SU(2)ハバードモデルの研究にもフィードバックされることを期待しています。

また現在、光格子量子シミュレータに共通する課題として、本当に興味深い物理現象が見られる極低温までの冷却が難しいという点が挙げられます。本研究では、理論計算との比較によってこれまでの光格子ハバードモデルで報告されている温度よりさらに低温が得られていることが示されています。このことから、SU(N)ハバードモデルだけでなく、光格子による量子シミュレーション全体において大きな進歩が得られたと考えています。

これらの成果を踏まえて、今後更なる低温で実現される秩序状態がどのようなものか、実験的に解明することを目指して研究を進める予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR1673)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP (JPMXS0118069021)、内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)、日本学術振興会科学研究費助成事業(JP17H06138, JP18H05405, JP18H05228, No.17J00486)、Welch Foundation、National Science Foundation、および U.S. Department of Energy Office of Science の助成を受けて行われました。

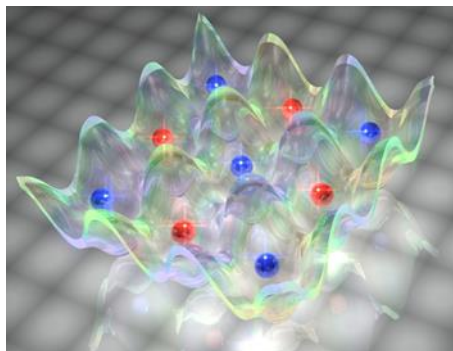
<用語解説>

※1 **物質系**：量子シミュレーションに用いられるものとしては、光格子の他にイオン配列、リドベルグ原子などが挙げられます。

※2 **ハバードモデル**：固体中の電子の振る舞いを調べるためにジョン・ハバードらが提唱した数学モデル。粒子は結晶格子中の隣り合う格子点間を運動でき、同じ格子点に複数の粒子がある時にのみ相互作用を感じます。電子系の最低限の要素を取り出した単純なモデルでありながら解くことは難しく、運動エネルギーと相互作用エネルギーの競合によって多様な物質の状態を再現します。

※3 **反強磁性**：固体の磁性は、磁気モーメントと呼ばれる磁石の構成要素が結晶中でどう配列するかによって決まっています。すべての磁気モーメントが同じ方向に揃った状態が強磁性であり、鉄のように磁石に引き付けられる性質を持ちます。一方で、隣り合う磁気モーメントが反対の向きに揃って全体として打ち消しあっている状態が反強磁性です。ここで考えている状況ではスピンの磁気モーメントを担っています。

※4 **光格子**：対向するレーザー光の干渉によって、電場の振幅が強めあう場所と打ち消しあう場所が規則正しく並んだ定在波ができます。極低温に冷やされた原子をその種類に応じてどちらかの場所に捕獲することができ、これを光格子と言います。光格子に原子集団を導入した系は多くの点で金属や半導体などの固体と似通っており、人工の固体結晶として物性物理の研究対象になっています。多数のレーザー組み合わせることで様々な格子構造を作ることができます。



光格子中の原子のイメージ図

<研究者のコメント>

光格子 SU(N)量子シミュレータは著者らの研究グループで10年来に渡り世界に先駆けて研究を続けてきたものです。今回の成果で、開発の準備段階から物理に迫る第一歩が踏み出せたと思っています。今後の発展にご期待頂ければ幸いです。(田家)

<論文タイトルと著者>

タイトル： Observation of antiferromagnetic correlations in an ultracold SU(N) Hubbard model (極低温 SU(N)ハバードモデルにおける反強磁性相関の観測)

著者： Shintaro Taie, Eduardo Ibarra-García-Padilla, Naoki Nishizawa, Yosuke Takasu, Yoshihito Kuno, Hao-Tian Wei, Richard T. Scalettar, Kaden R. A. Hazzard, Yoshiro Takahashi

掲載誌： Nature Physics DOI : 10.1038/s41567-022-01725-6