

量子幾何学によるスピンを持つ超伝導の予言

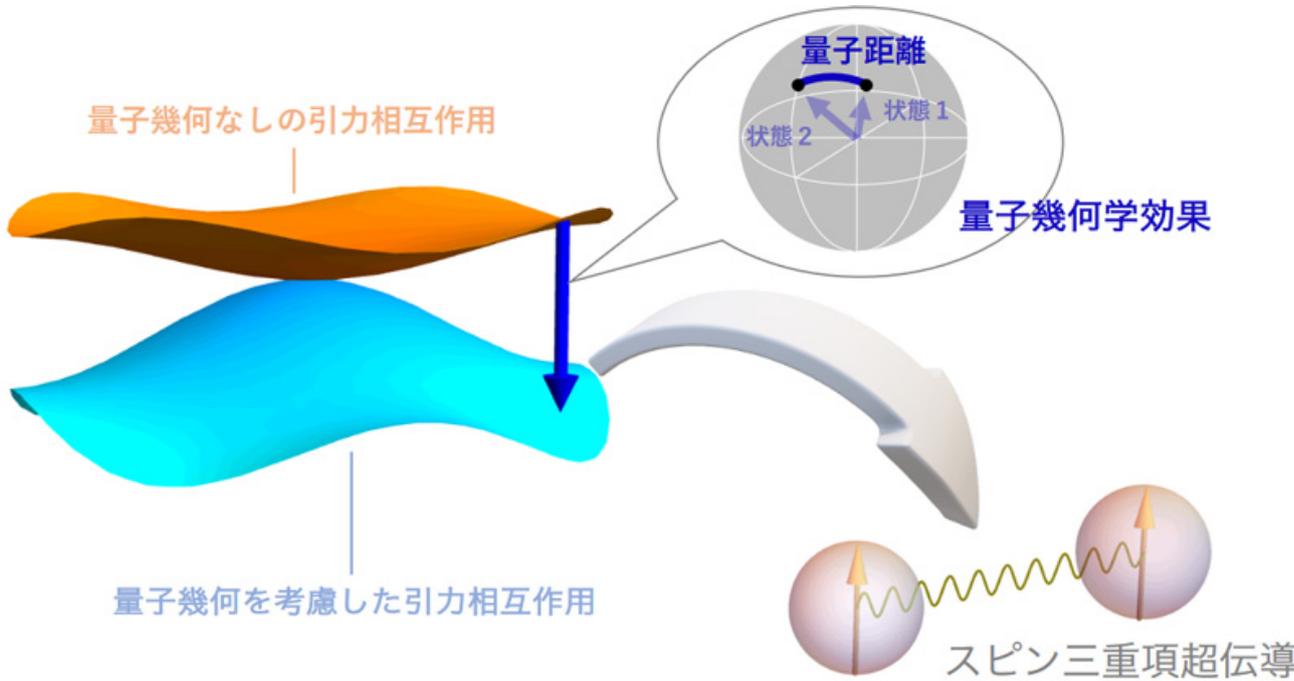
—スピン三重項超伝導の探索に向けた指導原理—

概要

京都大学大学院理学研究科の北村泰晟 博士課程学生、大同暁人 同助教、柳瀬陽一 同教授らの研究グループは、物質が持つ量子幾何学¹効果に起因してスピン三重項超伝導が発現することを明らかにしました。

スピン三重項超伝導は超伝導の標準理論である BCS 理論²では説明できない非従来型超伝導であり、高磁場領域で安定である、量子コンピュータへの応用が可能であるなど、多岐にわたる特徴的な性質を示すことが知られています。しかし、魅力的な性質を持つ反面、スピン三重項超伝導の候補物質は非常に少ないため、新たな候補物質の探索が求められています。本研究では、物質の量子幾何学効果が誘起する引力相互作用³がスピン三重項超伝導を安定化させる、新規な超伝導の発現機構を明らかにしました。また、この発現機構が働く物質が持つべき条件を特定し、スピン三重項超伝導体探索のための指針を提案しました。これにより、新たなスピン三重項超伝導体の発見が期待されます。

本研究成果は、2024年1月18日(日本時間)に米国物理学会が発行する科学雑誌「*Physical Review Letters*」に掲載されました。



1. 背景

超伝導とは、電気抵抗なしに電流を流すことができる現象です。電気抵抗がゼロであるため、とても強い電流を流すことができます。その性質を利用することで、強い磁場を発生する電磁石として、MRI やリニアモーターカーなどに応用されています。しかしながら、従来の BCS 理論^{注 2)}で説明される超伝導は多くの場合 10 ケルビン程度の低温でのみ発現し、また、低磁場でのみ安定であるなど、応用上様々な問題を抱えています。これに対して近年では BCS 理論の枠組みには収まらない非従来型超伝導が注目を集めています。スピン三重項超伝導はその一つであり BCS 型超伝導に比べて高い磁場でも安定であることが特徴的な超伝導現象です。超伝導体が電磁石として活用されることを思い出せば、磁場に安定なスピン三重項超伝導体を詳しく調べることは、実用上重要な課題だと考えられます。また、一部のスピン三重項超伝導体は量子コンピューター⁴ への応用が可能です。このように未知の超伝導現象を実現する舞台であるため、スピン三重項超伝導に対する研究が盛んに行われています。

スピン三重項超伝導体は、特徴的な性質に加えてその発現メカニズムも BCS 型超伝導とは大きく異なることが知られています。超伝導の発現メカニズムには、それぞれの舞台となる物質の磁氣的性質が重要な役割を担っています。BCS 超伝導は磁氣的性質を持たない物質で発現する一方、スピン三重項超伝導は磁場を発生する強磁性体⁵、つまり磁石のような物質で発現します。しかしながら、BCS 型超伝導は多くの物質で発現する一方、スピン三重項超伝導の候補物質はウラン化合物など僅かな物質に限られています。このことは、例えば鉄は磁石になるが銅は磁石にならないように、特定の物質のみが磁石となることを反映しているようにも捉えられます。

世の中には 100 を超える元素が存在し、それらを組み合わせることができる化合物は膨大な数に上ります。そう考えると、未だ発見されていない磁石、引いてはスピン三重項超伝導体が世の中にはまだまだ多く眠っていることが期待されます。しかしながら、現実には膨大な数の化合物が存在しますので、その中から希少なスピン三重項超伝導体を偶然実験的に発見することは難しく、これまでの数例の報告があるのみです。また、無数の化合物全てを探索することはできません。したがって、スピン三重項超伝導探索のための指導原理を、理論的に提案することが非常に重要な課題となっています。

2. 研究手法・成果

本研究は、新たなスピン三重項超伝導体を発見するための指針を示すことを目標として始めました。実際には、スピン三重項超伝導は磁石そのものではなく「磁石になる可能性を秘めている物質」で発現すると考えられています。これは例えば圧力をかけるなどわずかな刺激を与えると磁石になる、ということで、そのような性質を「強磁性揺らぎを示す」と表現します。ウラン化合物がその例ですが、磁石と同様に強磁性揺らぎを示す物質が少ないことが、スピン三重項超伝導体の探索において根本的な問題となります。したがって、強磁性揺らぎを示す物質に共通の性質を見つけることにより、物質探索のための指針が得られます。

強磁性揺らぎを示す物質に共通する性質について、電子が空間のどの方向にも自由に動ける三次元物質については経験則が存在します。しかしながら、この経験則だけでは不十分な場合が多く、さらに、二次元空間のみで電子が自由に動けるような物質(二次元物質)には適用できないことが知られています。またこの経験則の解析は、原子一つにつき動ける電子が一つだと見なせる物質(単一バンド系)を念頭において行われてきました。一方、現実の化合物では、原子一つあたり動ける電子が複数ある状況(複数バンド系)も多いです。そこで本研究では、複数バンド系のような一般的な系で成り立つ、強磁性揺らぎ発現のための判定条件を導出しました。

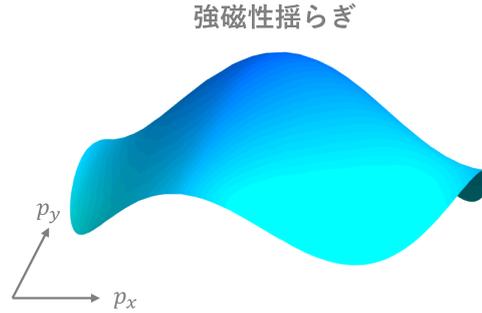


図 1：強磁性揺らぎのイメージ図。スピンの揺らぎを運動量(p_x, p_y)に対して図示したもの。強磁性揺らぎは図のように運動量 0 で極大となる。

すると、複数バンド系においてはこの判定条件に対して量子幾何学^{注 1)}からの寄与が存在することが明らかになりました。その寄与を詳しく解析することで、量子幾何学が強く強磁性を誘起する条件が明らかになりました。面白いことに、この条件は二次元物質においても成り立ちます。そこで我々は、複数バンドを持つ二次元系の典型例であり冷却原子系で実現された拡張リーブ格子において、判定条件と磁性の揺らぎを計算しました。その結果から、量子幾何学により強磁性揺らぎが誘起されることが確かめられ、さらに、スピン三重項超伝導が安定化することが明らかになりました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究により、量子幾何学効果に起因して強磁性揺らぎが発現し、さらにはスピン三重項超伝導が起こることが明らかになりました。私たちが示したスピン三重項超伝導の新しい発現メカニズムは単純かつ普遍的であるため、未発見のスピン三重項超伝導体が世の中に数多く存在することが示唆されます。また、本研究では強磁性が発現するためのシンプルな条件を明らかにすることが出来ました。この点は、磁性体を用いたデバイス開発等の研究にも役立つことが期待できます。近年では、実験技術の発達により、理論的に提案あるいは設計された様々な電子状態を実現することができるようになりました。このような実験技術と本研究で提案した指導原理を組み合わせることによりスピン三重項超伝導の探索と発見が期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は JSPS 科学研究費補助金（課題番号：JP18H01178, JP18H05227, JP20H05159, JP21K13880, JP21K18145, JP22H01181, JP22H04476, JP22H04933, JP22J22520）および WISE program, MEXT の支援を受けて行われました。

<用語解説>

注 1) 量子幾何学：物質中にある電子の状態は、エネルギーとそのエネルギーを持つ状態を指定するブロッホ波動関数により記述されます。これら二つの特徴量は電子の運動量に依存します。なかでもブロッホ波動関数の運動量空間での幾何学的性質を表す理論を量子幾何学と呼びます。近年の物性物理学では、量子幾何学を用いて物質の諸性質を解明する研究が進んでいます。

注2) BCS 理論：自然界にある多くの超伝導体の発現機構を説明する、超伝導における最も基礎的な理論を、提案者の名前の頭文字にちなんで BCS 理論と呼びます。BCS 理論は、磁性を示さないような物質を 10 ケルビン以下程度まで冷やすことで発現する超伝導現象を見事に説明します。一方、近年では、BCS 理論とは異なるメカニズムから発生する非従来型超伝導が注目を集めています。これらは主に磁性体関連物質などで発現し、BCS 理論では説明できない非自明な現象を示します。

注3) 引力相互作用：超伝導は、2つの電子の間に引き寄せ合う力が働くことで発現する現象です。その起源となる、電子間に働く力のことを（対形成）引力相互作用と呼びます。

注4) 量子コンピューター：量子力学の原理に基づき演算を行うコンピューターの総称です。量子化学計算など様々な応用が期待されています。

注5) 強磁性体：物質の磁性は、スピンと呼ばれる電子が持つ自由度により決定されます。物質中には多数の電子が存在しますが、通常は各々の電子のスピンが自由な方向を向いており、そのような物質を常磁性体と呼びます。一方、多くの電子のスピンが規則的に決まった方向を向いている物質もあり、これを磁性体と呼びます。その中でも、スピンの同じ方向を向いている物質を強磁性体と呼び、これは磁石となります。

<研究者のコメント>

磁石は方位磁針に使われるように、古くから常に身の回りに存在します。一方で、誰もが自然に持つ「鉄はなぜ磁石になるのか」という疑問は、量子力学を用いなければ答えることはできません。そして、そのような単純な疑問を解き明かしていくと、それは意外なことにスピン三重項超伝導の理解に繋がっています。幼い頃にいただいた疑問が最先端の研究に辿り着くのですから、なんとなく格好の良いことをしていると、嬉しくなります。（北村泰晟）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Spin-triplet superconductivity from quantum-geometry-induced ferromagnetic fluctuation（量子幾何誘起強磁性によるスピン三重項超伝導）

著者：Taisei Kitamura, Akito Daido, and Youichi Yanase

掲載誌：Physical Review Letters DOI：10.1103/PhysRevLett.132.036001