

2014年10月31日

「ボース・アインシュタイン凝縮に最も近い超伝導状態」を発見

【ポイント】

- ・今まで冷却原子でのみ実現していたボース・アインシュタイン凝縮に最も近い超伝導状態が実在の物質で実現していることを示した
- ・強磁場中で未知の超伝導状態が現れることを発見
- ・新しい量子状態の研究の舞台を提供

【発表の概要】

笠原成 理学研究科助教、綿重達哉 同大学院生(日本学術振興会特別研究員)、松田祐司 同教授、芝内孝禎 同客員教授(東京大学教授)らの研究グループは、花栗哲郎 理化学研究所創発物性計測研究チームリーダー、宇治進也 物質・材料研究機構 ユニット長、ドイツ・カールスルーエ工科大学の研究者らと共同で、鉄を含んだ金属間化合物において「ボース・アインシュタイン凝縮に最も近い超伝導状態」が実現し、更にこの物質が強磁場中で別の超伝導状態に移り変わることを発見しました。今回発見された新しい超伝導では、これまでに前例のない状態が実現されている可能性があり、今後、物質の示す新しい量子状態として研究が進むことが期待されます。

この研究成果は、米国科学誌「米国科学アカデミー紀要 (Proceeding of the National Academy of Sciences USA (PNAS))」のオンライン速報版 (Early Edition) に掲載されます。

【研究の背景と経緯】

金属中の伝導電子は、通常、数万度という高い運動エネルギーを持って飛び回っています。一方、超伝導は、2つの電子の間に引力が働き、電子のペアが形成されることによって生じます。通常の超伝導物質では、電子の運動エネルギーは、ペアを作ろうとするエネルギーよりも圧倒的に(1000倍以上)大きいことが知られています(図 1A)。これは、バーディーン、クーパー、シュリーファーの3人が考案した超伝導の標準的な理論(BCS 理論)(※1)の前提にもなっており、この理論をもとに超伝導の種々の性質が説明されています。逆に、電子がペアを作るエネルギーが強くなった極限では、強く束縛された分子状のペアが作られ、ペア同士は互いに弱く相互作用した状態で超流動や超伝導を起こすことが理論的に示唆されています(図 1C)。この現象はボース・アインシュタイン凝縮(※2)と呼ばれています。この2つの中間にあたるクロスオーバー領域と呼ばれる状態では、ペアの大きさと電子の平均間隔が同程度になっています(図 1B)。この状態ではペア同士の相互作用が非常に強くなると考えられ、非自明な量子状態

が実現される可能性があることから興味を持たれています。しかし、これまでの実際の超伝導物質では、ボース・アインシュタイン凝縮に近いような状態は発見されておらず、また、そのような超伝導でどのようなことが起こるかも分かっていませんでした。

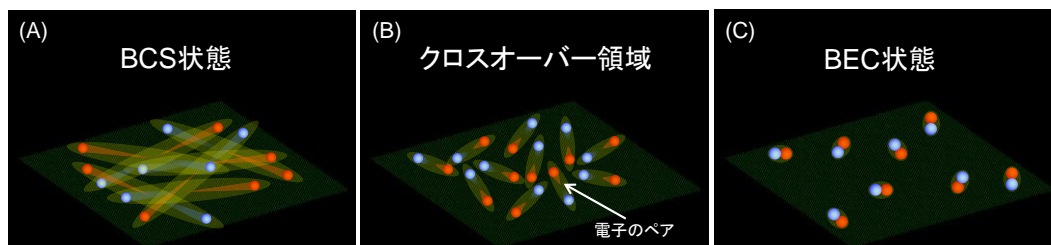


図1. 電子の運動エネルギーと電子がペアを組むためのエネルギーの強さによって、BCS状態から BEC 状態へと移り変わっていく様子。(A) BCS 状態。多数の電子のペアが重なり合うほどペアが大きく広がっている。(B) クロスオーバー領域。BCS 状態と BEC 状態の中間状態に位置し、ペアの大きさと電子の平均間隔が同程度になっている。この状態では電子のペア同士が強く相関しあっている。(C) BEC 状態。強く結合した電子ペアが形成される。

【研究成果の内容と意義】

今回、研究チームは、超伝導転移温度が約 10 ケルビン（約マイナス 263 度）の鉄を含んだ金属間化合物 FeSe を研究対象とした実験を行ないました。これまでこの物質では純良な結晶が得られず、過去の研究では、電子状態や超伝導状態の研究があまり進んでいませんでした。今回、研究チームでは新しく開発された純良な結晶を用いて、走査型トンネル顕微鏡法／分光法(※3)をはじめとした様々な実験手法により、この物質の電子状態を調べることに成功しました。その結果、電子の運動エネルギーとペアを形成するエネルギーがほぼ同じであり、この物質の超伝導状態がこれまでのどの物質よりもボース・アインシュタイン凝縮に近く、クロスオーバー領域での超伝導が実現していることを発見しました。更に、研究チームは、このような異常な超伝導において、低温・強磁場中での性質を調べ、電子の運動エネルギーと、ペアを作ろうとするエネルギー、更に磁場のエネルギーが同程度になることで、三つのエネルギーの競合が起こり、新しい超伝導状態が実現することを発見しました（図2）。

今回発見された超伝導状態は、これまでの物質で実現されたことのない量子状態であると考えられ、この状態を詳細に調べることにより、新しい概念が得られると期待されます。

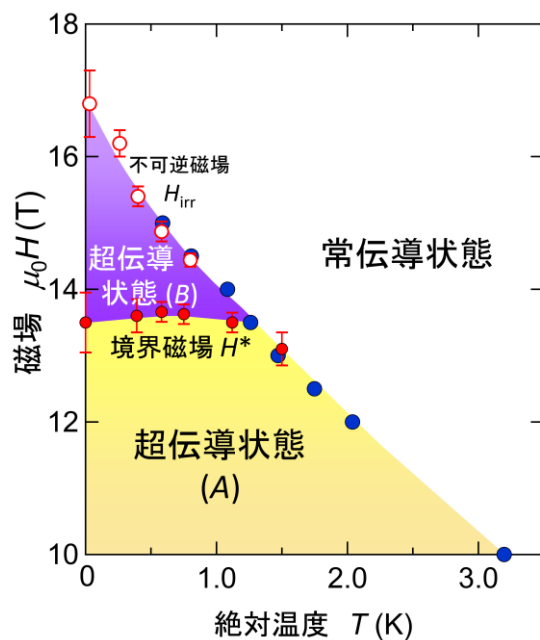


図2. 鉄を含む化合物 FeSe の低温・強磁場中での状態図。強磁場をかけると、超伝導状態(A)から未知の超伝導状態(B)へ移り変わる。

【発表雑誌】

書誌情報：米国科学誌 Proceeding of the National Academy of Sciences USA (PNAS) Early Edition November 3, 2014.

論文タイトル：「Field-induced superconducting phase of FeSe in the BCS-BEC cross-over」

著者：Shigeru Kasahara, Tatsuya Watashige, Tetsuo Hanaguri, Yuhki Kohsaka, Takuya Yamashita, Yusuke Shimoyama, Yuta Mizukami, Ryota Endo, Hiroaki Ikeda Kazushi Aoyama, Taichi Terashima, Shinya Uji, Thomas Wolf, Hilbert von Löhneysen, Takasada Shibauchi, and Yuji Matsuda

【用語解説】

(※1) 「バーディーン・クーパー・シュリーファー(BCS)理論」

アメリカの科学者3人により確立された金属系超伝導の微視的理論。3人は、1957年に2つの電子（フェルミ粒子）がペア（クーパー対）を組むことで、金属状態とは異なる、多数の電子対が量子力学的に同一の凝縮状態となることを提唱した。電子のペア化の起源は、格子振動を媒介とした引力相互作用によりエネルギー利得を得ることであり、超伝導エネルギーは電子の持つ運動エネルギー（フェルミエネルギー）に比べはるかに小さいことを仮定しているため、「弱結合」の理論とよばれる。

(※2) 「ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)」

多数のボース粒子が同一の量子力学的な状態をとることで現れる、物質の状態の一つ。1925年、ボースとアインシュタインにより理論的に予言され、理想的なボース気体によるボース・アインシュタイン凝縮(BEC)はレーザー冷却の技術により1995年に発見されている。超伝導状態は、フェルミ粒子である電子がペアを組み、2電子対を疑似的にボース粒子とみなすことにより、BECと類似の状態と考えることができる。このBEC型超伝導では、超伝導のエネルギーは電子の持つ運動エネルギーと同程度になるため、「強結合」の理論とよばれ、冷却原子系の研究分野で主に研究がなされてきた。

(※3) 「走査型トンネル顕微鏡法／分光法」

鋭くとがった金属探針を試料表面に近づけ、探針と試料間に電圧をかけたときに流れる量子力学的なトンネル電流の空間分布と電圧依存性を測定することで、試料表面の凹凸や電子状態の分布を原子レベルの空間分解能で調べることができる方法。