

重い電子系 F F L O 超伝導の正体

1957年に Bardeen, Cooper, Schrieffer の3人が発表した B C S 理論は電気抵抗の消失やマイスナー効果といった超伝導現象をほぼ完全に説明した。そして、現在でも超伝導の標準理論として確固たる地位を築いている。B C S 理論によると、超伝導現象の本質は2つの電子がクーパーペアを組んで対凝縮することにある。

B C S 理論ではクーパーペアが運動量を持たないことが仮定されている。そして、それはこれまでに発見されたほぼ全ての超伝導物質で正しいと考えられている。一方、Fulde と Ferrell、そして Larkin と Ovchinnikov は40年以上前に有限の運動量を持つクーパーペアによる超伝導を考察した。このような超伝導は、彼らの名前の頭文字をとって F F L O 超伝導と呼ばれ、強い磁場を超伝導体にかけることで実現できると考えられてきた。しかし、実際には、多くの研究者の長年にわたる探索も F F L O 超伝導を発見するには至らなかった。

そのような状況の中で、重い電子系超伝導体である CeCoIn_5 の高磁場低温領域に新しい超伝導相が発見された(2003年)ことは衝撃的なインパクトを与えた。なぜなら、その新しい超伝導相の現れ方が F F L O 超伝導に対する理論的予言とよく似ていたからである。F F L O 超伝導がついに発見されたのではないかと考えられたのである。その後、幾つかの有機超伝導体においても F F L O 超伝導の報告があり、超伝導研究における新たな潮流を生み出している。また、F F L O 超伝導あるいは F F L O 超流動の可能性は固体物理の世界に留まらない。レーザー冷却原子気体や高密度クォーク物質といった全くエネルギースケールが異なる分野でもその研究が精力的に進められている。

このように、光、レーザー、原子分子から固体物理、原子核物理、宇宙物理といった幅広い分野の研究対象となった F F L O 超伝導だが、その端緒となった重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 の研究の進展はそれほど単純なものではなかった。なぜなら、核磁気共鳴や中性子散乱の実験から、F F L O 超伝導相と考えられた状態の中で反強磁性秩序が発見されたからである。通常の F F L O 超伝導には磁性が存在しないので、これは少なくとも単純な F F L O 超伝導状態ではないことを意味する。一方で、この新しい超伝導相を通常の反強磁性と超伝導の共存相と見なすことにも否定的な実験結果が存在し、その正体について研究者の頭を悩ませることになった。

新潟大学の柳瀬陽一氏はスイス連邦工科大学の Manfred Sigrist 氏と共同で、この新しい超伝

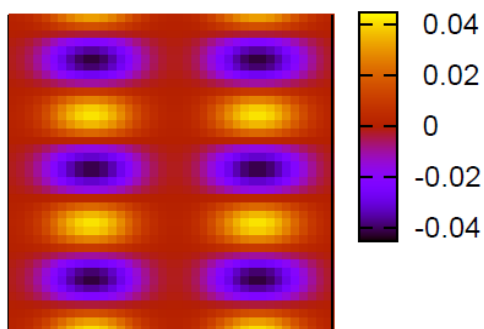


図 1. F F L O 超伝導状態で生じる反強磁性モーメントの空間依存性。 CeCoIn_5 の2次元面を示している。磁場と垂直方向に走る非整合型反強磁性は中性子散乱の結果と一致した。

導相の正体を探るべく理論研究を行った。重い電子系の典型例でもある CeCoIn_5 は強相関電子系の一種であり、強い反強磁性の揺らぎが観測されている。そのような状況下で強い磁場をかけることから生じる超伝導相をボゴリウボフ - ド・ジャン方程式を解くことによって調べた結果、F F L O 超伝導が引き金となって反強磁性秩序が生じていることが分かった。つまり、2003 年に発見された CeCoIn_5 の新しい超伝導相は正しく F F L O 超伝導であり、その中で反強磁性秩序が生じたものと考えれば、実験結果を矛盾なく理解できることが示されたのである。F F L O 超伝導には大きく分けて 2 つの状態 (Fulde-Ferrel 状態と Larkin-Ovchinnikov 状態) があるが、このような反強磁性秩序は Larkin-Ovchinnikov 状態に特有の現象であることもこの研究から分かった。これらの研究成果は、日本物理学会が発行する英文誌「Journal of Physical Society of Japan」の 2009 年 11 月号に掲載される。

図 1 に F F L O 超伝導状態で生じる反強磁性モーメントの空間依存性を計算した結果を示す。このような空間構造は中性子散乱の実験から判明した性質とよく一致した。また、 CeCoIn_5 に磁場をかけていくと、超伝導の消失と同時に反強磁性も消失する。このような性質は他の重い電子系で見られる反強磁性超伝導とは全く異なるものだが、本研究で得られた磁場温度相図はそのような磁場依存性をよく再現した。この磁場依存性は、F F L O 超伝導が引き金となって起こる反強磁性秩序の特徴をよく反映している。

これらのことから、超伝導の標準理論である B C S 理論の枠組みを越えた「有限の運動量を持つクーパーペア」の存在が確かなものとなりつつある。また、そのような超伝導の下で起こる奇妙な磁性の存在が明らかとなった。本研究では、このような磁性が起らない「純粋な F F L O 超伝導」を実現する方法も提案されており、その発見に向けた研究も動き出している。

以上のように、本研究は、重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 が新しい量子凝縮相である F F L O 超伝導の舞台となっていることを示し、さらに、強相関電子系における磁性と超伝導の新しい関係性を理論的に明らかにしたものとして、多くの研究者の注目を集めている。また既に述べたように、F F L O 超伝導・超流動の可能性は固体物理に限らない。レーザー冷却原子気体等の新しい系においても実現に近づいていることが異なる分野間の交流を促進しており、理論・実験の両面において幅広い視点からの研究の発展が期待されている。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 11, p. 114715

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/114715> (11 月 10 日公開)

< 情報提供: 柳瀬陽一 (新潟大学) >