

軌道秩序状態で起こる新しい超伝導の発見

1. 発表者：

酒井 明人（東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程学生）

久我 健太郎（東京大学物性研究所 特任研究員）

中辻 知（東京大学物性研究所 准教授）

2. 発表概要：

超伝導は量子性が巨視的に現れる最も顕著な現象であり、またその応用の可能性から、数々の研究がなされてきました。なかでも、電子間の相関が強い金属の代表である、重い電子系と呼ばれる金属間化合物において、さまざまな新しいタイプの超伝導が見出されてきました。一方、電子が持つ自由度の一つである「軌道」がスピンのように固体中でそろそろ「軌道秩序」という状態が知られています。スピンの代わりにこの軌道を使った場合、重い電子超伝導が現れるのか、実は全く理解されておらず未開の領域です。

今回、東京大学物性研究所(所長 家 泰弘)の中辻知准教授らの研究グループは、金属間化合物 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ が、軌道秩序相において超伝導を示すことを明らかにしました。さらに、重い電子がこの超伝導を形成している可能性が高いこともわかってきました。軌道自由度しか持たない状態での重い電子超伝導は初めての例で、軌道の自由度による新しい超伝導機構の可能性を示しています。

3. 発表内容：

超伝導は最も顕著な巨視的量子現象のひとつであり、その基礎的な重要性からさまざまな新しい超伝導体を探索する試みがなされてきました。また、電流を損失なく伝搬するという特性や巨視的量子性を生かして、送電線、MRI、リニアモーターカー、量子コンピュータなど、様々な応用の観点からも注目されています。しかし物質が超伝導になる温度(超伝導転移温度)は一般に低く、実用化のためにより高い超伝導転移温度を持つ物質を探す研究がなされてきました。その一方で、強い電子間相互作用を持つ金属の代表である「重い電子系」と呼ばれる金属間化合物の研究から、磁気秩序(注 1)の量子臨界点(注 2)の近傍でスピン(注 3)のゆらぎにより重い電子超伝導と呼ばれる新しいタイプの超伝導が発現することがわかってきました。このような重い電子系化合物(注 4)での磁気量子臨界性とそれに付随した重い電子超伝導については、これまでさまざまな例の研究から、多くの知見が得られてきました。

ところで電子は磁性を司る「スピン」の他に、「軌道」と呼ばれる自由度(注 3)を持っています。スピンの代わりにこの軌道を使った場合に重い電子超伝導が現れるのか、また、量子臨界現象が実現できるのかは、実は全く理解されておらず未開の領域です。研究グループは希土類元素 Pr(プラセオジウム)を含む $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ に着目し、単結晶育成と低温物性測定を行ってきました。これまでに研究グループは、この物質が低温で「スピン」をもち「軌道」(注 3)の自由度の量子効果を研究することが可能な系であることを示しました。またその全ての軌道が同じ向きに整列する強軌道秩序を 2 K (-271°C)で示すことを発見しました。さらにそのような系で初めて近藤効果(注 4)が観測され、電子相関が重要な系であることを示しました(酒井、中辻 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 063701.)。

今回新たに、研究グループは PrTi₂Al₂₀ が強軌道秩序相内で超伝導になっていることを発見しました。超伝導転移温度は 0.2 K (-273°C) と低いものの、軌道秩序内での重い電子超伝導は初めての発見です。抵抗がゼロになることだけでなく、交流・直流磁化測定でのマイスナー効果(注 5)を確認することにより、この超伝導が確かに本質的な超伝導であることを見出しました(図 1)。さらに電子比熱係数、磁場に対する超伝導の壊れにくさなどから、この超伝導は重い電子により形成されていることが分かってきました。超伝導が発現する低温ではスピンの自由度が存在しないため、軌道のゆらぎがクーパーペアの形成に関与している全く新しいタイプの超伝導である可能性があります。

この成果は超伝導形成に関する新しい知見を与え、超伝導物質を設計するための新しい指針を与えるものと期待されます。

4. 発表雑誌：

雑誌名： Journal of the Physical Society of Japan, Letter, Vol. **81** (2012) 083702.

論文タイトル：“Superconductivity in the Ferroquadrupolar State in the Quadrupolar Kondo Lattice PrTi₂Al₂₀”

著者： A. Sakai, K. Kuga, and S. Nakatsuji

DOI 番号： 10.1143/JPSJ.81.083702

アブストラクト URL：<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/083702/>

5. 問い合わせ先：

東京大学物性研究所 准教授 中辻 知

TEL:04-7136-3240 FAX:04-7136-3241

E-mail:satoru@issp.u-tokyo.ac.jp

<http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 用語解説：

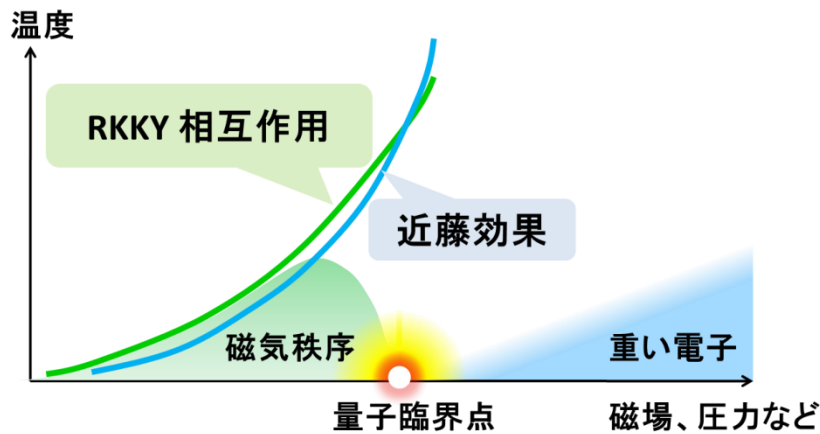
(注 1) 磁気秩序

スピンと呼ばれる微小な磁石をもつ原子を含む物質のことを磁性体と呼びます。通常磁性体を冷却すると、巨視的な数の電子スピンの何らかのパターンで整列する**磁気秩序**を示します。例えば**強磁性秩序**状態では隣り合う原子のスピン同士が全て同じ方向に整列しています。磁石として使われている鉄・コバルト・ニッケルなどがこれに当たります。また隣り合う原子のスピン同士が互いに逆向きに並ぶ秩序を**反強磁性秩序**と呼びます。この場合物質全体では、内部でスピンの打ち消しあうため磁石になりません。

(注 2) 量子臨界点

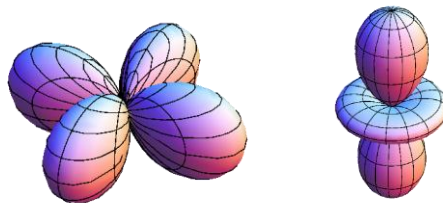
物質がある状態から異なる熱力学的状態へ変化することを相転移といいます。たとえば、水が温度をさげて氷になる現象もこれにあたります。このような有限温度の相転移は熱揺らぎによりますが、それとは異なり、相転移が絶対零度で量子力学的な揺らぎによって引き起こされる時、これを量子相転移といい、量子相転移が起こる相空間の点を量子臨界点と呼びます。磁気秩序を示す物質に磁場や圧力などをかけると、磁気秩序を示す温度が変化し、あるところでゼロになります。この点が量子臨界点です。重い電子系においては、以下の図に示すようにこの量子臨界

現象は磁性を司る RKKY 相互作用とスピンの自由度を消そうとする近藤効果(注4)の競合として現れます。この量子臨界点の近くでは通常の金属とは異なった異常な振る舞い(非フェルミ液体)や重い電子超伝導などが現れることが知られています。実は、このスピンの代わりに軌道の自由度を用いた場合に、量子臨界現象が実現するかは全くわかっておりません。



(注3) スピン、軌道、四極子

一般に原子核の周りの電子の持つ電子分布のことを軌道、電子が持つ小さな磁石(磁気双極子モーメント)をスピンと呼びます。磁性は原子の最外殻付近にある不対電子が担います。希土類原子の場合には、不対電子である f 電子のスピンの自由度はスピン軌道相互作用のために結合するため、多極子モーメントを用いて分類されます。そのうち軌道に相当する電荷の隔たりを表す成分を(電気)四極子と呼びます。以下に、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の持つ二つの縮退した軌道(四極子)の電子分布を示します。



(注4) 近藤効果、重い電子

希土類やアクチノイド類を含む金属間化合物においては、これまでの精力的な研究を通じて、重い電子状態、近藤絶縁体、異方的超伝導、量子臨界現象など多岐にわたる興味深い量子現象が次々と見だされてきました。これらの現象を理解する上で基礎となるのが「近藤効果」です。これは比較的局在性の強い f 電子の磁気双極子モーメント(スピン)が伝導電子と (cd) 混成することによって遮蔽され、遍歴的な性質を持つ現象のことをいいます。この近藤効果により電子の数百倍もの有効質量をもつ「重い電子」となり、時にはそれがペアを作り非従来型の超伝導を生み出します。このように「磁気双極子モーメント」を伝導電子が遮蔽するという近藤効果は、様々な新奇な現象を生み出す起源として固体物理の基礎的・普遍的現象の一つとして広く知られています。

(注5)マイスナー効果

超伝導になっている物質は、電気抵抗がゼロというだけでなく、外部からの磁場を内部から完全に排除するという働きを持ちます。これをマイスナー効果と呼び、超伝導を確認する方法の1つになっています。

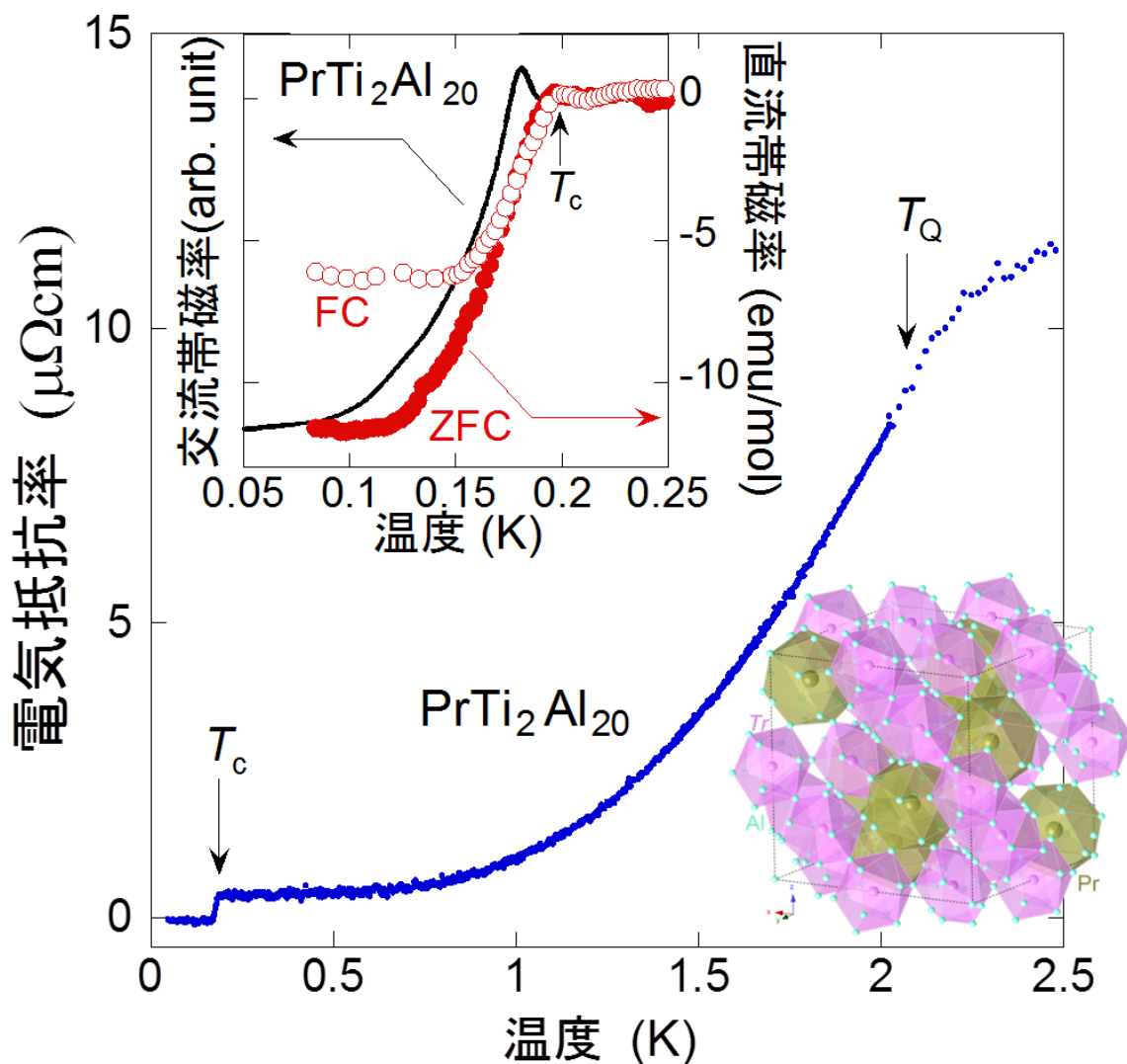


図 1. 電気抵抗率の温度依存性。2 K で強軌道秩序転移による電気抵抗率の減少が、0.2 K で超伝導によるゼロ抵抗が観測されました。超伝導転移直前の残留抵抗率は約 $0.38 \mu\Omega\text{cm}$ と非常に小さく、サンプルの純度が極めて良いことを意味しています。(左上挿入図) 交流帯磁率(黒、左軸)と直流帯磁率(赤、右軸)の温度依存性。完全反磁性が十分出ていることから、この超伝導が(表面など試料の一部ではなく)試料全体で起きている本質的なものであることを示しています。(右下挿入図) $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の結晶構造。Pr(プラセオジウム)原子が 16 個の Al(アルミニウム)原子に囲まれた籠状構造をしています。