

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	畠山 雄気
論文題目	Theoretical study of antiferromagnetism induced by paramagnetic pair-breaking in a strong-coupling superconducting phase		
(論文内容の要旨)			
<p>電子相関に起因する超伝導の多くは、磁性秩序に起因して、あるいはそれと競合して起こる。特に、d波対称性の電子対凝縮による超伝導を示す多くの系では、反強磁性秩序と超伝導相との競合がみられる。つまり、反強磁性秩序は超伝導相内よりも正常金属相内で実現しやすい、というのが磁性と超伝導とのかかわりに関する標準的な描像である。ところが、重い電子系超伝導 CeCoIn5 の低温かつ高磁場下には通常の超伝導相とは隔てられた新奇超伝導(HFLT)相が見出されており、中性子散乱実験や核磁気共鳴 (NMR) 実験によるこのHFLT相の調査によれば、この相では反強磁性秩序を含んだ Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 相と呼ばれる空間変調超伝導相が実現していると考えられる。重要な点は、超伝導相内のみで反強磁性が起こっているという、上記の標準的な描像とは完全に相反する実験事実である。しかも、HFLT相の高磁場側では特に、NMR の実験事実は超伝導と反強磁性は実空間で共存しているという描像と合致する。従って、FFLO 相の空間変調する超伝導秩序パラメタの節に反強磁性が局在しているわけでもない。この従来を描像を覆す反強磁性と超伝導との兼ね合いを説明する理論構築に成功したのが、畠山さんの学位論文の中心的内容である。</p> <p>畠山さんの研究では、この超伝導と反強磁性の起源が強い電子相関により無視できないパウリ常磁性効果にあると提案する。現に、CeCoIn5 ではそのHc2線の特徴などから、例外的に強いパウリ常磁性効果を有する超伝導体であることが以前からわかっている。畠山さんはまず、この問題を弱結合BCS理論の枠内で解析した。すなわち、d波超伝導と反強磁性の秩序を平均場で導入してハミルトニアンを対角化するという従来の方法である。これまでゼロ磁場下ではこのモデルに関する多くの仕事があったが、パウリ常磁性を考慮した対応する計算の報告はなかった。このパウリ常磁性を考慮するだけで、超伝導相内の方が反強磁性秩序が起こりやすく、反強磁性のスピンの変調の方向はd波超伝導ギャップのノード方向にできる、というCeCoIn5での実験事実と符合する結果を得ることを畠山さんは計算で示した。しかし、CeCoIn5の超伝導は強い電子相関に起因するため、有効質量の増大などパウリ常磁性効果の増強につながる効果を手で入れる弱結合近似では十分でない。そこで、畠山さんはパウリ常磁性を考慮しない範囲で過去の研究で成功をおさめたFLEX計算というd波超伝導につながる反強磁性揺らぎの効果とクーパ対形成の記述とを無矛盾に考慮した数値計算方法を、本課題の対象であるパウリ常磁性の強い状況に拡張して、弱結合近似での結果を強結合理論に拡張する試みを行った。その結果、弱結合近似で得られたパウリ常磁性による(平均場近似での)超伝導1次転移や高磁場超伝導領域のみで生じる反強磁性秩序が同様に得られた。また、電子相関の強さは実際の系では圧力依存性に現れるので、系の圧力依存性について計算に基づいた考察を行っている。</p> <p>要約すると、パウリ常磁性の強いd波超伝導体において高磁場超伝導相でのみ発現する反強磁性という実験的にみられた現象の微視的な起源を明らかにした画期的な理論研究が、本学位論文の内容である。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位論文は、2つの国際雑誌で公表された論文の内容に基づいて書かれており、理論の適用対象となる重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  が磁場下で示す現象の紹介と FFL0 超伝導の説明とからなる序論から始まる。そして、弱結合 BCS モデルでの解析を軌道対破壊効果を見捨ててパウリ常磁性効果のみを考慮するパウリ極限の場合と、軌道対破壊を含むが秩序パラメタに関して Ginzburg-Landau 展開という近似を用いる場合との両方で実行し、得られた相図を比較検討している。その中で特に、なぜパウリ常磁性が強いと反強磁性が正常相内でよりも超伝導相内で起こりやすくなるのかを説明するのに紙数を割いている。次に、ゼーマンエネルギーを含む単バンドハバードモデルを出発点として電子相関から生じる反強磁性揺らぎとそれが誘起する d 波超伝導をコンシステントに含む強結合計算を、Fluctuation-Exchange (FLEX) 近似と呼ばれるダイアグラム法と数値計算を取り入れた方法で実行し、弱結合近似での結果の正当性と強結合モデルで新たに見出される効果を検討した。そして、結論と要約につなげている。

強結合近似での相図に関する結果は、弱結合近似での結果と定性的に変わらないため、本学位論文での物理的内容の多くは様々な状況に解析を拡張できる弱結合近似を用いた章にみられると言ってよい。例えば、上記のとおり弱結合近似での計算では軌道対破壊を考慮することでパウリ常磁性をもたらす超伝導相と金属相間の 1 次転移が 2 次転移に変わることも記述できるが、これが電子状態が  $\text{CeCoIn}_5$  と類似である一方で反強磁性が超伝導相内だけでなく、より高磁場の正常相にまたがって実現する  $\text{CeRhIn}_5$  の相図に近い結果を与えるため、弱結合近似の解析は様々な関連した現象を包括的に議論するのに適している。畠山さんの学位論文の口頭試問は 1 月 6 日朝に行われたが、その際にも審査委員の教員からの質問が集中したのがこの弱結合近似での物理量に関する結果の詳細についてであった。殊に、本学位論文の主要部分はやはり、パウリ常磁性が無視できない強磁場では超伝導相内の方が反強磁性秩序が正常相内でよりも誘起されやすくなるという、従来の描像を覆す理論的内容を発見した点にあるため、口頭試問の際にもなぜ反強磁性がパウリ常磁性によって起きやすくなるのか、という点についてわかりやすい説明を求める質問が相次いだ。畠山さんの応答では相応の説明は与えていたが、口頭発表だからこそできるわかりやすい説明ができていたと言いはし難い。それでも、質問者の教員の理解を促すには十分な受け答えにはなっていたと判断した。一方で、本研究で用いられた理論が一部の鉄系超伝導体の磁場下の状況にも適用できるという主張を畠山さんが学位論文中で展開していることに関して、実験研究者から複数の質問が飛んだ。確かに一部の鉄系物質では、FFL0 相と同定できそうな高磁場低温相が示唆されているが、畠山さんが実験の現状を意識して述べたものではなく、電子状態の詳細の比較に基づいて類似の機構発現の可能性があると述べたものに過ぎない記述であった。是非を確認するのは将来の研究に委ねられるが、今回の  $\text{CeCoIn}_5$  を主な対象とした理論解析からは範囲を超えているため、その質疑応答の様子は審査結果には含まれていない。実験教員からの質問への受け答えに多少不十分なところが見られたものの、理論結果に関する試問審査での受け答えは概ね無難に行っていた。

以上のことから、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年1月6日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降