

研究会番号：YITP-W-15-01

研究会「多自由度と相関効果が生み出す超伝導の新潮流 ～BCS から BEC まで～」報告

開催日時：2015 年 6 月 9 日～2015 年 6 月 10 日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所 パナソニック国際交流ホール

参加者数：99 名

【研究会の目的・趣旨】

1986 年の銅酸化物高温超伝導体の発見以来、強相関電子系における超伝導は物性物理学における最も重要な研究テーマの一つとなった。2008 年に発見された鉄系超伝導体は銅酸化物に次いで高い転移温度を有し、2 例目の強相関系高温超伝導体と考えられている。その発見は、銅酸化物以外の物質でも高温超伝導が実現されうるということを印象づけた点で意義深い。また、これまでの研究から、その多彩な超伝導状態や特異な電子状態等を理解する上で軌道自由度の重要性が指摘されており、高温超伝導の発現機構として、磁気揺らぎを担うスピンの自由度とどのように競合、協力するかは今日最もホットな話題の一つとなっている。

このように多自由度をもつ強相関電子系がどのような場合に高い転移温度を有し、また、新奇な超伝導状態を発現するか、という問題は、鉄系超伝導体に限らず、重い電子系超伝導体やフラーレン、ルテニウム酸化物等、他の超伝導体とも共有するトピックである。また、最新の実験結果によれば、一部の鉄系超伝導体が BCS-BEC クロスオーバー領域にある可能性が高く、その理想的な研究の舞台を提供している。このようなテーマは銅酸化物や冷却原子系を対象としてよく研究されてきたが、鉄系においては多自由度との関連という新しい切り口を提示している。同様の話題は冷却原子系における最近のトピックでもある。

このような状況を踏まえ、日本国内で鉄系超伝導体をはじめとする多自由度強相関電子系の理論研究や BCS-BEC クロスオーバーで成果を挙げている第一線の研究者を集め、最近の成果について討論するとともに、実験研究者の講演も織り交ぜて多自由度強相関電子系の超伝導研究の今後の方向性について議論するための研究会を開催した。

【研究会の内容】

本研究会では、99 名の参加者を得て、25 分講演 13 件、20 分講演 9 件、15 分講演 10 件、ポスター講演 18 件の計 50 件の講演が 2 日間にわたって行われた。初日の午前中は、比較的最近発見された新規超伝導体についてのレビュー的な講演が行われた。まず初めに、有機物超伝導体に見られるディラック電子の出現機構と BCS-BEC クロスオーバーに関する

講演、ついで 200GPa の超高压下で約 200K の高温超伝導を示す硫化水素についての理論計算、および、前回の物理学会のシンポジウムのテーマにもなった TiSe_2 などに見られるエキシトニック絶縁体の可能性についての報告計 4 件が行われた。さらに、休憩をはさんだ後は、鉄系超伝導体の関連物質である CrAs の超伝導に関して、磁気揺らぎとの相関が議論された。続く 2 つの講演では、トポロジカル超伝導体の可能性を探る研究が BiS_2 系超伝導体や PdBi_2 を対象として、第一原理計算や ARPES を用いて検証された。最後は新しい超伝導体開発の有効な手法のひとつと考えられている電解誘起超伝導の超伝導特性に関する発表と最近の MoS_2 の上部臨界磁場の奇妙な振る舞いについての報告があった。いずれの講演も未発表データを含んだ最新情報であり、発表者の強い志が伝わってくるような勢いのある発表が続いた。それぞれ、今後の進展が期待される興味深い研究テーマであることが実感された。

午後からは、 FeSe 系超伝導についての現状が 6 件の講演を通して行われた。まず初めの講演において FeSe の物性が、電子輸送現象、熱電係数、常磁性帯磁率、磁場侵入長といったバルク特性、走査型トンネル顕微鏡による準粒子干渉測定を通してレビューされ、そこで見られる BCS-BEC クロスオーバーの可能性や問題点が整理された。次に、ARPES や量子振動におけるデータ解析からこの系がいかに異常なバンド構造を持っているのかが詳細に説明された。続いて、中性子散乱実験による磁気揺らぎの構造が報告され、最後に、理論的な立場から、鉄系の輸送現象に見られる大きな面内異方性が軌道揺らぎとスピン揺らぎの兼ね合いで説明可能であることが議論された。このセッションの中心的な研究対象である FeSe 系はバンド構造的には最も単純な鉄系超伝導体と考えられるが、その実、他の鉄系超伝導とは性質が大きく異なっており、母物質の基底状態は反強磁性秩序を伴わない構造相転移を示す。また、そのフェルミ面の形状が第一原理計算から予想されるものに比べて非常に小さく、その食い違いが大きい。同様の事情は他の鉄系超伝導体でも観測されてきたが、 FeSe においてそのずれは非常に大きく、その原因が何から来るものであるのかは未解決問題である。今回の発表を通して、軌道の秩序がなんらかの形で関与していることは理解できたが、その詳細は依然、未解決のままであり、この点を明らかにするのが、次の目標であると認識された。これらの発表に続いてポスタープレビューを行い、その後のポスター講演では、引き続き、活発な議論がなされた。

二日目の午前中は、引き続き、鉄系超伝導体に関する講演が行われた。主に 11、111、122、1111 系など物質間の違いに視点が置かれて議論された。まず、兼ねてからの事案であった KFe_2Se_2 については超格子構造と超伝導性の相関関係についての発表があった。ついで、鉄系に共通して現れる面内 4 回対称性の破れ(ネマチック)に関して、ARPES による軌道分解の解析があり、軌道秩序に起因するらしいことが報告された。次の核磁気共鳴の実験では、軌道秩序後に磁気揺らぎが大きく増強されることが鉄系の共通点であることが強調された。前半の最後は理論研究の発表で、鉄系に見られる多様な物性が、各物質によるバンド構造の違いに起因する軌道自由度・スピン自由度の兼ね合いから統一的に理解可能であること

が議論された。午前後半には、スピンネマチック理論の一般的な考察や A15 型超伝導体の理論など鉄系研究から派生した理論研究の紹介、 SrFe_2As_2 の NMR 実験、そして、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の薄膜合成によるバルクでは到達できない組成の研究から得られる知見の紹介が行われた。

午後からは、鉄系以外の超伝導の進展が報告された。午後前半には、重い電子系超伝導体に関連する講演が 5 件、午後後半には、銅酸化物関連の講演が 5 件行われた。重い電子系のセッションでは、まず、 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ 系の超伝導が紹介され、4 極子近藤効果との関連が議論された。続いて、 UPt_3 におけるスピン三重項超伝導の現状とウラン系超伝導を微視的なフェルミ面に基づいて議論する上で熱伝導度・熱ホール測定が有益であることが紹介された。次に第一原理的な理論研究に基づいて UPt_3 がどのように理解できるかが議論された。また、ウラン系超伝導体を対象とした量子多体計算からは量子臨界性とは別の超伝導発現機構が提案された。 UPt_3 や UCoGe は明確なスピン三重項超伝導体であり、その微視的な理解は超伝導の理解を深める上で重要な研究対象であるが、その理解に近づきつつある息吹を感じられた。このセッション最後の講演は、 URu_2Si_2 の磁場中超伝導の理論解析であり、この系特有の隠れた秩序に関して終止符を打つための実験提案がなされた。休憩を挟んで、午後後半は、まず、銅酸化物 Bi2212 に対する準粒子干渉実験から磁場中電荷秩序に関する興味深い報告があり、つづいて、固有ジョセフソンのスイッチング特性が紹介された。銅酸化物における電荷秩序・電荷励起は最近の実験技術の進歩によって注目を集めている現象であり、これに関連して共鳴非弾性 X 線散乱の理論的な考察が報告され、続いて、汎関数くりこみ群の方法により、スピン揺らぎが電荷揺らぎを誘発する機構が議論された。最後は、本研究会の副題である BCS から BEC までの物理に関して、動的平均場理論に基づく解析が紹介されて締めくくられた。

これまで基礎物理学研究所による援助のもと、2011 年から 2013 年には「鉄系高温超伝導の物理」に関わるワークショップが行われ、2014 年度にはより幅広い物質群での研究会「多自由度電子状態と電子相関が生み出す新奇超伝導の物理」が開催された。本研究会のタイトルにある「多自由度と相関効果」は、これまでの基研研究会を通じて議論されてきたものであり、本年度は、その後の研究の発展に基づいて、軌道自由度がスピンや格子、量子臨界性や BCS-BEC クロスオーバーに与える影響など、さらに幅広い話題を取り上げた。予想を超える参加者を得ることができたのは、そのためかもしれないが、このように超伝導にテーマを絞り、第一線で活躍する国内の研究者が一同に介して集中的に議論できる研究会があまりないというのも事実である。したがって、本研究会は、最新の実験結果についての報告や研究者間の活発な意見交換の場として、大変有意義で貴重な研究会に位置づけられる。事実、今回の研究会も、幅広い物質群に対する超伝導の研究が日々発展しつつあることが実感できる非常に充実した 2 日間であった。

なお、研究会プログラムおよび講演のアブストラクトは下記 web ページの「プログラム」「アブストラクト集」欄から閲覧できる。

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~super2015/>

または

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/ws/2015/super2015.ws/>

リンクが切れている場合は以下のページから検索頂きたい。

<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/seminar/startsearch.php>

【世話人】

池田 浩章（立命館大学理工学部）（代表）

有田 亮太郎（理化学研究所 CEMS）

大野 義章（新潟大学大学院自然科学研究科）

黒木 和彦（大阪大学大学院理学研究科）

紺谷 浩（名古屋大学大学院理学研究科）

段下 一平（京都大学大学基礎物理学研究所）

遠山 貴己（東京理科大学理学部）

松田 祐司（京都大学大学院理学研究科）

柳瀬 陽一（京都大学大学院理学研究科）