

## 研究会報告

京都大学基礎物理学研究所 研究会

### 「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」

2005年12月6日(火)～8日(木)

於 京都大学基礎物理学研究所

上記研究会は平成17年12月6日から8日にかけて基礎物理学研究所湯川記念館で行われた。この研究会は特に強相関電子系において数多く発見されている非BCS型の異方的超伝導体の物性、および発現機構について幅広く討論することを目的としたものである。異方的超伝導の研究における最も大きなブレークスルーであった銅酸化物高温超伝導体の発見以来、非BCS型超伝導の発現機構については実験、理論両面から精力的に研究が進められてきた。過去約10年の間に銅酸化物以外にも、ルテニウム酸化物、コバルト酸化物、f電子系化合物、有機導体などの非BCS型超伝導物質が発見されており、この問題は今日の物性物理における最も主要なテーマの一つとなっている。本研究会ではこれら強相関電子系にスポットを当て、当該分野で活躍している実験家、理論家が集って研究発表、討論を行った。特に前掲のタイトルが示すように物質の枠を越えた異方的超伝導発現機構の統一的な描像が可能であるか否かについて議論を深めることを一つのメインテーマとした。各講演の概要は本稿に添えられたアブストラクト集のとおりであるが、以下、研究会の様子を概観して報告する。

銅酸化物高温超伝導体のセッションでは、まず椋田(阪大、以下敬称略)より最近の多層型物質のNMR研究について総括的なレビューがなされた。この系ではほぼ理想的なCuO 2面が多重に重なっており、各々の層が異なるキャリア密度を有する。NMRの手法を用いて各層の固有の物性を明らかにし、面によって超伝導と反強磁性秩序が棲み分け共存しているという興味深い結果を報告していた。この系の各層の物性を系統的に調べることによって酸化物高温超伝導のキャリア濃度と温度に関する新たな相図が提示された。多層系では従来の銅酸化物で必然的に存在したキャリアドープによる乱れの影響が抑えられており、高温超伝導体の本質的な相図の理解という点で興味深い。平島(名大)、横山(東北大)からは超伝導状態、転移温度の理論計算の結果について発表があり、高温超伝導発現機構の反強磁性揺らぎ説をさらに裏付ける報告がなされた。また、鄭(岡山大)からは最近のNMR実験による混合状態での磁場分布の詳細な研究について発表があった。

本研究会は前掲の物質群を幅広く網羅する構成になっていたが、重い電子系のなかでは、最近話題のスクテルダイト系を特にピックアップしたセッションがもたれた。このセッションでは、まずこの系の研究の草分けといえる佐藤(都立大)によるスクテルダイト物質についての包括的

なレビューの後、後藤（新潟大）よりこの系に固有なラットリング現象（原子のオフセンター振動）について詳細な発表があり、超伝導物質  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の発現機構における、この特異な格子振動の重要性が指摘された。通常のフォノンと異なり軌道の自由度などと結合して異方的な相互作用を生み出す可能性があることが示唆された。また、髭本（原子力機構）からは  $\mu\text{SR}$  による異方的超伝導研究の包括的なまとめがあり、スクテルダイト超伝導体の時間反転対称性の破れと、その置換効果の影響について報告があり、この系の超伝導が何らかの意味で非BCS的であることが指摘された。続いて藤（広島大）からはナイトシフト測定の結果がなされ、スピン三重項状態を強く支持する結果が得られていることが示された。この系の超伝導発現機構の可能な理論の一つとして、磁気（軌道）励起子機構が松本（静岡大）によって発表された。

新規超伝導物質のセッションでは竹屋（物材機構）より、空間反転対称性の無い超伝導体  $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$ ,  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  について報告があった。とくに  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  では比熱の温度依存性で異方的超伝導を示唆する結果も得られており今後の展開が注目される。

f-電子系セッションでは、松田（京大）から熱伝導測定による超伝導ギャップのノード構造決定実験について包括的なレビューがなされ、続いて熊谷（北大）より  $\text{CeCoIn}_5$  で発見された FFL0 状態についての発表があった。大貫（阪大）からは日本国内で最近発見された重い電子系超伝導物質についてのまとめがあり、最近次々と新たに発見されている空間反転対称性を持たない超伝導物質群が今後の重要な研究テーマになるであろう、と結んでいた。理論の発表としては池田（京大）が電子間相互作用についての摂動計算による超伝導転移温度の結果について報告し、準粒子間の有効相互作用が超伝導を引き起こす引力の源となることを示していた。

コバルト酸化物のセッションは本研究会中、最も長丁場となったが、特に実現している超伝導状態について、実験家の間で熱い議論が交された。佐藤（名大）からはNMRと中性子実験、不純物効果の実験結果のまとめがあり、この系の超伝導がs波対に非本質的な異方性が加わった状態として理解できることを結論付けた。さらに非フォノン機構説で重要とされる強磁的揺らぎの存在は中性子実験から支持されないことも指摘していた。これに対して京大の吉村、石田はNMRのナイトシフト測定からスピン三重項の可能性が未だ否定されていないことを強調していた。特にナイトシフトのデータの解釈については専門家の間でかなり突っ込んだ議論がなされた。また、s波説でも核磁気緩和率の温度依存性など十分に説明できない点もあり、この系の超伝導状態の決定には更なる実験データの蓄積が必要であることが認識された。また、コバルト酸化物の非水和物（非超伝導体）と水和物（超伝導体）のARPES実験について、それぞれ佐藤（東北大）、下志万（物性研）から発表があり、いずれの場合でもこの系の非フォノン機構説において重要とされるeg電子のフェルミポケットが見えていないことが報告された。ただし、水和物の場合は十分バルクな性質を反映しているか否かさらなる検討を要することが強調されていた。理論のセッションでは黒木（電通大）、柳瀬（東大）、矢田（名大）の3つの発表があり、黒木、柳瀬がeg電子のフェルミポケットによるスピン三重項超伝導の可能性を議論し、これに対して矢田は通常のBCS的なフォノン機構によるs波説を提唱した。いずれがこの系の理論として正しいかは、将来の実験で決定されるであろう。

Ru酸化物のセッションでは前野（京大）より当グループによる共晶系についての最近の研究

に関する発表があり、続いて野村（原子力機構）より摂動計算による発現機構の理論についてのレビューが行われた。出口（名大）、楠瀬（東北）からは、この系のギャップ構造を決定する磁場中比熱に関する実験および理論についての発表がそれぞれなされた。

有機導体のセッションでは鹿野田（東大）より最近発見された三角格子上のモット絶縁体である  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> の NMR による研究についてまとめがなされた。この系は 32 mK まで磁気秩序が起こらず、スピン液体の可能性が示唆されている。この物質に圧力を加えると金属に転移し、さらにこの金属状態は低温で超伝導を示す。NMR の結果はこの超伝導が異方的であることを支持している。他方、ナイトシフトは  $T_c$  以下で減少しており spin singlet 状態が実現していること示唆されるが、その減少量が d 波超伝導体であることが知られている類似物質に比べて非常に小さく、その原因は未だ謎である。また、 $T_c$  以上での核磁気緩和率の振る舞いは、コリンハ則にしたがっているように見え、特定の磁気揺らぎが発達していないように見える。この系の超伝導発現機構は将来に残された重要課題の一つであろう。また、小林（名大）からは電荷秩序を起こす有機導体  $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の圧力下超伝導の理論について発表があり、電荷秩序状態で存在するディラックフェルミオンのフェルミ点に加圧によってちいさなポケットになり、そこで反強磁性揺らぎを媒介として超伝導が起こることが説明された。

最終日午後に持たれた超伝導発現機構セッションは前述したように強相関電子系の異方的超伝導について統一的に理解できること、また、できないことを議論する場として設けられたものである。まず、守谷（東京理科大）からは強相関電子系における引力の起源の一つである反強磁性揺らぎによる発現機構について、フェルミ液体論と SCR 理論に基づいた研究の総括的なレビューがなされ、フェルミ液体論的アプローチとしばしば対比される t-J モデルに基づく研究に対して批判的コメントが与えられた。後者はモット絶縁体から超伝導にアプローチする理論であるが、それと SCR 理論がどのようにつながるのか、すなわち、両者を統一する描像の提示が重要な問題であることを強調されていた。この問題提起に対して小形（東大）は変分モンテカルロ法によるハバードモデルの研究を通して解答を与えようと試みた。この手法によればモット絶縁体近傍では相互作用ではなく運動エネルギーの利得によって超伝導が実現することが示され、相互作用 U の大きさによって、このような強結合領域とフェルミ液体-SCR 理論で記述される領域とのクロスオーバーが起こることが議論された。安岡（原子力機構）からは銅酸化物高温超伝導の NMR 研究についてのレビューと数年前に発見されたアクチノイド系超伝導体 Pu(Co,Rh)Ga<sub>5</sub> の NMR の結果の紹介があり、Pu<sub>115</sub> 系超伝導が銅酸化物高温超伝導と重い電子系 Ce<sub>115</sub> 系超伝導の間の橋渡しとなる物質であることが述べられた。これらの系が反強磁性スピン揺らぎを起源とする超伝導として包括的に理解できることが示唆された。また、異方的超伝導の対状態を決定する上での横緩和率  $1/T_2$  の測定の重要性を強調していた。北岡（阪大）は NMR による強相関電子系超伝導研究について、特に最近の Ce<sub>115</sub> 系の研究成果を中心に包括的にレビューした。その中で、強相関系の超伝導発現機構は多彩で磁気揺らぎが関与すると考えられるものと、磁気揺らぎが顕著でないと見なされる系が存在し、簡単な統一的描像は期待されないことを強調していた。また、三宅（阪大）は理論的観点から、強相関系超伝導の発現機構が正常相の多様性を反映して多彩である可能性があり、やはり統一的描像を与えることはできないと論じた。これに対して山田（京

大)は Fermi 液体論の立場から一般に強相関電子系では準粒子間の相互作用が最も重要であり、その運動量依存性が引力の主要な起源となることを議論し、また、超伝導が起こるエネルギー・スケールを決める有効質量の繰り込みと、フェルミ面近傍での運動量依存性をミクロな理論計算で決定することによって包括的な理解が可能であることを述べていた。

ポスターセッションでは別掲のプログラムに示されているように 27 件の発表があった。いずれも口頭発表で取り上げても遜色の無いハイレベルな内容であった。特に芝内(京大)は超伝導対状態を実験的に決定する上で重要な NMR 測定における磁場分布を磁気光学効果を使って計測した結果を発表し、多くの聴衆の関心を集めていた。本研究会の高温超伝導セッション、コバルト酸化物セッションでも NMR の信号が試料の何処から来ているのかが大きな話題となっていたが、今後、このような磁場分布測定と相補うことによって、NMR 実験がより精密な超伝導状態決定の有力なプローブとなっていくことを期待したい。

本研究会で取り上げられた物質群が多岐にわたっていることから、強相関電子系超伝導の研究は約 20 年前の大発見以降も多彩な新現象発見の連続であったことがうかがえる。磁気秩序とミクロに共存する超伝導、時間反転の破れた超伝導、空間反転の破れた超伝導等、興味深い系が次々と現われ、この分野は今後も豊富な研究テーマの宝庫となっていくことを予感させる研究会であった。通常交流の少ない酸化物系、f-電子系、有機導体の研究者が集って、各々の系に見られる異方的超伝導の共通点と相違点を認識し、その物性と発現機構解明に向けて議論を深めることができたのは大きな成果であった。研究会の題目に掲げられた「統一的理解」が可能であるか否か、については結論が出せる段階ではなかったにしても、多彩で新奇な様相の背後の中核には、物質系の違いにも関わらず、電子相関が重要な役割を果たしている例が多い、という認識は共有されるのではないかと思われる。

最後になったが、本研究会を盛り上げていただいた全ての講演者の方々および参加者の方々、そして運営面で助けていただいた基研秘書の上田順子女史に世話人一同深く感謝の意を表したい。

(文責 藤本 聡)

## 世話人

藤本 聡 (京大理)、河野 浩 (阪大基礎工)、神吉 一樹 (大阪府大理)、堀田 貴嗣 (原子力機構)、紺谷 浩 (名大理)、柳瀬 陽一 (東大理)、野村 拓司 (原子力機構)、兼安 洋乃 (兵庫県立大物質理学)

## 謝辞

三宅 和正 (阪大基礎工)、守谷 亨 (東京理科大)、上田 和夫 (東大物性研)、前川 禎通 (東北大金研)、大貫 惇睦 (阪大理)、安岡 弘志 (原研)、北岡 良雄 (阪大基礎工)、前野 悦輝 (京大理)、佐藤 英行 (首都大理)、倉本 義夫 (東北大理) (順不同、敬称略)

の各先生方には、研究会プログラム編成上、有益なご意見を多数頂きました。世話人一同、厚く御礼申し上げます。