

非従来型超伝導体の特異現象: トポロジカルなスピン軌道相互作用の役割

Novel Phenomena in Unconventional Superconductors: The role of topological spin-orbit coupling

弘前大学	御領 潤
派遣期間	2011年4月7日~2012年12月31日
研究機関	Institute of Theoretical Physics, ETH Zurich, CH-8093, Zurich, Switzerland
研究指導者	Prof. Manfred Sigrist

The purpose of this research is to clarify the role of topological spin-orbit coupling in several unconventional electron-pairing states. We investigate a two-electron bound state, so-called Cooperon, and its condensation in the Kane-Mele model of a topological insulator (quantum spin Hall system) on the honeycomb lattice. The spin-orbit coupling in this model is crucial for the non-trivial topology of a bulk electron, and gives rise to a sort of selection rule for the possible Cooperon channels within a general type of attractive interaction. We also argue a new superconductor SrPtAs with local lack of inversion center. An intriguing point is that the local non-centrosymmetry causes the same type of topological spin-orbit coupling mentioned previously in the Kane-Mele model. The system thus shows the spin Hall effect in the normal state. We point out theoretically that the stable pairing symmetry in the superconducting state is chiral *d*-wave, and this state is supported by several experiments. As an analogy to the two-band chiral *p*-wave model of Sr₂RuO₄, we could expect in SrPtAs that the topological spin-orbit coupling gives rise to the non-trivial spin transport carried by the chiral edge mode in chiral *d*-wave state.

研究目的

超伝導は金属を冷やすことにより見られる現象で、転移温度以下になると電気抵抗が消失すると同時に、完全反磁性（外部より加えた磁場を試料の外にはじき返そうとする性質）を示す。転移温度は物質固有の値をもつ。電気抵抗がゼロになるという点ひとつをとっても応用上大変大きな魅力であることは想像に難くなく、出来るだけ高い転移温度を持つ物質を見出そう、あるいは創出しようとして、世界中の研究者がしのぎを削っている。

超伝導はその発見から 100 年を越える長い歴史を持つ問題であると同時に、先述のような精力的・継続的な研究によって現在も続々と新しい超伝導体が発見され続けており、凝縮系物理学の最も基本的で重要なテーマの一つとしての位置づけを保ち続けて

いる。1950 年代に超伝導の基礎理論が Bardeen, Cooper, Schrieffer により議論され (BCS 理論)、超伝導の基本的理解が与えられた。ふたつの電子がクーパー対を組むことで超伝導が起こるということは BCS 理論により初めて指摘された点で、これが超伝導の根本であることは現在もまったく変わらない。ところで BCS 理論ではいろいろ単純化された近似を用いている。よって、電磁氣的応答や熱力学的性質などがオリジナルの BCS 理論から得られるものとは異なる振る舞いを示すものも数多く発見されて来た。例えば重い電子系の超伝導体や銅酸化物高温超伝導体などが代表例として挙げられる。BCS 理論によりその性質がよく記述される超伝導体のことを従来型超伝導体と呼ぶのに対し、そうではないものを非従来型超伝導体と呼ぶ。非従来型超伝導体では、

従来型の議論において単純化のため取り込まれていなかった性質や状況、例えば、クーペ対の波動関数の異方性、結晶構造の特異性、フェルミ面の形状や枚数、スピン軌道相互作用、電子間に働くクーロン相互作用などが重要な要素となってくる。第二種超伝導体で現れる磁束渦の性質も、非従来型の場合はより豊富な可能性が挙げられる。さらには凝縮対の対称性によっては量子ホール効果や量子スピンホール効果など、トポロジカルな電子状態との関連・類似も議論される。冷却原子系との関連も興味深い。今後もさらに新超伝導体の発見や他分野との関連が見出され続け、より一層成熟した、深さと広がりを持った分野に発展して行くことが期待される。そうした流れの中、新たに見出された超伝導状態それぞれが示す性質を精確に見極めて分類し、同時に包括的・統一的な理解を探っていくことがこの分野の理論サイドの目的で、ともすればそこからより高い転移温度を持つ超伝導体の発見につながる潜在的な可能性を思い描くと、大変やりがいのあるテーマであると考えている。

今回、長期滞在派遣に対するご支援をいただき、2011年4月7日より2012年12月31日までスイス連邦工科大学チューリッヒ校にて研究に従事した。非従来型超伝導に関連する研究として、トポロジカル絶縁体に電子間引力相互作用を導入した際に発生するクーペロン励起およびその凝縮状態の性質に関する研究と、新たに見つかった超伝導体 SrPtAs の研究をスタートした。これらふたつに共通するのは、電子対凝縮に対するトポロジカルなスピン軌道相互作用の役割である。以下、それぞれの研究経過についてご紹介する。

トポロジカル絶縁体におけるクーペロン

冒頭にもあるように超伝導は金属を冷やすことにより発生する現象で、金属が金属たるゆえんであるフェルミ面が存在すれば、原理的には無限小の引力相互作用でも絶対零度では必ず超伝導になる。ところがフェルミ面のない絶縁体においても、十分に温度を下げ電子間の引力相互作用を大きくしていくと、

「クーペロン」と呼ばれる2電子束縛状態が現われはじめ、引力相互作用が臨界値を越えるとクーペロンが凝縮し、超伝導と変わらない状況が発生する(P. Nozieres and F. Pistolesi: Eur. Phys. J. B **10** (1999) 649)。クーペロンは、強相関電子系の難題のひとつである銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態を理解するために導入された重要なアイデアの中のひとつである。クーペロンやその凝縮した状態（超伝導状態）の性質をより広く深く理解するために、擬ギャップ状態以外の状況もいろいろ議論しておくというのは、一つのやりかたと思われる。ひいてはそこからのフィードバックとして、擬ギャップ状態のより深い理解が得られるかもしれない。

ところで絶縁体というと、電子論的には不活性で一見なにも面白くなく思えるが、近年では絶縁体は絶縁体でも単なる絶縁体ではなく、トポロジカル絶縁体と呼ばれるものが盛んに議論されている。トポロジカル絶縁体ではスピン軌道相互作用が根本的に重要な働きをして、電子の波動関数が運動量空間において非自明なトポロジー的構造を持ち、バルク（試料内部）では絶縁体的であるがエッジや表面ではバリステックな伝導性を持つ点が顕著な特徴である。このことから、スピンの良い量子数として定義される場合は量子スピンホール効果が引き起こされる。我々は（共同研究者: M. Sigrist 教授, 土屋俊二博士, 荒畑恵美子博士）、トポロジカル絶縁体におけるクーペロン励起及びその凝縮状態を、蜂の巣格子上の Kane-Mele 模型^{*}（^{*}トポロジカル絶縁体の標準的な模型。スピン軌道相互作用によりトポロジカル秩序が与えられている）を用いて議論した。すなわち絶縁状態のトポロジカルな秩序（スピン軌道相互作用）が、クーペロン励起やその凝縮状態に対してどのような影響を与えるか系統的に調べた。クーペロンが非従来型の対波動関数で表される状況を考慮するために、次々近接サイト間までの拡張引力ハバード相互作用を考える。そして2電子問題（クーペロン問題）の検討、クーペロン凝縮転移温度近傍における線形化ギャップ方程式の解析、絶対零度におけるギャップ方程式の解析など複数の相補的な解析を行っ

た結果、この系では電子のスピン自由度、蜂の巣格子の副格子構造、およびエネルギーバンドに現われるバレー構造が、トポロジカルなスピン軌道相互作用を通して非自明なカタチで混じり合い、以下のような選択則が得られることが解った：同一サイト上と次々近接サイト間相互作用すなわち同一副格子間に働く引力は、スピン一重項状態を安定化する。それに対し次近接サイト間相互作用すなわち異なる副格子間に働く引力は、スピン三重項状態を安定化する(S. Tsuchiya, J. Goryo, E. Arahata, and M. Sigrist, in preparation)。スピン三重項状態とはスピン自由度を持つ電子対状態のことで、超伝導でも興味深い研究対象として知られている。スピン三重項状態がトポロジカルなスピン軌道相互作用、実空間の副格子自由度、および運動量空間のバレー自由度の組み合わせにより安定化されるという指摘は、非自明である。

先述のとおり、この系では励起ギャップのないエッジ状態が、ギャップの開いたバルク状態のトポロジーにより保護された形で存在する。このため相互作用を強めるか温度を下げると、はじめにエッジ領域でクーペロン凝縮が起こりその後バルクへ浸透して行くという、興味深い状況が生じることが予想される。また、バルクおよびエッジで現われる凝縮状態の波動関数の対称性は同じなのか違うのか、互いにどのように影響しあうのかなど、トポロジカル絶縁体特有の様々な非自明な問題も浮かび上がり、解明されるであろう。我々はこの問題について、ボゴリウボフ・ドジャン方程式を用いたセルフ・コンシステントな数値解析を行っている。さらには Kane-Mele 模型のみならず、異なる格子上のトポロジカル絶縁体や3次元系への拡張も考え、より一般的・統一的な立場からの理解を深めて行きたい。

局所的に反転対称性を破る系 SrPtAs

この超伝導体は2011年に岡山大学の野原教授のグループにより発見され、転移温度が2.4ケルビンであることが電気抵抗及び磁化率の測定から示されている(Y. Nishikubo et al J. Phys. Soc. Jpn. 80, 055002(2011))。SrPtAs の単位胞には PtAs 面が2枚存在しており、

これらが電気伝導を担っている。一面だけ取り出してみるとチェッカーボード形の三角格子構造を持っていることから、反転対称性が存在しないことが解る。しかし上面と下面の関係をみてみるとちょうど Pt と As を入れ換えた関係になっているため、単位胞の中心が反転対称点となっていることが解る。すなわち、大局的な意味では反転対称であるが、伝導面に限ってみて見ると局所的に反転対称性が破れている。大局的に反転対称性が破れた系ではそれに応じて反対称なスピン軌道相互作用が電子系に誘起されることが知られている。ラシュバ項やドレッセルハウス項と呼ばれるものがその典型例である。その類推として局所的に反転対称性が破れた場合は、局所反対称なスピン軌道相互作用があらわれることが解る。実際に CePt₃Si の人工格子系において、交替ラシュバスピン軌道相互作用項が現われることが指摘された(D. Maruyama, M. Sigrist, and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 034702 (2012))。SrPtAs についても第一原理計算によりいち早くこの可能性が調べられ、やはり局所反対称な、しかし交替ラシュバ型とは異なるタイプのスピン軌道相互作用が誘起されることが示された(S.J. Youn, et al, Phys. Rev. B 85, 220505(R) (2012))。強束縛近似、すなわち電子が結晶格子上を飛び移るという描像を用いた場合、このスピン軌道相互作用の大きさは面内の最近接格子点間ホッピングの強さ t の約10%程度と、大きな値をとることが解っている(t との比較で相互作用項の大小を比較するのは強束縛模型の慣例である)。注目すべき点は、このスピン軌道相互作用は前節で議論した Kane-Mele 模型のトポロジカルなスピン軌道相互作用と一致する、という点である。Kane-Mele 模型とは異なり SrPtAs は金属であるため、量子化は起こらないもののスピンホール効果が発生することが示される。そしてこのスピンホール金属に磁場をかけると、異常ホール効果、すなわちホール伝導度に対しサイクロトロン運動のみならずゼーマン分裂も寄与する、ということが解る。

超伝導状態におけるクーペー対の波動関数の対称性については、群論的な考察及び一般的な電子間引

力を用いた線形化ギャップ方程式の解析[誌上発表欄 1]、さらに精密化を試みた汎関数繰り込み群による解析[同 2]を行った。その結果、 $d_{x^2-y^2}+id_{xy}$ -波あるいは **chiral d -波状態**と呼ばれる時間反転対称性を破るトポロジカルな超伝導状態が現われることを理論的に示した。さらに正確に述べると、局所的空間反転対称性の破れの効果により、**chiral d -波**に対して **chiral p -波状態**と呼ばれる別の時間反転対称性を破るトポロジカルな超伝導状態が混ざること、先に述べた群論的考察から結論される。しかし混合の割合はいろいろなパラメタに依存し、大きな混合を得るには最適化されたパラメタの組み合わせが必要となってくる。これらの理論的指摘に対し、 μ SR の実験によって超伝導状態における内部自発磁場が観測され[誌上発表欄 3]、**chiral d -波状態**は非常に強く支持されている。そして核スピン-格子緩和時間の温度依存性の測定からも、**chiral d -波**と矛盾しない結果が得られている(P. Brückner et al, arXiv:1312.6166)。ただし他の理論グループにより f -波の可能性も指摘されており(W.-S. Wang et al, arXiv:1312.3071)、今後さらなる議論が必要な段階である。

ところで、金属状態で特異なスピン伝導が見られている状況でカイラルな超伝導状態が出現すると、通常は電荷（注：超伝導では電荷は良い量子数ではないが便宜上そう呼ばせていただく）のみを運ぶカイラル・エッジ状態が、同時にスピンも運ぶということが、**chiral p -波超伝導体 Sr_2RuO_4 の 2-バンドモデル**において示されている(Y. Imai, K. Wakabayashi, and M. Sigrist, PRB **85**, 174532 (2012))。SrPtAs も金属状態でスピンホール効果が生じるため、**chiral d -波超伝導状態**が発現すると電荷とスピンを同時に運ぶエッジ輸送現象が起こる可能性があり、現在議論を進めているところである。

おわりに

スイス連邦工科大学チューリッヒ校に滞在中に始めた研究の成果、および現在の進行状況に関して述べて来た。滞在が終了し日本に帰国した後も、継続して連邦工科大の Sigrist 教授のグループと様々な議論を進めている最中である。このような継続的な研究交流の機会を与えていただいた貴財団へ、ここに深謝の念を表したい。また、渡航に際して叱咤激励いただいた諸先生、および家族に対しても、感謝

の念を禁じ得ない。よりよい成果を挙げてせめてもの恩返しが出来ればと切に願いつつ、今後も精進していく所存である。

研究の発表

口頭発表

1. Jun Goryo and Manfred Sigrist, “Cooperon pairing channels in the honeycomb lattice system with spin-orbit coupling” 2011 Japan Swiss workshop on New Electronic Properties through Structure and Correlation, Zurich, Sep. 16, 2012 (invited)
2. Jun Goryo and Manfred Sigrist, “Unconventional pairings in Kane-Mele model”, Novel Quantum States in Condensed Matter: Correlation, Frustration, and Topology, Kyoto, Nov. 28, 2012.
3. Jun Goryo, Mark H. Fischer, and Manfred Sigrist “Possible pairing symmetries in SrPtAs” Swiss-Japan Workshop 2012, Current Topics in Theory of Correlated Materials, Wako, Japan, Sep. 12, 2012 (invited)
4. 御領潤, M.H. Fischer, M. Sigrist “SrPtAs の超伝導対称性”, 日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、横浜市、2012 年 9 月 19 日

誌上発表

1. J. Goryo, M. H. Fischer, and M. Sigrist, “Possible pairing symmetries in SrPtAs with a local lack of inversion center”, Physical Review B **86**, 100507(R) (2012)
2. P. K. Biswas, H. Luetkens, T. Neupert, T. Stuerzer, C. Baines, G. Pascua, A. P. Schnyder, M. H. Fischer, J. Goryo, M. R. Lees, H. Maeter, H.-H. Klauss, M. Sigrist, A. Amato, and D. Johrendt, “Evidence for superconductivity with broken time-reversal-symmetry in locally noncentrosymmetric SrPtAs” Phys. Rev. B **87** 180503(R) (2013)
3. M. H. Fischer, T. Neupert, C. Platt, A. P. Schnyder, W. Hanke, J. Goryo, R. Thomale, and M. Sigrist, “Chiral d-wave superconductivity in SrPtAs”, Phys. Rev. B **89** 020509(R) (2014)