

計画研究 A01

時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

前野 悦輝 / 京都大学大学院理学研究科 教授

研究計画 A 01 「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」の目的は、電子のスピンの活性によって時間反転対称性が破れた超伝導体のバルク物性の理解を極め、その界面や表面で顕在化する新奇な量子現象を開拓することである。具体的にはスピン三重項超伝導体の実験的証拠の揃ったルテニウム酸化物を舞台とする研究、また従来型の超伝導体と強磁性体とのハイブリッド構造体を舞台とする研究を展開する。ルテニウム酸化物の超伝導についてはレビュー論文を発表した [1]。以下では今年度の主な成果からいくつかのトピックを選んで紹介する。

1. Sr_2RuO_4 のエッジ状態

時間反転対称性の破れた「カイラル」 p 波超伝導体は典型的な「トポロジカル超伝導体」の一つである。ルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 は、これまでの研究からカイラル超伝導状態が実現している根拠が強く、そのバルク状態に対応して界面にはカイラル・エッジ電流をともなうエッジ状態が現れると期待されていた。柏谷 (A01 分担者) らは、 Sr_2RuO_4 の微小単結晶に金を蒸着して微細加工技術を駆使することで、良質の SIN (超伝導体 / 絶縁体 / 常伝導体) 接合を作って 図 1(a) に示すような準粒子トンネルスペクトルを観測することに成功した [2]。いくつかの特有のスペクトル形状のゼロバイアス・コンダクタンスピーク (ZBCP) が得られたが、マルチバンドを考慮した解析の結果、それらがすべてギャップ内のエネルギーに広く分布する準粒子状態密度を反映したものであり、カイラル・エッジ状態として解釈できることを明らかにした (図 1(b))。これと対照的に、 d 波超伝導体の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ では、電流が [110] 方向のときのみ

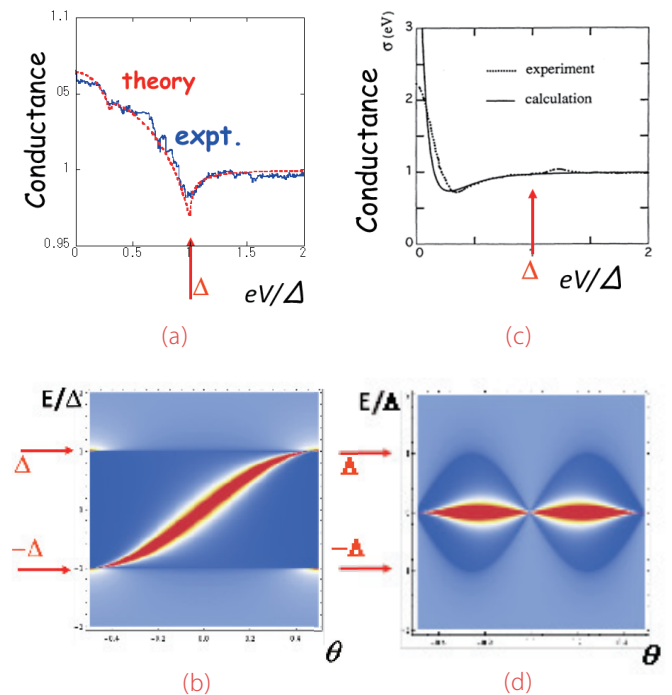


図 1 : (a) Sr_2RuO_4 を用いた SIN 接合の 0.55 K におけるコンダクタンス・スペクトル。超伝導ギャップの中に幅広く状態密度が生じている。(b) カイラル p 波超伝導体のカイラル・エッジ状態の分散関係。(c) 高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の接合の 3 K におけるスペクトル。コンダクタンス・ピークのエネルギーは超伝導ギャップより小さな範囲にとどまる。(d) d 波超伝導体で期待されるフラットバンド・エッジ状態の分散関係。[2] より。

超伝導ギャップエネルギーに比べて非常に小さなエネルギー幅で ZBCP が生じる (図 1(c))。実はこれも 図 1(d) に示すような「フラットバンド・エッジ状態」として、バルク・エッジ対応で理解できる状態である [3]。

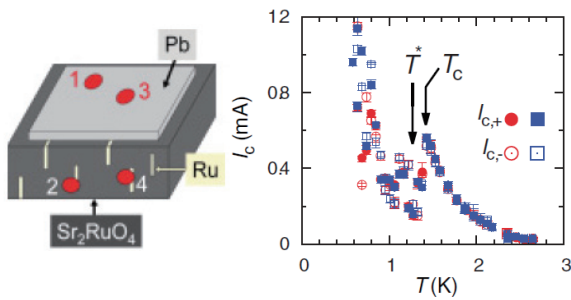


図2: (a) Ru を介した Sr_2RuO_4 と Pb の SNS' 接合。 Sr_2RuO_4 の表面の性質から、Pb は Ru 析出物のみを通じて Sr_2RuO_4 と接合している。 (b) 特異な温度依存性を示す臨界電流。

2. トポロジカル超伝導接合

Sr_2RuO_4 と従来型超伝導体の接合素子における臨界電流の特異な振る舞いは 10 年以上前に報告されていた。本領域での研究から、この現象を生み出す素子配置は以前の認識とは異なる図 2(a) に示すもので、 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶結晶中の Ru を介して両超伝導体が干渉していることが明らかになった [4]。すなわち仲介する Ru 金属によって接合面が一周して閉じた形状になっていることが重要で、その周りの超伝導位相の巻き付き数によって図 2(b) のような臨界電流の振る舞いが記述できる。

Sr_2RuO_4 の超伝導は、Ru との共晶界面付近で臨界温度 $T_c=3$ K 程度まで上昇するが、転移温度付近では通常の p 波状態で、その超伝導位相の巻き付き数は図 3(a) のように Ru に近接効果で誘起された s 波と同じと考えられる。ところが 1.5 K 以下での Sr_2RuO_4 のバルク超伝導転移と共に、接合界面の超伝導にも図 3(b) のように位相巻き付き数が非自明な数となる転移が起こり、それが臨界電流の著しい低下をもたらすと説明できる。さらに低温では図 3(c) のような s 波の波動関数の位相歪によって、 p 波と s 波の間での干渉が弱まることで、臨界電流が再び上昇する振る舞いも理解できる。この位相干渉効果のシナリオから「トポロジカル超伝導接合」という概念が生まれる。このように Sr_2RuO_4 のカイラル p 波超伝導状態に対して、それに付随する現象によって実証が深まったといえる。

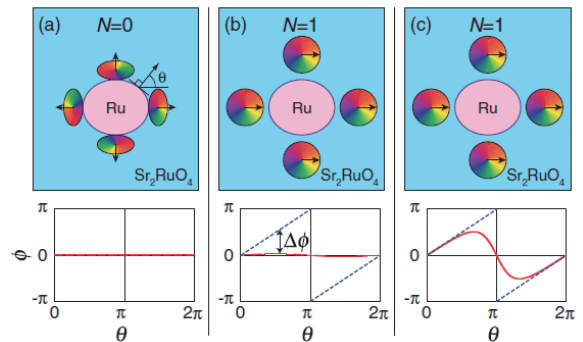


図3: (a)-(c) 温度低下に伴って変化する Sr_2RuO_4 と Ru の超伝導位相。 Sr_2RuO_4 のバルク超伝導が起こると Ru 周りの位相巻き付き数が $N=0$ (a) から 1 (b, c) へと変化する。

3. 半整数フラクソイドに対応する磁束の飛び

光学カンチレバーによる Sr_2RuO_4 の微小結晶リングの高感度磁化測定により、通常の整数フラクソイドの量子化に加えて、半整数フラクソイドに対応する磁化の飛びが観測された [5]。イコール・スピン・ペアリング (ESP) のスピン三重項超伝導で予想される半整数量子渦に関連した状態の生成と期待され、マヨラナ型準粒子などのトポロジカル励起の実現が期待される。

4. 奇周波クーパー対の示す異常な表面インピーダンス

超伝導体の表面インピーダンス ($Z = R - iX$) は、磁場侵入長の決定などに用いられる。実部レジスタンス (R) は準粒子の抵抗を表し、虚部リアクタンス (X) は電磁場に対する凝縮体の応答を表す。浅野 (A01 分担者) らは金属とスピン三重項超伝導体の NS 接合では、金属中に近接効果でスピン三重項 s 波、すなわち奇周波数クーパー対が浸み出し、図 4 に示すように通常とは逆の $R > X$ の振る舞いが低温・低周波数領域で現れることを示した [6]。この特異な表面インピーダンスは、スピン三重項超伝導体の判定に有力な手段として期待される。

5. 超伝導体と強磁性体の接合での奇周波対状態

散逸のある金属中に浸み出す s 波のスピン三重項ペアリングに加えて、スピン一重項 s 波超伝導体から強磁性体中に浸み出すスピン三重項 s 波ペアリングも奇周

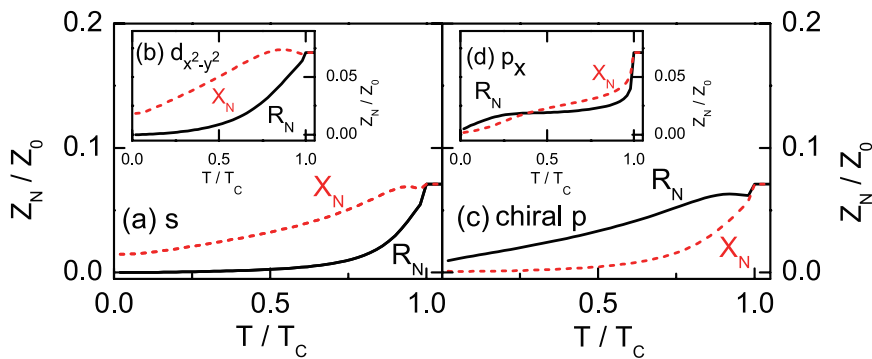


図4: 金属 / 超伝導体 (NS) 接合の表面インピーダンス。カイラル p 波超伝導体の場合にのみ、レジスタンス R がリアクタンス X より大きくなる異常が予想される [6]。

波超伝導状態で、これらの実証が待たれる。赤崎 (A01 分担者) らは強磁性半導体と s 波超伝導体の接合でこの観測を試みてきた [7]。最近はさらに、強磁性体から常磁性半導体の 2 次元電子ガス (2DEG) にスピン偏極キャリアを注入することで、 s 波超伝導体 / 半導体 / 強磁性体 (S/Sm/F) 接合でも奇周波数ペアリングが現れるかどうかを検証するため、ZBCP の観測を通じて測定を進めている。

6. その他の成果

このほかの研究活動についていくつかふれると：米澤 (A01 連携研究者) らは Sr_2RuO_4 の小さな結晶を用いての熱磁気効果・磁場中比熱の測定を進めており、上部臨界磁場付近での超伝導転移の詳細を明らかにしつつある。また住山 (A01 連携研究者) らは、ウラン化合物のスピン三重項超伝導体と従来型 s 波超伝導体の SNS' 接合を用いて、ジョゼフソン電流の選択則から秩序変数 d ベクトルの方位確定を進めている。神田 (A01 連携研究者) らは、グラフェンの電子状態のディラック点に起因する新奇現象を開拓するため、超伝導体や強磁性との接合において問題となるフェルミ面ピン止め効果を軽減するための素子構造の研究を進めている。

[1] "Evaluation of spin-triplet superconductivity in Sr_2RuO_4 ",

Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, K. Ishida,

J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011009-1-29 (Jan. 2012).

[2] "Edge states of Sr_2RuO_4 detected by in-plane tunneling spectroscopy",

S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, Y. Maeno,

Phys. Rev. Lett. 107, 077003-1-4 (Aug. 2011).

[3] "トポロジカル超伝導現象", 佐藤昌利, 柏谷聡, 前野悦輝, 固体物理 46, 479-491 (Sep. 2011).

[4] "Topological competition of superconductivity in Pb/Ru/ Sr_2RuO_4 junctions",

T. Nakamura, R. Nakagawa, T. Yamagishi, T. Terashima, S. Yonezawa, M. Sigrist, Y. Maeno,

Phys. Rev. B 84, 060512(R)-1-4 (Aug. 2011).

[5] "Observation of half-height magnetization steps in Sr_2RuO_4 ",

J. Jang, D.G. Ferguson, V. Vakaryuk, R. Budakian, S.B. Chung, P.M. Goldbart, Y. Maeno,

Science 311, 186-188 (Jan. 2011).

[6] "Unconventional surface impedance of a normal-metal film covering a spin-triplet superconductor due to odd-frequency Cooper pairs",

Y. Asano, A. A. Golubov, Y. V. Fominov, Y. Tanaka,

Phys. Rev. Lett. 107, 087001-1-4 (Aug. 2011).

[7] "Evaluation of spin polarization in $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ using Andreev reflection spectroscopy including inverse proximity effect",

T. Akazaki, T. Yokoyama, Y. Tanaka, H. Munekata, H. Takayanagi,

Phys. Rev. B 83, 155212-1-9 (Apr. 2011).