

(1) 研究室のスタッフ

田仲由喜夫(教授) 川口由紀(准教授) 矢田圭司(助教) 山影相(特任助教) 小林伸吾(特任助教)

(2) 研究室の簡単な紹介

凝縮系物理の理論研究を行っているグループで、超伝導を始めとする量子物理を研究対象にしている。超伝導の理論に関しては、接合系の理論(トンネル効果、ジョセフソン効果、近接効果)、新奇な対称性を持つ電子対、超伝導発現機構、トポロジカル超伝導の研究を行っている。こうした研究だけではなく、冷却原子気体、磁性体におけるスカーミオン、トポロジカル絶縁体・半金属、シリセン・スタネンなどの単原子層物質の理論研究も行われている。

(3) これまでの成果、最近のトピックス

90年代に、銅酸化物超伝導体の対称性が議論された際に、トンネル分光、ジョセフソン効果の研究を行い、銅酸化物超伝導体の対称性が d 波であることを確定させる上で貢献を行った。トンネル分光は、超伝導体の位相の検出は不可能な分光手法として永らく信じられていた。我々は銅酸化物超伝導体のトンネル分光の研究を通して、異方的超伝導体トンネル接合の微分コンダクタンスの一般式を導出して、銅酸化物超伝導体トンネル分光に現れる零電圧コンダクタンスピーク(ZBCP)の起源が、零エネルギーアンドレーエフ束縛状態であること明らかにした[1]。また零エネルギーアンドレーエフ束縛状態の効果を取り入れた異方的超伝導体接合のジョセフソン効果の理論を構築して、ジョセフソン電流が非単調な温度依存性を示し、2次のオーダーの $\sin(2\phi)$ 項が増大すること、さらに零エネルギーアンドレーエフ束縛状態による共鳴効果が非常に強い場合には $\sin(2\phi)$ 的な異常な位相依存性を示すことを明らかにした。[2,3]。これらの研究成果は、マヨラナフェルミオンをエッジ状態(表面束縛状態として持つ)として持つトポロジカル超伝導体のトンネル効果へと発展した[4]。

一方超伝導の対称性に関して重要な貢献を行った。クーパー対の対称性は、通常スピン一重項偶パリティ(s 波、 d 波等)とスピン三重項奇パリティ(p 波等)に分類されているが、それに加えてスピン一重項奇パリティあるいはスピン三重項偶パリティを有するペアも原理的には存在可能であることが知られていた。後者のペアを記述するペア関数は、2電子の時間の入れ替えに関して奇関数であることから奇周波数クーパー対と呼ばれている。我々は、アンドレーエフ束縛状態が必ず奇周波数クーパー対を伴うことを明らかにした[5,6]。常伝導金属・スピン3重項 p 波超伝導体接合において、奇周波数クーパー対が常伝導金属へ侵入し、準粒子状態密度に零エネルギーピークを形成するという異常な近接効果を予言した[7,8]。通常の超伝導体やそれに接合した金属は、そこに存在するクーパー対のために反磁性を示す事が知られている。しかし、奇周波数クーパー対はあたかも「負の超流動密度」を持ったように振る舞う[9]。その結果、奇周波数クーパー対が支配的な空間領域では、局所的に外部磁場を引き込む常磁性が観測される事が明らかになった[9-10]。奇周波数クーパー対は、並進対称性やスピン回転対称性などの対称性の破れにより、超伝導接合系や磁場下の超伝導体に遍く存在し、これらの系の示す特徴的な物理現象は、奇周波数クーパー対の形成という概念を用いて統一的に理解できることを明らかにしたことになる。

こうした研究に加えて、最近では超伝導トポロジカル絶縁体のトンネル効果[11]、超伝導トポロジカル結晶絶縁体[12]、超伝導ワイル半金属のアンドレーエフ束縛状態[13]といった問題に取り組んでいる。また奇周波数クーパー対とマヨラナフェルミオンの関係も明らかにされた。マヨラナフェルミオンは奇周波数クーパー対の特殊な姿であり[14]、マヨラナフェルミオンのために起きる完全共鳴トンネル効果は、奇周波数クーパー対が引き起こす異常近接効果そのものであることが理解されている[7,8,14]。

多バンド効果の入ったトンネル効果、ジョセフソン効果、単原子層物質の超伝導発現機構、マヨラナフェルミオンの持つイジングスピン、強磁性体・超伝導体接合とスピン軌道相互作用、超伝導 Dirac 半金属、3次元カイラル超伝導体のトンネル効果とアンドレーエフ束縛状態、トポロジカル絶縁体上の超伝導接合、2重量子ドットにおける奇周波数クーパー対といった問題が最近の研究テーマである[15]。

[1] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. Lett. **74** 3451 (1995).

[2] S. Kashiwaya and Y. Tanaka, Rep. Prog. Phys. **63** 1641(2000).

[3] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B **56** 892 (1997).

[4] Y. Tanaka, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **103**, 107002 (2009)

[5] Y. Tanaka, S. Kashiwaya et al, Phys. Rev. Lett., **99**, 037005 (2007).

[6] Y. Tanaka, Y. Tanuma and A. A. Golubov, Phys. Rev. B, **76**, 054522 (2007).

[7] Y. Tanaka and A. A. Golubov, Phys. Rev. Lett. **98**, 037003 (2007).

[8] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B, **70**, 012507 (2004).

[9] Y. Tanaka, Y. Asano, et al, Phys. Rev. B, **72**, 140503, (2005).

[10] T. Yokoyama, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett., **107**, 087001, (2011).

[11] A. Yamakage, K. Yada, M. Sato and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **85** 180509 (2012).

[12] T. Hashimoto, K. Yada, M. Sato and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **92** 174527 (2015).

[13] Bo Lu, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **114**, 096804 (2015).

[14] Y. Asano and Y. Tanaka, Phys. Rev. B, **87**, 104513 (2013).

[15] <http://www.rover.nuap.nagoya-u.ac.jp/publications.htm>