

H28 年度第 7 固体物理セミナー報告書

日 時： 2016 年 10 月 6 日(木) 14 : 40 ~ 16 : 10

場 所： 基礎工講義棟 B105

講師名： 田仲 由喜夫 教授

講師所属： 名古屋大学工学研究科

講演タイトル： 「奇周波数クーパー対の物理 (最近の理論研究について)」

参加者： 50 名

要旨：「クーパー対は2つの電子のペアで、ペア振幅という物理量で特徴づけられる。2電子の時刻の入れ替えに関して奇関数になるクーパー対を奇周波数ペアと呼ぶ。偶周波数ペアがスピン 1 重項偶パリティ、スピン 3 重項奇パリティであるのに対して、奇周波数ペアはスピン 3 重項偶パリティ、スピン 1 重項奇パリティとなる。

奇周波数クーパー対の研究は、1) バルクの超伝導状態としてペア振幅だけでなくギャップ関数(それに関連した秩序)が存在するのか、すなわち奇周波数超伝導体が存在するのか 2) バルクの超伝導(主たる超伝導)状態は、従来から知られている偶周波数ペアであるが対称性の破れにより奇周波数ペア振幅(ペア相関)が混在する(誘起される)のかという2つの大きな流れに分かれる。

1)に関してはBerezinskiiの研究以降[1]、強相関電子系で多くの研究が今日までになされている[2]。特に最近の2チャンネル近藤格子における計算は微視的ハミルトニアンに基づいて低温まで計算されている点で注目できる[3]。2)に関しては、強磁性接合で奇周波数ペアの存在がEfetovらにより指摘された。[4]一方で我々は、不均一系において並進対称性の破れに伴い遍く奇周波数ペアが存在することを明らかにした[5]。スピン3重項超伝導体接合の異常近接効果は、スピン3重項奇周波数ペアに起因すること[6]、アンドレーエフ束縛状態は奇周波数クーパー対を必ず伴うこと[7]、異方的超伝導体に現れる表面アンドレーエフ束縛状態[8]は、奇周波数クーパー対で記述できることを明らかにした[5,7,9]。またRashba ナノワイヤー・s波超伝導体接合系などの1次元的トポロジカル超伝導では、マヨラナフェルミオンがエッジに現れることが知られているが[10]、マヨラナフェルミオンが存在する時には必ず奇周波数s波のクーパー対がエッジに現れることを示した[11]。奇周波数ペアはパラマグネティックな磁気応答を示し[12]、今日トポロジカル超伝導を理解するうえで奇周波数クーパーペアという概念は非常に重要になっている[8,13]。

この発表では、これまでのバックグラウンドを紹介した後、最近の2つの成果を紹介したい。1つ目の成果は、2重量子ドットとs波の接合に関する研究である。この系においては、クーパー対が2つの量子ドットに相関を持ちながら分裂して近接効果をしなごら浸入することが知られているが、ここでドットと電極の結合を制御することで奇周波数ペアの振幅を大きくできることを理論的に示した。特に非局所コンダクタンス測定を行い低電圧のコンダクタンスの符号により奇周波数ペアの検出ができることを明らかにした[14]。

2つ目の成果は2チャンネル近藤格子接合の理論である[15]。2チャンネル近藤格子においてはバルクの自己エネルギーに奇周波数ギャップ関数が現れる。2チャンネル近藤格子系の超伝導はバルクではディアマグネティックな応答を示す[3]。この系とKitaevモデルのような奇周波数s波のペアをエッジ状態として持つ系のジョセフソン効果を計算した。互いに異なる磁気応答の性質の奇周波数ペアの存在する系の接合であるが2チャンネル近藤格子はハミルトニアン形式で定式化することができたために、ジョセフソン電流は実数の量として求めることができた[16]。

奇周波数クーパー対の研究は、メゾスコピック超伝導・超流動、トポロジカル超伝導・超流動、そして強相関電子系の問題としてさらに発展するものと思われる。

[1]V. L. Berezinskii, JETP Lett. 20, 287 (1974).

[2] T. R. Kirkpatrick and D. Belitz, Phys. Rev. Lett. 66, 1533 (1991); A. Balatsky and E. Abrahams, Phys. Rev. B 45, 13125 (1992); V. J. Emery and S. Kivelson, Phys. Rev. B 46, 10812 (1992); Y. Fuseya, H. Kohno, and K. Miyake, J. Phys. Soc.

- Jpn. 72, 2914 (2003); K. Shigeta, S. Onari, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 79, 174507 (2009); T. Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 123710 (2009); H. Kusunose, Y. Fuseya, and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 054702 (2011).
- [3] S. Hoshino, Phys. Rev. B 90, 115154 (2014); S. Hoshino and Y. Kuramoto, Phys. Rev. Lett. 112, 167204 (2014).
- [4] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, Rev. Mod. Phys. 77, 1321 (2005).
- [5] Y. Tanaka, A. A. Golubov, S. Kashiwaya and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 99, 037005 (2007).
- [6] Y. Tanaka and A. A. Golubov, Phys. Rev. Lett. 98, 037003 (2007).
- [7] Y. Tanaka, Y. Tanuma, and A. A. Golubov, Phys. Rev. B 76, 054522 (2007).
- [8] S. Kashiwaya and Y. Tanaka, Rep. Prog. Phys. 63, 1641 (2000).
- [9] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011013 (2012).
- [10] R. M. Lutchyn, T. Stanescu, and S. D. Sarma, Phys. Rev. Lett. 106 127001 (2011); Y. Oreg, G. Refael, and F. von Oppen, Phys. Rev. Lett. 105 177002 (2010); M. Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto: Phys. Rev. Lett. 103 020401 (2009).
- [11] Y. Asano and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 87, 104513 (2013).
- [12] S. Higashitani, J. Phys. Soc. Jpn. 66, 2556 (1997); Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 72, 140503 (2005); T. Yokoyama, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 106, 246601 (2011); S. Suzuki and Y. Asano, Phys. Rev. B 91, 214510 (2015).
- [13] T. Mizushima, Phys. Rev. B 90, 184506 (2014); M. Sato and D. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 072001 (2016).
- [14] P. Burset, Bo Lu, H. Ebisu, Y. Asano, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B, 201402 (2016).
- [15] S. Hoshino, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 93 224511 (2016).
- [16] Y. V. Fominov, Y. Tanaka, Y. Aasno, and M. Eschrig, Phys. Rev. B 91, 144514 (2015).

<主催した先生からの感想>

名古屋大学工学研究科の田仲由喜夫教授を招き、「奇周波数クーパー対の物理」というタイトルで、エキゾチック超伝導研究の最前線について講演していただいた。奇周波数クーパー対とは通常のバルク物質で実現している超伝導クーパー対とは異なる対称性を持つクーパー対であり、その超伝導特性も質的に異なることが期待されている。その具体例として、奇周波数クーパー対は常磁性的なマイスナー効果を引き起こすことが紹介された。このような磁場を取り込む異常な性質は通常のバルク超伝導体では実現し得ないが、超伝導接合系の界面などでは異常近接効果として現われ得ることが紹介された。ここで重要となるのが「アンドレーエフ束縛状態」であり、「奇周波数クーパー対」という概念はアンドレーエフ束縛状態の物理を含んだより一般的な概念である。講演では、最近の物性物理の大きな潮流である「トポロジカル超伝導の物理」と「奇周波数クーパー対の物理」との接点についても紹介され、超伝導界面などにおける奇周波数クーパー対の発現の背後には深遠なトポロジカル構造が存在することが議論された。このことから、奇周波数クーパー対を内在する超伝導系は、新奇な超伝導現象についての基礎研究の舞台としてだけでなく、トポロジカル量子コンピュータなどの実現に向けたデバイスの可能性を秘めている。

講演には 50-60 名ほどの参加があり、講義室がほぼ満室になるほどに盛況であった。講演後には「奇周波数クーパー対の物理」というエキゾチックなクーパー対が引き起こす新奇超伝導現象について活発な質疑が繰り返された。

(基礎工学研究科 准教授 水島 健)



講義の様子