



● 第7回集中連携研究会

2011年9月8日・9日・10日(名古屋大学大学院工学研究科)

超伝導のクーパーペアの波動関数(ペア振幅とも呼ばれる)は、表1に示されるように、2電子の入れ替えに関して反対称である。スピンの入れ替えで反対称のものをシングレット、対称のものをトリプレット、座標の入れ替えに関して対称のものを偶パリティ(*s*波*d*波など)反対称のものを奇パリティ(*p*波など)と呼ぶ。よく知られているクーパーペアは、時間の入れ替えすなわち周波数(松原周波数)に関しては偶関数で、偶周波数スピン1重項偶パリティ(ESE)ペアと偶周波数スピン3重項奇パリティ(ETO)ペアである。しかしフェルミ統計に基づけば、奇周波数スピン3重項偶パリティ(OTE)ペアと奇周波数スピン1重項奇パリティ(OSO)ペアが存在することが許される。(表1)

最近の研究で、奇周波数クーパー対は不均一な超伝導体に普遍的に存在することが理論的に確立した[1-2]。また強相関電子系において、バルクの状態においてさえも存在の可能性があることがいくつかの理論で指摘されている。本集中連携研究会の目的は、奇周波数クーパー対に関して、理論研究の現状を共有してどのようにして検出すればいいのか、理論的に何をすればいいのか、未解明な新奇な概念の探索などを討論することであった。(1)強磁性性接合における奇周波数電子対(2)スピン3重項超伝導の異常近接効果(3)超流動ヘリウム3エアロジェル(4)奇周波数ギャップ関数(5)関連した話題 について集中的

に討論した。

初日は、田仲による奇周波数クーパー対のオーバービューの後、強磁性体/超伝導体接合系を中心に討論された。浅野による現状のレビューの後、実験では赤崎(磁性半導体接合)、神田(グラフェン接合)、理論では浅野(現状のまとめ)、横山(異常磁気応答などの最近の進展)の講演が行われた。横山の講演では、常伝導・強磁性層・超伝導接合の磁気応答が巨大パラマグネティックマイスナー効果になるという顕著な内容であった。

2日目は、前半はスピン3重項超伝導のトンネル効果(柏谷)、近接効果の実験(中村、石黒)、理論(浅野)の現状が紹介された。浅野は奇周波数クーパー対が作り出す異常近接効果が表面インピーダンスに異常を作り出すことを示した。午前後半は、低温STMの実験の現状が紹介された。花栗(銅酸化物の不均一性、磁束)、松井(超低温STM)の実験が紹介された。柏谷によるSr₂RuO₄におけるアンドレーエフ束縛状態(ABS)観測の実験の成果は顕著な成果で、長年実験の困難であったこの物質のABSが観測されたことは重要である。午後は、超流動ヘリウム3のセッションが行われ、東谷、水島が奇周波数と状態密度のユニークな関係を導いた。東谷は、零エネルギーの状態密度が零でないこと自体が、奇周波数クーパー対の存在を表していることを示すという重要な理論結果を指摘した。これは、不均一性が普遍的に奇周波数クーパー対を作り出すことをさらにはっきりさせた結果といえる。石川、野村からエアロジェルやマヨラナコーンの実験の

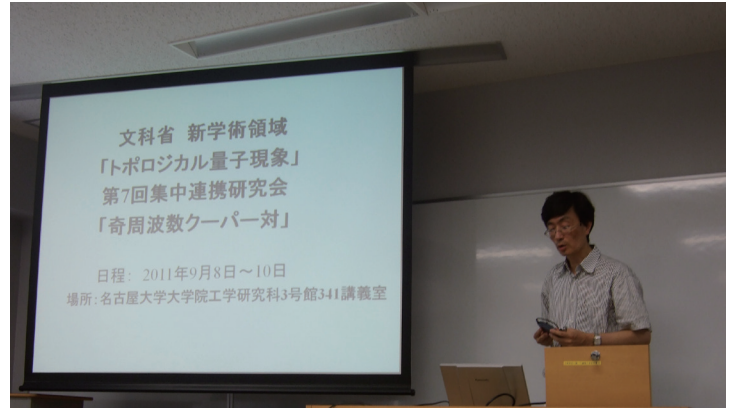
+ 対称, - 反対称

	周波数 (時間)	スピン	軌道	全体	超伝導状態
ESE	+(偶)	-(1重項)	+(偶)	-	金属超伝導 銅酸化物
ETO	+(偶)	+(3重項)	-(奇)	-	ヘリウム3 Sr ₂ RuO ₄
OTE	-(奇)	+(3重項)	+(偶)	-	バルクでは 未確認
OSO	-(奇)	-(1重項)	-(奇)	-	バルクでは 未確認

現状が報告された。

最終日は、前半は佐藤（エッジ状態の数理構造）、林（磁束系の奇周波数ペア）の講演が行われた。最後のセッションでは、バルクに現れる奇周波数ペアの講演が三宅、伏屋、重田によって行われ、バルクに存在する奇周波数ペアとエッジに局所的に形成されるそれとの違いが鮮明になった。特にバルクの系で長年懸案であったパラマグネティックマイスナー効果の問題は、汎関数積分理論により解決されるということが示されバルクの奇周波数ギャップ関数探索に勢いづける内容となった。

研究会の結果、アンドレーエフ束縛状態、奇周波数クーパー対、バルクエッジ対応の関係がかなり明確になり、研究の方向性、特に実験で明らかにすべきことなどについても議論が行われた。今回の集中連携研究会を開催した意義は極めて大きかった。研究会の結果、対称性の破れによってバルクの偶周波数ペア（ディアマグネティックな磁気応答を示す）から作られる奇周波数ペア（パラマグネティック）と自発的対称性の破れによってバルクに誘起される奇周波数ペア（ディアマグネティック）の2種類の奇周波数クーパー対の存在が可能であることが示された。2種のクーパー対の示す様々な性質の違いを対照させた理論研究は必要となると感じる。一方すでに知られている対称性の破れによって生じる奇周波数クーパー対の研究に関しては、異常近接効果による局所状態密度の零電圧ピーク、異常マイスナー効果、異常表面インピーダンスなど今後実験的に検証されるべき内容が数多くあ



る。最近赤崎のグループで観測されている強磁性体接合の零電圧ピークは奇周波数クーパー対の存在を示す実験的証拠となりつつあり、理論実験のさらなる研究が必要と思われる。最後に対称性の破れにより誘起された奇周波数ペア、アンドレーエフ束縛状態、トポロジカルに意味のあるバルクエッジ対応の結果得られるアンドレーエフ束縛状態、マヨラナフェルミオンの関係を以下の表にまとめる。

- [1] 田仲由喜夫 柏谷聡 物理学会誌 Vol. 64, No. 7 527 (2009).
- [2] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.81, No. 1 011013 (2012).

(文責、田仲 由喜夫)

