

Sr₂RuO₄ の D-ベクトルに対するミクロ理論¹

— スピン-軌道相互作用による縮退の分裂 —

東京大学 理学系研究科 柳瀬 陽一,² 小形 正男

Sr₂RuO₄ におけるスピン三重項超伝導を特徴づける内部自由度に対して、ミクロ理論の立場から研究を行った。これまでにスピン三重項超伝導の内部自由度に対しては、現象論に基づく解析が長く行われてきた。その一方で、ミクロなモデルに基づく研究はほとんど行われて来なかった。その理由の一つとして、以前から知られているスピン三重項超伝導体が UPt₃ などの重い電子系に限られ、その電子構造が非常に複雑であったことが挙げられる。Sr₂RuO₄ はそれらと比べて簡単な電子構造を持ち、ミクロな理論を発展させる対象として適した系であると考えられる。そのような研究により、スピン三重項超伝導に関する一般的な知見が新たに得られるだろう。

同時に、Sr₂RuO₄ では時間反転対称性が破れたカイラル状態 $\hat{d}(k) = (k_x \pm ik_y)\hat{z}$ にあると考えられており [2]、その安定化の条件はそれ自身が興味深いテーマである。今回、我々はスピン-軌道相互作用を含む 3-バンドハバードモデルから出発し、SU(2) 対称性が破れ D-vector が決定されるミクロなメカニズムを調べた。さらにカイラル状態が安定化される条件を明らかにすることで、この系の超伝導の対称性やメカニズムについても示唆が与えられた。

ここでは近似として、摂動論を用いて有効ペアリング相互作用を計算し、エリアシュベルグ方程式を解くことで最も安定な状態を決定した。これまでにスピン-軌道相互作用がない場合の結果として、三次摂動により P-波超伝導が導かれている [3]。この場合には全ての内部自由度は縮退している。二次摂動の範囲でも三重項超伝導は得られるが、軌道内斥力 U に関する三次項の運動量依存性は三重項超伝導に非常に有利であり、その絶対値がかなり小さい領域でも T_c の増大には重要な寄与をしていることが分かった。そのため、その後の計算では 4 種類のクーロン相互作用に関する二次摂動に加え、 U に関する三次項まで取り入れた。ただし、超伝導のメカニズムと D-vector を決定するメカニズムはほぼ独立であり、二次摂動の範囲で D-vector に関しては定性的に同じ結果が得られる。具体的には、三重項超伝導を安定化する項は U のみを含む項であり、カイラル超伝導を安定化する項はフント結合を含む項である。このことから、D-vector 空間の SU(2) 対称性の破れは、スピン空間のそれと比べてかなり小さいことも示唆される [1]。他に重要な結果として、以前、現象論的に提案された軌道依存超伝導 [4] がこの系では非常に robust であることが分かった。実際の物質に対応するパラメーター領域では γ -バンド が支配的である。

この計算の範囲内で、もともと六重縮退していた状態は (1) $\hat{d}(k) = k_x\hat{x} \pm k_y\hat{y}$, (2) $\hat{d}(k) = k_x\hat{y} \pm k_y\hat{x}$, (3) $\hat{d}(k) = (k_x \pm ik_y)\hat{z}$ の 3 つに分裂する。その中でもっとも安定な状態を図 1 に示し

¹ 詳しい内容は文献 [1] を参照

² E-mail: yanase@hosi.phys.s.u-tokyo.ac.jp

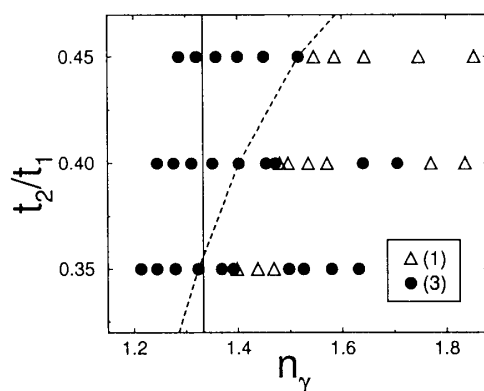


図 1: 摂動論において安定化される内部状態

た。横軸は γ バンドの粒子数であり、縦軸はそのフェルミ面の形を決めるパラメーターである。実験と比べて妥当な領域は $n_\gamma \sim 1.33$, $t_2/t_1 \sim 0.4$ であり、その領域でカイラル状態 (3) が安定化されることがわかる。つまり、摂動論の結果は実際の状況とコンシステントである。この場合の超伝導の対称性は P-波である。

	γ -band	α -, β -band
p -wave	$(k_x \pm ik_y)\hat{z}$	$k_y\hat{x} \pm k_x\hat{y}$
p -wave (with node)	none	$k_y\hat{x} \pm k_x\hat{y}$
$f_{x^2-y^2}$ -wave	$(k_x^2 - k_y^2)(k_y\hat{x} \pm k_x\hat{y})$	$(k_x^2 - k_y^2)(k_x\hat{x} \pm k_y\hat{y})$
f_{xy} -wave	$k_xk_y(k_x\hat{x} \pm k_y\hat{y})$	none

表 1: 超伝導の対称性および支配的なバンドに対してそれぞれ安定化される内部状態

上で述べたように、超伝導の対称性と D-vector はほぼ独立に決まるので、これまでに提唱された様々な対称性を仮定して、それぞれの場合に安定化される D-vector を調べることもできる。その結果を表 1 に示した。実はカイラル超伝導が安定化される場合はほとんどなく、今回調べた範囲では γ -バンド上の P-波超伝導の場合のみである。この対称性はメカニズムの観点から最も可能性が高いと考えられて来たが、今回の内部自由度に対する解析もこの状態を支持している。

参考文献

- [1] Y. Yanase and M. Ogata, To appear in J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) No.3.
- [2] Y. Maeno, T. M. Rice and M. Sigrist, Phys. Today, **54** (2001) 42.
- [3] T. Nomura and K. Yamada, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 1993.
- [4] D. F. Agterberg, T. M. Rice and M. Sigrist, Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 3374.