

不純物のあるカイラル  $p$  波超伝導ボルテックスと奇周波数ペア検証法田沼慶忠<sup>a</sup>, 林伸彦<sup>b</sup>, 田仲由喜夫<sup>c</sup>, A.A. Golubov<sup>d</sup><sup>a</sup> 秋田大学工学資源学部, 010-8502, 秋田市手形学園町 1-1<sup>b</sup> 日本原子力研究開発機構, CCSE, 110-0015, 東京都台東区東上野 6-9-3<sup>c</sup> 名古屋大学大学院工学研究科, 464-8603, 名古屋市千種区不老町<sup>d</sup> Faculty of Science and Technology, University of Twente, 7500 AE, Enschede, The Netherlands

カイラル  $p$  波超伝導ボルテックスの芯周りで誘起される奇周波数クーパー対の非磁性不純物効果とボルテックス中心におけるトンネルスペクトルについて理論的に研究する。ボルテックスの芯付近で形成されるアンドレーフ束縛状態は、トンネルスペクトルのゼロエネルギーピークとして観測される [1]。最近、アンドレーフ束縛状態の形成と同時に、奇周波数を持ったペア振幅 [2] がボルテックスの芯周りにも誘起されると示唆される [3]。ボルテックスの軸対称性により、ボルテックスのトポロジーとクーパー対の軌道角運動量の量子数との関係 [4] に従い、奇周波数ペア状態がボルテックスの芯周りで安定して現れる。このような奇周波数ペア状態が存在するかどうか実験的に検証する方法を提案することは、超伝導体のペアポテンシャルの対称性を決定するという意味でも極めて重要である。

この発表では、我々はカイラル  $p$  波超伝導体の反平行渦状態と平行渦状態において、誘起される奇周波数ペア振幅の対称性がアンドレーフ束縛状態とどのような関係があるのかを明確化する。非磁性不純物効果により、ボルテックスの芯周りで誘起された奇周波数ペアと  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のようなスピン 3 重項カイラル  $p$  波ペアの対称性を同時に判別可能とする。さらには、走査型トンネル分光によって空間的なカイラル・ドメイン構造をどのように観察できるかを提唱する。我々は非磁性不純物を含んだ  $4 \times 4$  行列の準古典グリーン関数  $\check{g}(i\omega_n, \mathbf{r}, \mathbf{k})$

$$\check{g} = -i\pi \begin{pmatrix} g + \mathbf{g} \cdot \hat{\sigma} & (f + \mathbf{f} \cdot \hat{\sigma}) i\hat{\sigma}_y \\ i\hat{\sigma}_y (f^\dagger + \mathbf{f}^\dagger \cdot \hat{\sigma}) & -\hat{\sigma}_y (g + \mathbf{g} \cdot \hat{\sigma}) \hat{\sigma}_y \end{pmatrix}$$

と Eilenberger 方程式  $-iv_F \cdot \nabla \check{g} = [i\omega_n \check{\tau}_z - \check{\Delta} - \check{\Sigma}, \check{g}]$  から定式化された準古典理論に基づいた解析を行う。ここで、 $\omega_n = (2n+1)\pi T$  は松原周波数であり、 $\hat{\sigma} = (\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z)$  と  $\check{\tau} = (\check{\tau}_x, \check{\tau}_y, \check{\tau}_z)$  はそれぞれスピンと電子ホール空間におけるパウリ行列である。トンネルスペクトルは  $N(\mathbf{r}, E) = N_F \langle \text{Re} g^R \rangle$  で表される。

カイラル  $p$  波超伝導体の反平行渦と平行渦において、ボルテックスの中心で必然的に奇周波数を持った  $s$  波とカイラル  $d$  波ペア振幅が誘起される [5]。非磁性不純物に対しボルテックスの芯で形成される頑強なアンドレーフ束縛状態は、反平行渦で誘起される奇周波数  $s$  波ペアに起因する。このような奇周波数ペア振幅は走査型トンネル分光によって観測することができ、スピン 3 重項ペア対称性とカイラルドメインの空間分布の検証を期待する。

[1] Ø. Fischer, M. Kugler, I. Maggio-Aprile, C. Berthod, C. Renner: Rev. Mod. Phys. **79**, (2007) 353.[2] Y. Tanaka, A. A. Golubov: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 037003.

[3] T. Yokoyama, Y. Tanaka, A.A. Golubov: arXiv:0710.2967v2.

[4] Y. Kato, N. Hayashi: J. Phys. Soc. Jpn. **70**, (2001) 3368.

[5] Y. Tanuma, N. Hayashi, Y. Tanaka, A.A. Golubov: in preparation.