Homotopy of quasiparticles in superconductors

東京大学　物性研究所　佐藤　昌利
E-mail: msato@issp.u-tokyo.ac.jp

高温超伝導体の発見後、超伝導体探索が集中的に行われ、超伝導秩序変数のスピンがゼロでない、いわゆる非従来型超伝導体が数多く発見された。これらの非従来型超伝導体の多くは、その超伝導ギャップにノードを持つと考えられている。本講演では、そのノードの位相幾何学的な性質について報告した。

基本的なアイデアは、質量ゼロのフェルミンが運動量空間におけるソリトンとして考えることができるということである。例えば、Weyl フェルミオンは波動関数が CP^1 の元であり、$\Pi_2(CP^1) = \mathbf{Z}$ の位相普遍量を持つ運動量空間のモノポールと考えることができる。同様に、超伝導体ギャップにノードがあると、質量ゼロ、つまりギャップのないフェルミオン励起が生じるので、ノードを運動量空間の位相普遍量で特徴づけることができる。超伝導体ギャップ $\Delta(\mathbf{k})$ は、そのパリティが偶である even parity state $(\Delta(\mathbf{k}) = i\psi(\mathbf{k})\sigma_2)$ と奇である odd parity state $(\Delta(\mathbf{k}) = i\mathbf{d}(\mathbf{k})\cdot\sigma\sigma_2)$ とに分類される。更に、$[\Delta(\mathbf{k}), \Delta(\mathbf{k})^\dagger] = 0$ である超伝導ギャップは unitary と、そうでない場合は non-unitary と呼ばれる。これらの用語により、超伝導ギャップは下の表に示す 4 つの場合に分類される。我々は、それぞれの場合について、ホモトピーと位相普遍量を計算した。結果は同表にまとめておく。ここで、正常状態では時間反転対称性とパリティーが保存しており、エネルギーが運動量 $\mathbf{k}$ の連続関数となっていると仮定した。

	ホモトピー	位相普遍量
unitary even parity state 時間反転対称性あり	$\Pi_1 = \mathbf{Z}_2$ $\Pi_2 = 0$	line node -1
unitary odd parity state 時間反転対称性あり	$\Pi_1 = 0$ $\Pi_2 = 0$	安定なノードなし
unitary 時間反転対称性なし	$\Pi_1 = 0$ $\Pi_2 = \mathbf{Z}$	point node $N = \pm 2$
non-unitary	$\Pi_1 = 0$ $\Pi_2 = \mathbf{Z} + \mathbf{Z}$	point node $(N, N') = (\pm 2, 0), (\pm 1, \mp 1)$ $i\mathbf{d} \times \mathbf{d}^* = 0$ の line singularity $(N, N') = (\pm 2, 0), (0, \pm 2), (\pm 1, \pm 1), (\pm 1, \mp 1)$

この結果の応用としては、位相普遍量の保存則に基づく超伝導 2 段転移の選択則をあげておく。例えば、$PrOs_4Sb_{12}$ では、超伝導相においてノードの個数が変化するような相転移が報告されている。この場合、位相普遍量の保存則より、少なくともひとつの相の超伝導ギャップは non-unitary でなければならないことが結論づけられる。詳しい内容については、論文 [1] を参照してください。

参考文献

[1] Masatoshi Sato , in preparation.