

BCS 超伝導体および Dynes 超伝導体の対破壊電流密度

Depairing current density of BCS and Dynes superconductors

高エネ研¹, 総研大² ○久保 毅幸^{1,2}KEK¹, Sokendai², ○Takayuki Kubo^{1,2}

E-mail: kubotaka@post.kek.jp

理論的に到達し得る最大の超電流密度を対破壊電流密度 (Depairing current density, j_d) と呼ぶ。超電流密度 j は超流動運動量 p_s と超流動密度 $n_s(p_s)$ に比例する。すなわち、 $j \propto p_s n_s(p_s)$ である (ここで n_s は p_s の関数であることに注意)。 p_s が小さいうちは、 n_s は一定と見做せ、 $j \propto p_s$ である。しかし、 p_s が増加するにつれ、超伝導の破壊が進み、 n_s は減少し、 j は p_s に比例しなくなる。そして、ある閾値 p_d に達すると、超伝導破壊による n_s の減少の効果が支配的になり、 p_s が増しても j が増加しないようになる。このときの j が対破壊電流密度 j_d である。その値は、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器のバイアス電流や、粒子加速器用の超伝導加速空洞の最大加速性能と関連しており、超伝導量子技術における重要な物理量の一つである。

j_d の研究の歴史は長く、多くの知見が蓄積されている。1960 年代には Maki が Gor'kov 方程式を解くことで $T = 0$ 及び $T \simeq T_c$ における j_d を計算している [1]、1970 年代には Kupriyanov と Lukichev が、Eilenberger 方程式を解くことで、全温度領域の j_d を計算しており、 $T = 0$ 及び $T \simeq T_c$ では Maki の結果が再現される [2]。Dirty limit の場合、 $T = 0$ で $j_d(0) = 0.595 H_c(0) / \lambda(0)$ である。また、 $T \simeq T_c$ 付近では、 $j_d(T) = (2/3)^{3/2} H_c(T) / \lambda(T)$ であり、これは Ginzburg-Landau (GL) 理論からも簡単に導出できるため、Tinkham 等、超伝導の入門書でも導出が紹介されている。更に最近では、任意の不純物濃度の場合の j_d も報告されている [3]。実験データも多く蓄積 [4, 5] されており、 $T \simeq T_c$ では GL 理論による結果とよく一致する。

多くの理論的知見の蓄積があるものの、有限の Dynes subgap states を持つ超伝導体 [6,7] については、 j_d の理論計算が行われていなかった。超伝導体の準粒子状態密度 (DOS) は、しばしば Dynes の Γ を用いて表現でき、特に薄膜ではしばしば大きな Γ が観測されており、単一光子検出器や超伝導加速空洞などの薄膜を用いる超伝導量子技術への応用の観点からは、有限の Γ を持つ dirty 超伝導体の j_d の理解が必要となる。本発表では、対破壊電流密度 j_d を BCS 理論に基づき計算し、有限の Dynes Γ の影響について議論する [8]。 $\Gamma = 0$ では全温度領域で Kupriyanov-Lukichev-Maki の結果と一致するが、 $\Gamma > 0$ では、 Γ とともに j_d は減少する。また、 $T \simeq T_c$ 付近では、 Γ の値によらず GL の結果と一致し、これまでに蓄積されている実験結果と矛盾しない。このように、 j_d は Γ に依存し、特に低温で顕著である。トンネル分光による Γ 測定を製膜条件にフィードバックすることで j_d の改善や制御が可能となるだろう。

[1] K. Maki, Prog. Theor. Phys. **29**, 333 (1963).[2] M. Yu Kupriyanov and V. F. Lukichev, Sov. J. Low Temp. Phys. **6**, 210 (1980).[3] F. Pei-Jen Lin and A. Gurevich, Phys. Rev. B **85**, 054513 (2012).[4] J. Romijn, T. M. Klapwijk, M. J. Renne, and J. E. Mooij, Phys. Rev. B **26**, 3648 (1982).[5] A. Yu Rusanov, M. B. S. Hesselberth, and J. Aarts, Phys. Rev. B **70**, 024510 (2004).[6] A. Gurevich and T. Kubo, Phys. Rev. B **96**, 184515 (2017).[7] T. Kubo and A. Gurevich, Phys. Rev. B **100**, 064522 (2019).

[8] T. Kubo, arXiv:1912.01822 (published soon)