

一次元超伝導回路における準粒子拡散と捕捉に関する理論的研究 Theoretical study on quasiparticle diffusion and trapping in one dimensional superconducting circuit

産総研, ○ 東 陽一, 馬渡 康徳, 石川 豊史

AIST, ○Yoichi Higashi, Yasunori Mawatari, and Toyofumi Ishikawa

E-mail: y.higashi@aist.go.jp

超伝導量子ビットのコヒーレンス時間のさらなる向上を目指し、量子ビットと外部環境との相互作用に関する研究が盛んに行われている。超伝導量子ビットを構成する超伝導量子回路には、数十ミリケルビン程度の極低温においても熱平衡分布に従わない非平衡準粒子が存在する。最近の研究では、宇宙線や電離放射線などに起因して生成する非平衡準粒子と量子ビットの相互作用がデコヒーレンスの原因となる可能性が指摘されている [1, 2]。このような相互作用を抑制し、コヒーレンス時間をさらに向上させるために、非弾性過程によって非平衡準粒子を超伝導渦や常伝導金属平板へ緩和させ、超伝導量子回路全体への拡散を抑制して量子ビットのコヒーレンス時間を改善する案が提案されている [3]。我々は、準粒子拡散および捕捉現象を理論的にモデル化し、超伝導量子ビットのエネルギー緩和時間の延伸の可能性を探っている。

本研究では、まず空間的に一様な電子-フォノン結合系において、励起準粒子数の時間発展に関する微分方

程式を定常状態において数値計算し、準粒子の非平衡エネルギー分布を求めた (図 1)。得られた非平衡準粒子分布は、ギャップエネルギー ($\varepsilon = \Delta$) 以上の高エネルギー準粒子 ($2.8\Delta \leq \varepsilon \leq 3.0\Delta$) が定常的に生成している場合を想定したものである。観測されている準粒子密度から占有率が小さいという想定は妥当であり、その場合はギャップ端付近の非平衡準粒子分布が支配的である。図 1 に矢印で示すように、フォノン熱浴温度 $T_p = 12$ mK における占有率が 140 mK の熱平衡分布よりも一桁程度大きい。次に、非平衡準粒子分布がギャップ端付近に集中しているため、エネルギーをギャップ端に固定して電子-フォノン項を計算すると解析対象となる準粒子密度に対する拡散方程式を得る。講演では、準粒子を捕捉する金属トラップを 1 次元超伝導回路に設けたモデルを解析し、準粒子密度の空間分布について報告する。更に、超伝導量子ビットへの影響について議論する。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 JP20K05314 の支援を受けて行われた。

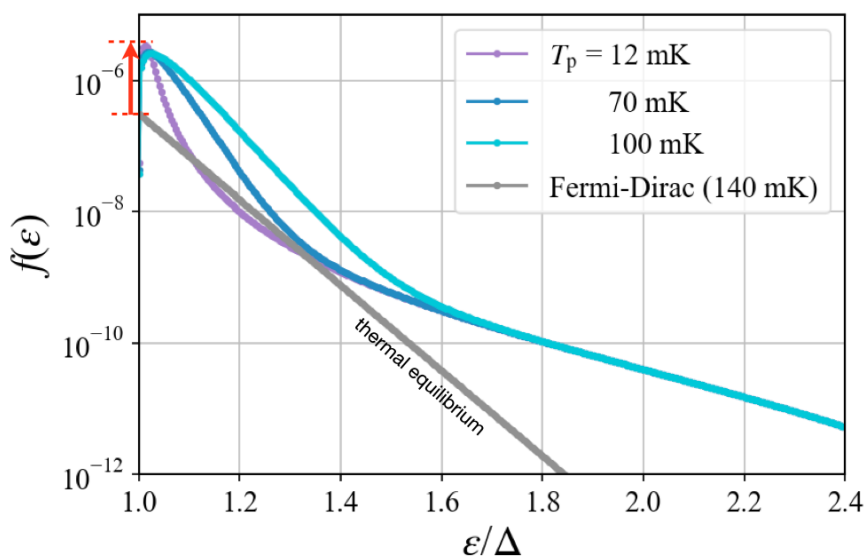


Figure 1: Nonequilibrium quasiparticle occupation probability in the steady state with changing the phonon heat bath temperature T_p . The transition temperature is set to $T_c = 1.1865$ K assuming aluminum thin films. The quasiparticle generation rate is set consistent with the typical value of the pair density for aluminum thin films.

References

- [1] Antti P. Vepsäläinen *et al.*, Nature **584**, 551 (2020).
- [2] C. D. Wisen *et al.*, Nature **594**, 369 (2021).
- [3] C. Wang *et al.*, Nature Communications **5**, 5836 (2014).