

超伝導回路における量子臨界現象の観測方法の提案

[1] 要旨

超伝導量子ビットと伝送線路を組み合わせた超伝導回路において、量子臨界現象が生じる回路の作成方法が理論的に提案された。その超伝導回路にマイクロ波を照射させると、マイクロ波散乱の反射率に量子臨界現象を反映した特徴的な周波数依存性が現れることが明らかにされている。本研究成果により、強く相互作用する量子ビット-光子複合系を舞台とした量子臨界現象を観測する具体的な指針が初めて与えられたこととなる。

[2] 本文

熱的なゆらぎによって 0°C で氷が溶けて水になるように、量子的なゆらぎによりある状態から別の状態に相転移する現象を量子相転移とよぶ。量子相転移は系のパラメータをある臨界値に調整することで生じ、その臨界値では様々な物理量の温度依存性や周波数依存性が特徴的なべき則に従う。このような振る舞いを量子臨界現象とよぶ。これまで固体の磁気相転移に伴う量子臨界現象が活発に議論されてきているが、圧力等の制御パラメータの微調整が必要であるため、量子臨界現象の全体像の解明には実験的困難が伴った。しかし、近年の技術の進展、特に量子コンピュータの実現に向けた超伝導量子ビットや量子ビットの測定・制御用の超伝導回路によるマイクロ波キャビティの作製技術開発が著しいスピードで進んでおり、量子ビット-光子複合系での量子臨界現象の実現が現実味をおびつつある。

本研究では、超伝導量子ビット（二準位系）と超伝導回路（マイクロ波キャビティ）の結合系に着目する。この系は、二準位系とボーズ粒子の集まりである熱浴が結合したモデル（スピン・ボゾンモデル）によって記述される。このモデルでは、熱浴中の周波数 ω のボーズ粒子と二準位系の結合強度をスペクトル密度とよばれる周波数の関数 $I(\omega)$ によって表す。通常、スペクトル密度には $I(\omega) \propto \omega^s$ の形を仮定するが、ここでのべき指数 s によってモデルの振る舞いが大きく異なる。特に、低周波数のボーズ粒子がより強く結合している場合（ $0 < s < 1$ ）はサブオーミックとよばれる。この場合、二準位系と熱浴の結合強度を徐々に強くさせると、ある臨界点で二準位系の重ね合わせ状態が完全に破壊され、どちらか片方の準位に局在するという量子相転移が生じる。しかし、任意のべき指数 s のサブオーミックスピン・ボゾンモデルの実現方法は知られておらず、実験において実現できるかどうかの問題となっていた。

最近、東京大学理学系研究科物理学専攻の山本剛史氏と東京大学物性研究所の加藤岳生氏は、超伝導量子ビットと超伝導伝送線路を組み合わせた超伝導回路において、任意のべき指数 s を持つサブオーミックスピン・ボゾンモデルが実現できることを初めて提案した。また、超伝導伝送線路を介して電荷量子ビットにマイクロ波を照射させると、その反射率に量子臨界現象の特徴が現れることを理論的に明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2019 年 9 月号に掲載された。

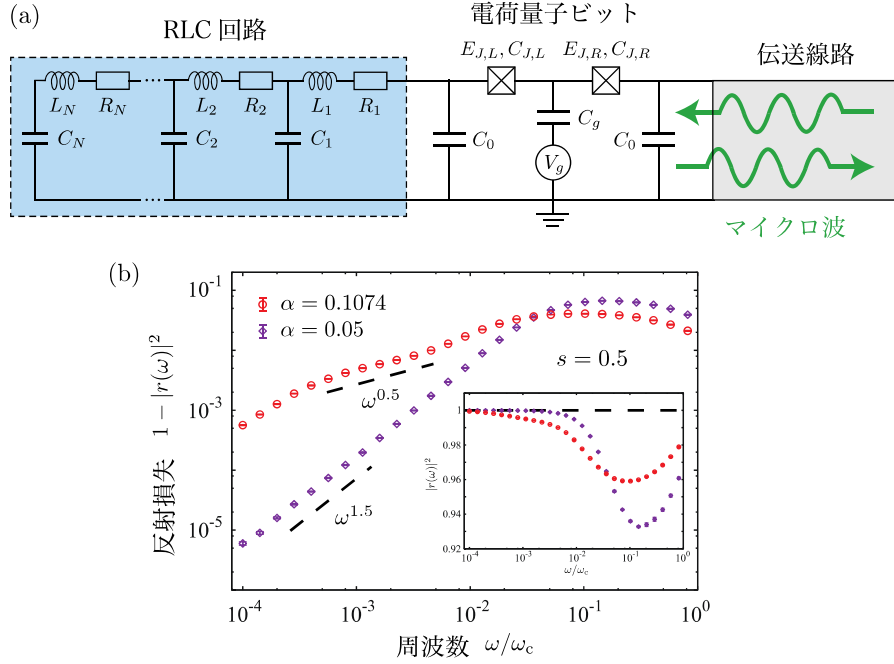


図 1. (a) スピン・ボソン模型で記述される超伝導回路と (b) $s = 0.5$ のマイクロ波反射損失 $1 - |r(\omega)|^2$ の計算結果。 α は量子ビットと RLC 回路の間の結合強度。 α が臨界値を取る場合、赤のプロットは臨界値より小さい値を取る場合をそれぞれ表している。

本研究では、超伝導量子ビットとして、電荷量子ビットとよばれる種類の量子ビットを考察した。電荷量子ビットは、小さな超伝導体内の 2 つの電荷状態によって実効的な 2 状態（ビット）を表現する量子ビットである。量子臨界現象を観測するためには、二準位系である電荷量子ビットをサブオーミックのスペクトル密度を持つ超伝導回路と強く結合させる必要がある。本研究では、図 1 (a) に示すような抵抗・コイル・コンデンサからなる RLC 回路を考察し、その回路素子に空間依存性をもたせることで、任意のべき指数 s のスペクトル密度を持つ超伝導回路を実現できることを初めて明らかにした。この超伝導回路で量子臨界現象を直接観測するためには、電荷量子ビットと RLC 回路の結合系に新たに超伝導伝送線を弱く結合させ、その伝送線からマイクロ波を照射したときの反射損失（反射率の 1 からのずれ）をみればよい。実際に理論的に反射損失の周波数依存性を計算したところ、結合強度を臨界点に設定すると、ある周波数領域で反射損失が量子臨界現象を反映したべき的な周波数依存性（ $\sim \omega^{1-s}$ ）を示すことがわかった（図 1 (b)）。本研究で提案された超伝導回路ではサブオーミックのスペクトル密度のべき指数 s を変化させることができるため、量子臨界現象における臨界指数の制御も可能である。

長い間、量子臨界現象が現れるサブオーミックスピン・ボソン模型は理論的な模型に過ぎなかった。しかし、本研究成果により、超伝導素子における量子臨界現象の実験的な観測がより現実的なものとなったといえる。近い将来に実験的検証が実現されることを期待したい。

原論文

[Microwave Scattering in the Subohmic Spin-Boson Systems of Superconducting Circuits](#)

Tsuyoshi Yamamoto and Takeo Kato, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 094601 (2019).

<情報提供：山本 剛史（東京大学理学系研究科物理学専攻）

加藤 岳生（東京大学物性研究所） >