

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 28 年度

研究開発課題名：

超伝導回路を用いた量子シミュレータ

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者

中村泰信

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

超伝導量子回路を用いて、強相関量子多体系・非平衡開放系の量子シミュレータを実現する。特にジョセフソン接合を2次元的に多数配列したジョセフソン接合列を利用して、人工多体量子モデルの振る舞いを従来の計算機よりも効率的に得ることを目的とする。ジョセフソン接合列では系のパラメータの制御が可能であり、ボーズ・ハバード模型などの強相関量子多体系のモデルハミルトニアンを実装することが可能である。この人工量子多体系において量子相転移や、マイクロ波駆動下やエネルギー散逸下での非平衡開放系のダイナミクスを解明する。

目標

①サイト数 100 程度の小規模ジョセフソン接合列により強相関量子多体系シミュレータの実現と、マイクロ波共振器の応答による熱的相転移、量子相転移の観測。

②サイト数 10,000 のジョセフソン接合列を用いた中規模強相関多体量子系シミュレータ回路の実現。

課題

①量子多体系の相転移現象をマイクロ波共振器の応答として観測する。特に、熱ゆらぎによる熱的相転移や量子ゆらぎによる量子相転移が、共振器の応答としてどのように観測されるかを解明する。

②中規模に集積化された超伝導量子回路の製造技術を確立し、マイクロ波共振器の応答を観測可能にする。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

①2次元ジョセフソン接合列上の磁束量子の集団を、相互作用の強いボーズ粒子系の量子シミュレータとして用いる。熱的相転移、量子相転移を回路量子電磁力学の手法を駆使して検出することを目指す。サイト数 30×3 (~100) の小規模ジョセフソン接合列において、パラメータが異なる四角格子ジョセフソン接合を複数準備し、無酸素銅製マイクロ波共振器内に設置して、磁束量子のサイト占有数を変化させてマイクロ波応答を測定した。古典領域から量子領域にパラメータを変化させた際にマイクロ波共振器の応答がどのように変化するか、温度を変化させた際に相転移がどのように観測されるかを解明した。結果の詳細は2-2で報告する。

② 100×100 サイトの欠陥の無い中規模ジョセフソン接合列を作製した。サイト数をスケールアップすることは、量子多体系の熱力学極限での振る舞いを解明するために重要である。空洞共振器によるマイクロ波応答を観測可能にした。磁束量子のサイト占有数を変化させて測定し、量子磁束の格子構造に関する知見を得た。

2-2 成果

①サイト数 30×3 (~100 サイト) の四角格子ジョセフソン接合列において、外部磁場印加による磁束量子の占有数を変化させた際の、格子中の相互作用の強いボーズ粒子系の振る舞いをマイクロ波共振器の応答として観測した。パラメータが異なるジョセフソン接合において、パラメータを古典領域から量子領域にパラメータを変化させた際に、マイクロ波共振器の応答がどのように変化するかを調べた。下図に古典領域での結果を示す。図1は、磁束量子占有数を変化させた際の 10 mK におけるマイクロ波の反

射係数をプロットしたものである。占有数に応じて特徴的な変化を示す。特に、 $1/6$, $1/3$, $1/2$ などの整合占有数では、大きな構造が見られる。このことは、磁束量子が整合格子構造を作っていることを強く示唆する。温度を変化させて空洞共振器のスペクトルを測定したところ、線幅の温度依存性にピークが現れることが観測された（図2）。ピークに対応する温度で磁束格子が熱的に融解していると解釈される。また、より量子領域に対応するパラメータのジョセフソン接合列では、融解温度の低下が見られた。磁束格子の量子融解（金属-モット絶縁体転移）の兆候を捉えていると考えられる。

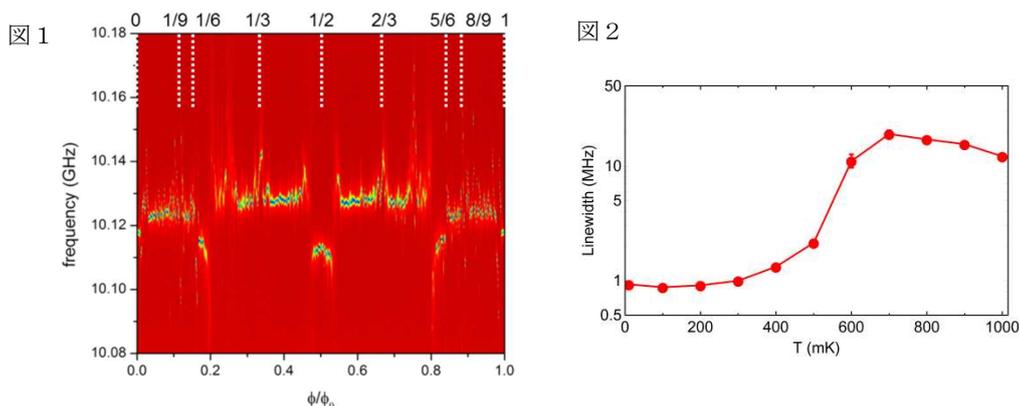


図1：マイクロ波の反射係数の量子占有数依存性。10 mK でのデータ。ジョセフソンエネルギーと帯電エネルギーの比は3.5であり古典領域に対応する。図2：空洞共振器の線幅の温度依存性(量子占有数=1/2)。ピークに対応する温度で磁束格子が熱的に融解している。

②100×100 サイトの欠陥の無い四角格子ジョセフソン接合列を作製し、空洞共振器のマイクロ波応答を測定した。サイト数をスケールアップする事は、量子多体系の熱力学極限での振舞いを解明するために重要である。観測された共振器のスペクトルの線幅は広く、ジョセフソン接合列の散逸が大きい。磁束量子の占有数を変化させた際の共振器応答には、整合占有数で大きな構造が見られる。このことは、量子磁束がジョセフソン接合列の格子に整合した格子構造を作っていることに対応する。また、この手法は、特殊な格子構造における基底状態での粒子の配置を探索する方法として有用である。

2-3 新たな課題など

ジョセフソン接合列中の磁束格子が、熱的に融解する現象を観測出来ていることが分かってきた。より量子領域に対応するパラメータのジョセフソン接合列では、融解温度の低下が見られており、量子融解の兆候が見られている。今後、金属-モット絶縁体転移に対応する量子相転移の観測および定量的な理解が不可欠である。古典から量子領域へ連続的に可変な実験系の実現および理論家との共同研究を行っていく。

サイト数をスケールアップすることは、量子多体系の熱力学極限での振舞いを解明するために重要であるものの、ジョセフソン接合列の散逸が大きく共振器スペクトルの線幅が広がること分かってきた。精度の良い測定を行うためには散逸を抑える必要がある。ジョセフソン接合列や基板の材料選定や微細加工プロセスの最適化が今後の課題である。

3. アウトリーチ活動報告

該当なし。