

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 29 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ジョセフソン接合列の基底状態および素励起の解明。
- 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と、マイクロ波共振器の応答による熱的相転移および量子相転移の観測。

課題

- ①量子多体系の基底状態および素励起をマイクロ波共振器の応答として観測し、その性質を解明する。
- 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、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. 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。回路量子電磁力学の手法を駆使することにより、外部印加磁場によりジョセフソン接合列中に励起されたボーズ粒子である磁束量子系の基底状態および素励起の解明を目指す。サイト数 30×3 (~100) の小規模四角格子ジョセフソン接合列を、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。ジョセフソンエネルギーが支配的で磁束の運動が古典的に近い場合のマイクロ波応答を、線形応答理論を用いて計算したものと比較することにより、磁束量子系の基底状態および素励起に関して知見を得た。結果の詳細は 2-2 で報告する。

② 100×100 サイトの欠陥のない中規模ジョセフソン接合列を作製し、共振器によるマイクロ波応答を観測可能にした。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舞いを解明するために重要である。特に、熱ゆらぎにより起こる熱的相転移に注目して研究を行った。相転移が共振器の線幅の増大として観測されるという新しい知見を得た。結果の詳細は 2-2 で報告する。

2-2 成果

①ジョセフソン接合列中に励起されたボーズ粒子である磁束量子系の基底状態および素励起の解明するため、サイト数 30×3 (~100) の小規模四角格子ジョセフソン接合列を、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。ジョセフソンエネルギーと帯電エネルギーの比は 2.0 であり、磁束の運動は古典的である。図 1(a)にマイクロ波共振器の反

射係数を示す。0, 1/6, 1/3, 1/2 などの整合占有数で、反射係数に大きな構造が見られる。このことは、これらの占有数では、磁束量子がジョセフソン接合列の構造に整合な格子を作っていることを示唆する。これは、整合占有数では、基底状態では、磁束が整合格子構造をとるという我々の数値計算結果と一致する。さらに、その基底状態からの素励起であるプラズマモードのエネルギーを計算し、励起状態が共振器の反射係数に及ぼす影響を線形応答理論を用いて計算した。その結果を図 1(b)に示す。計算結果は、実験結果、特に整合占有数で見られる特徴をよく再現する。この一致は、整合占有数において磁束量子は整合格子構造をとっていること、素励起がプラズマモードであり、それが共振器の周波数に影響を与えることを意味する。この研究により、マイクロ波共振器の応答が、多体系の基底状態および素励起の知見を得るための有効な手段であることが分かった。

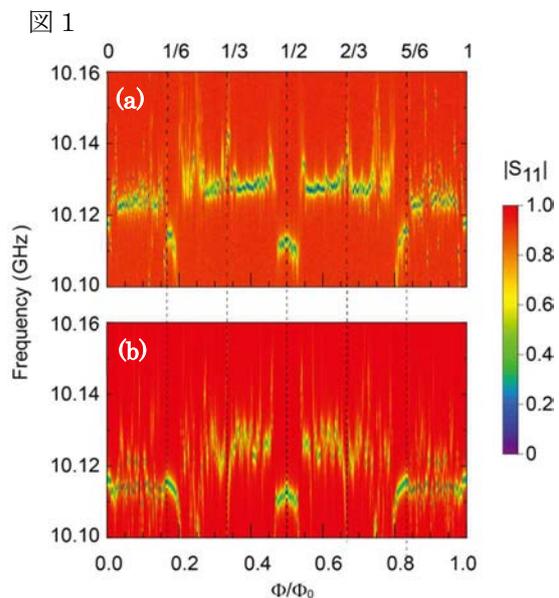


図 1 : マイクロ波の反射係数の磁束占有数依存性。30×3 サイトの四角格子ジョセフソン接合列でのデータ。(a) : 10 mK での実験データ。ジョセフソンエネルギーと帯電エネルギーの比は 2.0 であり、磁束量子の運動は古典的である。(b) : 線形応答理論を用いて計算した反射係数。

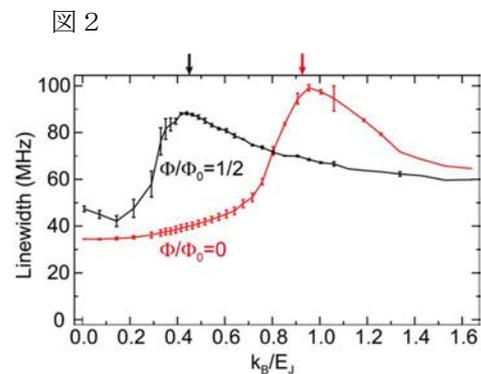


図 2 : 100×100 サイト四角格子ジョセフソン接合列での共振器の線幅の温度依存性。量子占有数=0 と 1/2 でのデータを T/E_J の関数としてプロット (T は温度、 E_J はジョセフソンエネルギー)。ジョセフソンエネルギーと帯電エネルギーの比は 2.0。矢印は、理論で予測される転移温度。線幅は、転移温度付近で増大する。

②100×100(=10,000)サイトの欠陥のない四角格子ジョセフソン接合列を作製し、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。特に、温度を変化させたときに起こる熱的相転移に注目して研究を行った。測定したジョセフソン接合列に対する共振器の線幅の温度依存性を図 2 に示す。図は、磁束占有数=0 と 1/2 でのデータを、 T/E_J の関数としてプロットのものである (T は温度、 E_J はジョセフソンエネルギー)。線幅は転移温度付近でピークを示す。ジョセフソンエネルギーと帯電エネルギーの比は 2.0 であり、超伝導位相のゆらぎは小さい。そのため、磁束占有数=0 では、磁束対の解離による Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移が起こる。また、磁束占有数=1/2 では、磁束対の解離に加え離散的な Z_2 対称性の

破れも起こると考えられる。磁束占有数=0 と 1/2 の両方において、線幅の増大は理論で予測される相転移温度付近で起こっているため、相転移にともなう散逸の増大に関連していると考えられる。磁束対の解離および Z_2 対称性の破れの線幅への影響に関しては、今後、理論的に理解する必要がある。

2-3 新たな課題など

ジョセフソン接合列の基底状態および素励起、熱的相転移が、少なくとも古典に近い領域では、共振器の応答としてどのように観測されるかということが分かってきた。また、共振器の応答を理解する上で、線形応答理論の有効性が古典に近い領域で実証された。今後は古典から量子領域へパラメータを変えたときに共振器の応答がどう変わるか、また金属-モット絶縁体転移に対応する量子相転移がどのように観測されるかを理解する必要がある。これまでに 30×3 サイトのジョセフソン接合列では、量子領域に近づくと従い、磁束格子の融解温度の低下として量子融解の兆候が見られている。今後、系統的な測定により量子転移の観測を行い、理解の範囲を量子的な領域へ広げていく。また、理論家との共同研究を行い、量子的な領域でも線形応答理論が有効かを実証する。

3. アウトリーチ活動報告

該当なし。