

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：

量子ドット量子シミュレータ

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

樽茶清悟

I 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

電気制御された量子ドット列を用いた非平衡開放量子系のダイナミクスを調べるための量子シミュレータの開発、及び開放系環境との結合に対してロバストなスピン量子現象の生成、制御をねらいとして、外部電極、超伝導共振器、核スピン浴などに結合したスピンの非平衡ダイナミクス測定やフィードバックなどの測定を行う。また、ポラリトン凝縮のトラップポテンシャル制御を導入したボーズハバードシミュレータを試作する。加えて、非可換統計に従うとともにトポロジカルな性質をもつ準粒子であり、局所摂動に対して強固であるという特性をもつマヨラナ粒子状態の生成と制御を狙いとして InSb 自己形成量子細線、HgTe/超伝導接合の技術開発と基本的な電気伝導測定を行う。

強相関量子シミュレータ

電氣的制御の量子ドットを用いた 1 次元ハイゼンベルグスピン鎖の開発、2 次元スピン格子の開発を基に、量子シミュレータの構成単位としての適性を判定する。また外部電極との結合による単一ドットへの影響を評価する。核スピン浴との結合によるドット中の電子スピンへの影響を低減可能な制御系を構築する。超伝導共振器に結合した量子ドット試料の品質向上と測定系の最適化に取り組み、量子シミュレータとしての有用性を判断する。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

局所プロトン注入を用いて、励起子成分の大きいポラリトン閉じ込め用のポテンシャルが形成可能なことを示す。また、光学的にポラリトン凝縮のダイナミクスを制御可能な測定系を立ち上げる。

非可換エニオン量子シミュレータ

InSb ナノ細線、HgTe トポロジカル絶縁体それぞれにおいて、マヨラナ粒子生成のための実験条件を明らかにする。前者では、InAs ナノ細線と同等に高品質な試料を実現し、InSb ナノ細線/超伝導体接合の物性を評価する。後者では、HgTe 量子スピンホール絶縁体ジョセフソン接合におけるアンドレーエフ束縛状態を評価する。

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

強相関量子シミュレータ

外部電極との結合では、実験に必要な時間分解能が、電子温度に相当する交換結合で決まるので、既存の装置で実験可能となるよう電子温度冷却を行った。核スピン浴結合量子ドットでは、核スピン浴の状態測定結果を電子スピンの制御パラメータに高速にフィードバックする制御系を構築した。超伝導共振器に埋め込んだ量子ドット系においては、その性能評価のためのデバイスを試作し、極低温での共振器特性および量子ドットデバイスの安定性を評価した。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

励起子ポラリトン凝縮による量子シミュレータの実現には、格子配置可能な強い閉じ込めポテンシャルの形成や非可換エニオンの制御が重要である。これには、特に大きい励起子成分を持つポラリトン凝縮のダイナミクスをポテンシャル形状、光学駆動の両方で制御することが必要である。当該年度は、局所プロトン注入を用いて、励起子成分が大きいポラリトンの閉じ込めポテンシャルが形成できることを実証した。また、光学的にポラリトン凝縮のダイナミクスを制御可能な測定系の立ち上げを試みた。

非可換エニオン量子シミュレータ

HgTe ジョセフソン接合については、エネルギー位相関係の 4π 周期性を反映するジョセフソン雑音を観測した。これはマヨラナ粒子の存在を示唆する結果である。ナノ細線については、InAs ナノ細線ジョセフソン接合の作製技術を確認し、HeTe ジョセフソン接合同様の測定において基本周波数ジョセフソン雑音の放射を確認した。

2-2 成果

強相関量子シミュレータ

外部電極との結合では、フィルタ等の改良により既存の測定系の時間分解能 ns に対してより低温の電子温度 30mK を達成した。量子ドットに測定対象となる近藤状態（近藤温度 250mK）を作れることを確認した。超伝導共振器に埋め込んだ量子ドット系では、SiGe 量子ドット試料の品質向上に取り組んだ。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

今回、局所プロトン注入の技術を用いて励起子成分の大きいポラリトンをリープ、カゴメ、四角格子状のポテンシャルに閉じ込めることに成功した。また、光学的にポラリトン凝縮の縦、回転方向のダイナミクスを誘起する測定系を立ち上げた。数値モデル化によって、光学的に超流動や核渦の制御が可能であることを検証し、そのパラメータを明らかにした。

非可換エニオン量子シミュレータ

ナノ細線およびトポロジカル絶縁体試料において、マヨラナ粒子検出のための各試料作製技術・測定技術を確認し、HgTe に関しては交流ジョセフソン電流（シャピロステップと雑音放射）にその痕跡を捉えた。それらの技術を集約することにより、従来の測定手法と比べてより確実なマヨラナ粒子の実証が得られると期待される。

2-3 新たな課題など

強相関量子シミュレータ

1次元量子ドット列を量子シミュレータとして応用する上では、外部電極や核スピン浴等の外界との相互作用の効果を取り入れることが重要である。そこで核スピン浴の影響を高速で検出し適応制御するフィードバック系を構築し、核スピン浴の影響を低減することに取り組んでいる。外部電極との結合では、非平衡開放系のダイナミクス（近藤、もつれ状態の時間応答、非自明なダイナミクス）を

実験的に可能な時間分解能において測定できるように、電子温度を低減することに取り組んでいる。超伝導共振器に埋め込んだ量子ドット系では、量子ドットデバイスの安定性が不十分であることがわかり、改善に取り組んでいる。これは超伝導共振器と結合させたことによるデバイス作製プロセスの複雑化に起因していると考えられ、現在作製プロセスの改善および特性の再評価を進めている。

励起子ポラリトン量子シミュレータ

プロトン注入によるポテンシャル構造の空間パターンの形成にはマスク形成プロセスの最適化が問題となってきた。この方法では試料の不要部分への注入を十分に防ぐために高い縦横の SiO₂ 柱を作る。堆積とプラズマエッチングプロセスの最適化を通して同試料を作製し、現在テストしている。

非可換エニオン量子シミュレータ

現在のジョセフソン雑音測定と比べ、より広帯域での測定が可能なオンチップ雑音検出器を開発する。さらに、本高周波測定手法を InSb ナノ細線または InSb 薄膜ジョセフソン接合試料に拡張し、マヨラナ粒子によるエネルギー位相関係の 4π 周期性の観測を目指す。

3. アウトリーチ活動報告

無し。