

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：

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 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、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 InAs 自己形成量子細線、InAs 量子井戸、HgTe/超伝導接合の技術開発と電氣的制御技術を確立する。

### 強相関量子シミュレータ

電気制御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。

### 励起子ポラリトン量子シミュレータ

基底ランダウ準位の出現を目指して、低相互作用エネルギーで高速回転する高密度の量子渦アレイを生成する。新しい量子渦の回転方法を用いて、まず 3 個以上の量子渦アンサンブルを生成する。また分数量子ホール効果への遷移を決める占有率（粒子数/渦数）について 100,000 以下に低減する。

### 非可換エニオン量子シミュレータ

マヨラナ粒子を固体物質中で生成・制御する技術の開発を目指して、自己形成量子細線では、h-BN ゲート絶縁層上にジョセフソン接合素子を作製し、高周波測定でマヨラナ粒子の検出を試みる。また、量子井戸試料では、高品質な超伝導体金属/半導体接合を実現し、量子化伝導度および超伝導近接効果の観測を目指す。

## 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、電子温度冷却を行うと同時に高時間分解能を持つ測定系の構築に取り組んだ。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し、核スピン浴ゆらぎの影響を低減した。

#### 励起子ポラリトン量子シミュレータ

高速回転する励起子ポラリトン凝縮を観測するための実験セットアップを構築し、そのダイナミクスを高速に操作、検出することに取り組んだ。また、プロトン注入で閉じ込めポテンシャルを形成する試料におけるポラリトンのダイナミクスの測定を試みた。

#### 非可換エニオン量子シミュレータ

自己形成量子細線では、マヨラナ粒子による超伝導位相の  $4\pi$  周期性の観測に向けて、交流ジョセフソン効果の高周波測定系を構築した。また、パラフェルミオンの実現に向けて、二重量子細線ジョセフソン接合試料を作製し、二重量子細線におけるクーパー対分離の実現を試みた。一方、量子井戸試料ではエッチングによって作製した量子細線において、ラッティンジャー液体的性質を定量に評価した。

## 2-2 成果

#### 強相関量子シミュレータ

核スピン浴結合量子ドットでは、核スピン浴の相関時間以内 (1-10msec) のフィードバック制御を達成可能な FPGA による制御系を構築し、これを用いて核スピン浴のゆらぎの影響をフィードバック制御無しの場合に対して 1/30 に低減した。

#### 励起子ポラリトン量子シミュレータ

試料作製では、ボーズ粒子の分数量子ホール効果を観測することを目的とした重い励起子ポラリトンの閉じ込めポテンシャルの構造を評価し、プロトン注入技術を用いて 10meV 以上の深い閉じ込めポテンシャルを  $1\mu\text{m}$  以下の空間分解能で実現した。また高速回転時のポラリトン凝縮のシミュレーションにより明らかにした、Abrikosov 格子の形成に必要なレーザの重ね合わせ状態を実験的に生成した。

#### 非可換エニオン量子シミュレータ

超伝導体 Al 電極を持つ InAs 量子細線ジョセフソン接合試料を作製し、高周波測定によって交流ジョセフソン効果によるシャピロステップおよびジョセフソン放射の検出に成功した。また、二重量子細線試料においてクーパー対分離を実証し、非局所成分が局所成分に対して 100%を超える分離に成功した。一方、InAs 量子井戸から作製した量子細線は大きな電子間相互作用を持つことを明らかにした。

## 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、フィードバック時間を制御することで、核スピン浴のゆらぎの大きさと電子スピン状態への擾乱を定量的に評価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と同時に高い時間分解能を持つ測定系の構築に取り組んでいる。

### 励起子ポラリトン量子シミュレータ

これまでに励起子ポラリトンの高速回転の実験のデザインやシミュレーションは完了しており、次の段階として励起子ポラリトンの量子渦の生成とその自己秩序化のダイナミクスを検出することが重要である。特に高速回転条件下において、分数量子ホール状態の兆しである、平均場での量子ホール状態の実現に取り組んでいる。

### 非可換エニオン量子シミュレータ

単一量子細線試料では、磁場応答を改善するために、より強いスピン軌道相互作用を持つ InSb 量子細線において、InAs 量子細線試料と同等に高品質な試料を実現し、高周波測定によってマヨラナ粒子による超伝導位相の  $4\pi$  周期性の観測を目指す。また、二重量子細線試料では、超伝導近接効果が静電的に制御可能な試料を作製し、クーパー対分離現象の微視的機構の解明と制御を目指す。

## 3. アウトリーチ活動報告

無し。