

山本倫久

理化学研究所創発物性科学研究センター
ユニットリーダー

半導体非局在量子ビットの量子制御

§ 1. 研究成果の概要

本研究では、電子間相互作用などによるデコヒーレンスを受けない準粒子「レビトン」を用いた電子の飛行量子ビット(非局在量子ビット)の高精度制御や、局在スピンと電子波の結合制御に基づいた局在-非局在ハイブリッド量子系の設計指針開発を行う。これらを実現することにより、局在量子ビットのみを用いた大掛かりな量子システムから、非局在量子ビットを用いた効率的なハードウェア構成を持つ多機能な量子システムへと、量子アーキテクチャーのパラダイムシフトを引き起こすことを目標としている。今年度は、この目標に向けた初期段階の実験や理論構築に取り組んだ。

非局在量子ビットの制御に関しては、理研、産総研のグループが中心となり、忠実度が高い単一量子ビット演算に使用する電子波干渉計の開発に向けた準備を行った。理研グループは、理研内の新しい実験室の整備と装置の移設、立ち上げを行った。産総研グループは、半導体ナノ構造作製に使用する真空蒸着装置にクライオポンプを導入し、真空蒸着プロセスに要する時間を大幅に短縮した。また、理研、産総研の両グループとも、電圧増幅器、ロックインアンプなどのセットアップを行い、干渉測定に取り掛かる体制を整えた。慶應大グループは、電子波干渉計の基礎物性の理論研究を開始した。電子波干渉計の有効モデルとして並列2重量子ドットを考え、リード中に複数の伝導チャンネルがある効果を取り入れた。アハラノフ・ボーム効果による電子波の位相制御、および3端子系の電気伝導測定による位相の観測方法を考察した。

上記と並行して産総研、NEEL、INAC グループは、飛行量子ビットを定義するレビトンの生成と伝搬に関する研究を行った。産総研グループは、NEEL グループと議論しながら準粒子の純度評価(緩和しない純粋な電子励起の確認)実験の準備に着手した。純度評価はショット雑音の精密測定によって行うが、雑音測定では、ローレンツ型や正弦波など異なる形状の電圧パルスを発生させ、電子の伝導を評価しながら測定系の校正を行うことが求められる。その準備として、任意波形生成器を用いた電圧パルス発生の評価を行った。その結果、高周波同軸ケーブルの周波数特性を考慮して発生させる波形に補正を加え、変調することで望みの波形に極めて近い電圧パルスを生

可能であることがわかった。NEEL グループは、レビトンを生成する電圧パルスをより短くする実験に取り組んだ。パルス幅を小さくすると、干渉計内により高密度で非局在量子ビット(波束)を集積できる。プラズモン共振器を利用したフォトスイッチを採用することにより、光の吸収効率が2倍になり、電圧パルス幅を1.1ピコ秒まで減少させることに成功した。INACグループは、半導体ヘテロ構造中の量子デバイスを設計する新しい二次元ポアソンソルバーを開発した。このソルバーは、確立された実験との比較によるテストの後、レビトンを用いた単電子干渉計を設計する際に利用される。

局在-非局在ハイブリッド量子系に関しては、理研グループが局在スピンと電子波の結合状態の空間的な広がり の 解明に関する実験を行った。実験では、局在スピンを閉じ込めた量子ドットと一次元ファブリペロー干渉計の結合系を用いて、ファブリペロー干渉計の長さを基準として、局在スピンを周囲の伝導電子が遮蔽する近藤効果の空間的な広がりを初めて実証した。慶應大グループは、2重量子ドット的一方にクーロンブロックードによって局在スピが存在する場合の近藤効果を計算し、チャンネル数の増加と共に、非対称なファノ・近藤効果から従来の近藤プラトーへのクロスオーバーが生じることを導いた。また、電子波を介した電子スピンのコヒーレント結合技術開発を念頭に、結合2重量子ドットを流れる非線形電流を局所フェルミ流体論に基づいて解析し、準粒子対の量子もつれ特性を明らかにした。電流によって有効的に運ばれる量子もつれ状態に着目することで、相互作用に依存した境界を持つ「ベルの不等式」を導出した。

【代表的な原著論文】

1. Rui Sakano, Akira Oguri, Yunori Nishikawa, and Eisuke Abe, “Bell-state correlations of quasiparticle pairs in the nonlinear current of a local Fermi liquid,” Phys. Rev. B 99, 155106 (2019).

§ 2. 研究実施体制

(1) 理研グループ

- ① 研究代表者: 山本 倫久 (理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー)
- ② 研究項目
 - ・ 忠実度の高い単一量子ビット演算
 - ・ 局在スピンと電子波の結合状態の空間的な広がり の 解明

(2) 産総研グループ

- ① 主たる共同研究者: 金子 晋久 (産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 首席研究員)
- ② 研究項目
 - ・ 忠実度の高い単一量子ビット演算
 - ・ レビトンのコヒーレント伝導の実証と評価
 - ・ 準粒子の純度評価

(3) 慶應大グループ

- ① 主たる共同研究者: 江藤 幹雄 (慶應義塾大学 理工学部 教授)
- ② 研究項目
 - ・ 電子波干渉計の理論設計