

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の開発を行っている。

飛行量子ビットの研究では、理研、産総研、NEEL グループが、同量子ビット制御のプラットフォームとなる量子干渉計の設計、試作、評価を行った。同干渉計は、結合量子細線とアハロノフボームリングから構成された電子の 2 経路干渉計であり、電子(準粒子)がどちらの経路に存在するかによって量子ビットを定義できる。具体的には、多チャンネル細線によって構成されながらも、部分的な狭窄によって伝送チャンネル数が 1 に絞られた可視度が高い干渉計の実現を目指した。尚、ここでは量子ビット制御の自由度が高い架橋ゲート構造を採用し、散乱を抑制するために経路直上のゲート電極を配した。また、飛行量子ビットのコヒーレンス長を評価するために、長さの異なる複数の結合細線からなる量子干渉計の評価に取り掛かった。並行して、慶應大グループは、電子波干渉計の最小モデルとして並列 2 重量子ドット系を考え、その理論研究を行った。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、多端子系での量子干渉効果などを定式化した。更に、ナノスケールの素子に複数のリード電極を接続したときに、異なる電極に流れる電流間に形成される量子もつれ特性を理論的に研究した。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の開発を更に進めた。

また、産総研、NEEL グループは、飛行量子ビットを定義するレビトンの生成に関する技術開発を進めた。レビトンを生成するために印加する電圧パルス、4つの周波数成分を持つRF信号の和として発生し、24psから60psのローレンツ型の電圧パルスを発生させた。そのスペクトルを評価することにより、生成させるレビトンの予想純度が高いことを確認した。また、周波数コムを用いて、より精密なパルス生成手法の開発を進めた。

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を初めて解明した。前年度に、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、局在スピンを周囲の伝導電子が遮蔽する近藤遮蔽雲が空間的に広がっていることを実証していたが、より詳細な解析により、近藤雲のサイズに加え、その形状まで明らかにした

(図1参照)。この結果を基に、2不純物近藤効果の実験のデザインと指針を決定した。また、近藤雲の広がりの検証実験で用いた、電子干渉による近藤温度変調の技術を応用した新たな実験として、近藤雲の形成のダイナミクス(形成時間)を明らかにする実験を新たに提案し、準備を開始した。同実験は、近藤雲に関する長年の課題の一つを明らかにするものである。近藤雲の形成時間は離れた局在スピン間の結合の時定数とも関係しており、局在-非局在ハイブリッド量子系の設計や制御の指針を与える重要なパラメータである。

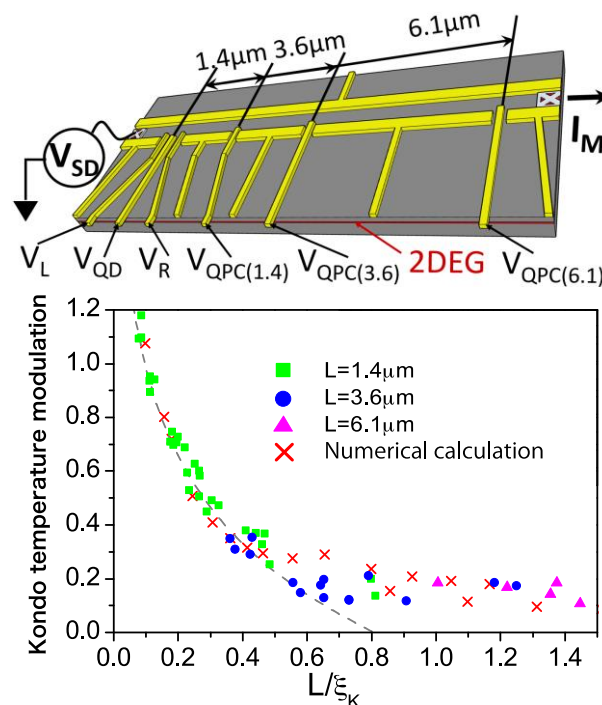


図1:近藤雲の検出実験に用いられた試料の模式図と近藤雲の形状。量子ポイントコンタクトのゲート電圧(V_{QPC})による近藤雲の変調具合を定量化することによって近藤雲の形状を得た。

【代表的な原著論文】

Ivan V. Borzenets, Jeongmin Shim, Jason C. H. Chen, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Seigo Tarucha, H.-S. Sim, Michihisa Yamamoto, "Observation of the Kondo screening cloud", Nature 579, 210-213 (2020).

§ 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
 - ・ 離れた量子ドット間のスピン相関の実証

(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

(4) NEEL グループ

- ① 仏研究代表者:Christopher Bäuerle (仏国立科学研究所 NEEL DR1; Head of Quantum Coherence Group)
- 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
 - ・ 極短パルス長のレビトンの励起手法の開発
 - ・ 離れた量子ドット間のスピン相関の実証

(5) INAC グループ

- ① 仏共同研究者:Xavier Waintal (仏原子力・代替エネルギー庁 INAC-SPSMS Head of the theoretical physics lab)
- ② 研究項目
 - ・ レビトンのコヒーレント伝導の実証と評価
 - ・ 数値計算によるレビトン伝導とレビトン間の結合評価