

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」
研究課題「半導体非局在量子ビットの量子制御」

研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

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 チームリーダー)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

以下の研究項目を実施した。

1) 電子干渉計の設計原理の開発

高忠実度制御が可能な新しい飛行量子ビットの制御系(量子干渉計)の設計原理を開発した。

1.1) 電子干渉計の理論設計

並列2重量子ドットモデルや数値計算を用いて、電子干渉系の基本的な振る舞いを解明した。

1.2) 忠実度が高い単一量子ビット演算

電子干渉計の伝送ゲートの直上にナノスケールの遮蔽電極を配することにより、単一電子伝導モードの干渉制御を初めて実現し、これによって従来に比べて忠実度が高い 1 量子ビット演算を実現した。

1.3) 2 量子ビット演算の実証

電子干渉計の 2 電子干渉実験により、クーロン相互作用を利用して 2 量子ビットもつれを生成できることを実証した。

2) 単一準粒子励起手法の開発

ローレンツ型の短電圧パルスを用いて、飛行量子ビットアーキテクチャーに適した単一準粒子レビトンを励起する手法を開発した。

2.1) レビトンのコヒーレント伝導の実証と評価

数 10 ピコ秒のパルス長の準粒子励起を実現し、そのコヒーレント伝導を実証した。また、準粒子の電子伝導チャンネルへの分配を量子閉じ込めによって制御し、それによって準粒子の伝搬速度を大きく変調できることを実証した。

2.2) 準粒子の純度評価

準粒子励起が高純度(>99%)の電子励起である(正孔励起が少ない)ことを生成パルスの形状から評価した。また、準粒子励起に適したフラットな透過特性を持つ高周波配線を実現した。

3) 量子干渉計中のレビトンのコヒーレント制御

準粒子(レビトン)の量子干渉を制御することにより、高忠実度の量子操作を実証した。

3.1) レビトンの量子ビット演算

2)で開発した手法で生成した準粒子の量子干渉を測定し、短パルスの場合に干渉の可視度が飛躍的に改善することを確認した。

3.2) 電子波束を用いた量子計算機的设计概念の開発

ループ型量子回路と time-bin 量子ビット-which-path 量子ビット相互変換を利用して、小さなハードウェアで大規模な量子コンピューターを実現するための具体的な方法を考案した。

4) 電子波を介した電子スピンのコヒーレント結合技術の開発

局在-非局在ハイブリッド量子系や電子相関が強い系の量子シミュレーションプラットフォームを開発した。

4.1) 局在スピンと電子波の結合状態の空間的な広がり解明

局在スピンと多数の伝導電子スピンの多体の量子もつれ状態である近藤雲の空間的な広がりを観測し、近藤雲の大きさと普遍的な形状を解明した。

4.2) スピン結合に関する理論解明

2不純物近藤効果によってもたらされる伝導チャンネル間の量子もつれの定式化及び近藤温度の評価方法の開発などを行った。

4.3) 長距離スピン相関の実証と制御

電子波を介した離れたスピン間の結合に関する実証研究に取り組んだ。その過程で、近藤状態を有限サイズの(しかし大きな)箱に閉じ込めた「近藤箱」の物理を初めて解明し、長距離のスピン量子もつれ状態を局所ゲート変調によって制御できることを実証した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 近藤遮蔽雲の観察 (*Nature* 579, 210-213 (2020))

概要: 局在スピンを周囲の伝導電子が遮蔽して形成される「近藤遮蔽雲」の広がりと形状を世界で初めて観測した。近藤雲は離れた局在スピン間の相互作用を仲介するため、磁性元素を含む多くの物質で近藤雲が果たす役割の重要さは長年知られていたが、その検出実験の成功例はなかった。近藤雲の大きさは半導体中では数マイクロメートルにも及ぶため、離れたスピン量子ビットを結合させ、近藤雲の“波”によって局在スピン間の相互作用を制御するハイブリッド量子系の構築が期待できる。

2. 単一伝導モードから形成される量子干渉計の実現

概要: ゲート電極を用いて形成される集積可能な電子干渉計は、これまでは多数の電気伝導モードによって形成されるチャンネルによって構成されており、単一伝導モードの干渉を制御する技術は実現していなかった。本研究では、チャンネル内の不均一性を抑制する遮蔽電極をナノスケールで配置することにより、単一の電子伝導モードの干渉を制御することに初めて成功した。この成果により、純粋な単一伝導チャンネルの干渉を高精度で制御し、それを量子情報デバイスとして集積する可能性が拓かれた。

3. 近藤遮蔽雲の電氣的制御の実現 (arXiv:2404.11955)

概要: 近藤遮蔽雲は、伝導電子の状態密度が一定の場合には普遍的な形状を有する。近藤遮蔽雲を有限サイズの箱(近藤箱)に入れた系は、伝導電子の状態密度に変調を加えた現実の物理系に対応する。本研究では、近藤箱の制御によって近藤雲を変形し、局在スピンと伝導電子の量子もつれを変調するとともに、それを定量的に評価する方法を確立した。これにより、長距離のスピン量子もつれの空間的広がりである近藤雲を自在に制御することが可能になった。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 電子波束を用いた新たな量子計算システムの提案 (PCT/JP2023/025244 (2023))

概要: 現在量子コンピューター応用のために開発が進められている固体の量子系では、制御系を含めたハードウェアサイズが量子ビット数に比例して大きくなり、大規模なシステムを構築することが困難な課題となっている。本提案は、量子回路を伝搬する電子波束に位相緩和が少ない *time-bin* 量子ビットを搭載し、それを制御する具体的な回路構造を示したものである。提案手法では、希釈冷凍機 1 台で構成できる小さなハードウェアで大規模な量子コンピューターが実現する可能性がある。

2. 量子回路を伝搬する波束の伝搬速度の制御を自在に制御する手法の開発

概要: 量子回路を伝搬する電子波束を利用して量子光学的な演算を実行する量子電子光学実験は、次世代量子デバイスのプラットフォームの候補として注目されている。量子電子光学実験では、波束の速度を変調する必要がある。量子回路の部分的な狭窄によって電子波束の伝搬速度が変調されることが指摘されていたが、そのメカニズムは不明だった。本研究では、伝搬チャンネルの一部を波束から切り離す新しい手法により、波束の速度を広い範囲で局所的なゲート変調で自在に制御できることを実証した。

3. 電子波束による量子干渉の可視度の大幅な上昇の観察

概要: 一次元電子系において、短い電気パルスによって電荷モードに励起される電子波束は電子間相互作用を繰り込んだプラズモンとして振る舞い、電子間相互作用によるデコヒーレンスが抑制されることから長いコヒーレンスが期待される。本研究では、量子干渉計に電子波束を注入した場合の干渉の可視度が、波束を短くすることによって増大する様子を観測した。この結果は、電子波束の優れた量子コヒーレンスと後方散乱の抑制を示しており、これを用いた

飛行量子ビットへの応用が期待される。

<代表的な論文>

1. I. V. Borzenets, J. Shim, J. C. H. Chen, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, H.-S. Sim, and M. Yamamoto, “Observation of the Kondo screening cloud”, *Nature* **579**, 210 (2020)

概要: 局在スピンを周囲の伝導電子が遮蔽して形成される「近藤遮蔽雲」の広がりと形状を世界で初めて観測した。近藤雲は離れた局在スピン間の相互作用を仲介するため、磁性元素を含む多くの物質で近藤雲が果たす役割の重要さは長年知られていたが、その検出実験の成功例はなかった。近藤雲の大きさは半導体中では数マイクロメートルにも及ぶため、離れたスピン量子ビットを結合させ、近藤雲の“波”によって局在スピン間の相互作用を制御するハイブリッド量子系の構築が期待できる。

2. R. Ito, S. Takada, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, and M. Yamamoto, “Coherent beam splitting of flying electrons driven by a surface acoustic wave”, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 070501 (2021)

概要: 伝搬する電子の量子状態によって定義される「飛行量子ビット」を用いて量子コンピューターを構成すると、局在した量子ビットで構成される固体の他の量子コンピューターシステムに比べて、システム構築に必要なハードウェアを著しく抑制できる。しかし、その用途に適した飛行量子ビットの制御の実現例はなかった。本研究では、トンネル結合細線中で音波によって輸送される単一電子の量子力学的な運動を制御し、電子がどちらの細線に存在するかで定義される量子ビットの電気的操作を初めて実証した。

3. N. H. Tu, D. Kim, M. Kim, J. Shim, R. Ito, D. Pomaranski, I. V. Borzenets, A. Ludwig, A. D. Wieck, H.-S. Sim, M. Yamamoto, “Electrical control of a Kondo spin screening cloud”, arXiv:2404.11955 (submitted)

概要: 近藤遮蔽雲は、伝導電子の状態密度が一定の場合には普遍的な形状を有する。近藤遮蔽雲を有限サイズの箱(近藤箱)に入れた系は、伝導電子の状態密度に変調を加えた現実の物理系に対応する。本研究では、近藤箱の制御によって近藤雲を変形し、局在スピンと伝導電子の量子もつれを変調するとともに、それを定量的に評価する方法を確立した。これにより、長距離のスピン量子もつれの空間的広がりである近藤雲を自在に制御することが可能になった。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 理研グループ

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 チームリーダー)

研究項目

- ・忠実度の高い単一量子ビット演算
- ・2量子ビット演算の実証
- ・レビトンの量子ビット演算
- ・電子波束を用いた量子計算機的设计概念の開発
- ・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
- ・長距離スピン相関の実証と制御

② 産総研グループ

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)

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

•レビトンの量子ビット演算

③ 慶應大グループ

研究代表者:江藤 幹雄(慶應義塾大学工学部 教授)

研究項目

- 電子波干渉計の理論設計
- スピン結合に関する理論解明

④ NEEL グループ

研究代表者:Christopher Bäuerle (仏国立科学研究所 NEEL Directeur de Recherches (DR1))

研究項目については略

⑤ CEA グループ

研究代表者:Xavier Waintal (仏 INAC, CEA Directeur de Recherches)

研究項目については略

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本研究の遂行を通して、日本及び欧州における電子量子光学分野の主要な研究者とネットワークを形成し、意見交換を行える関係を構築することができた。また、仏 CNRS の IRP (International Research Project、2024 年 1 月から 2029 年 12 月)に採択され、仏の NEEL グループとの連携を更に強化した。