

半導体準粒子波動工学の開拓

	研究代表者	東京大学・大学院工学系研究科・教授 山本 倫久（やまもと みちひさ）	研究者番号：00376493
	研究課題情報	課題番号：24H00047 キーワード：電子相関、準粒子、波動工学、量子情報	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

伝導電子を用いた究極の高速性と量子性を備えた量子デバイス開発を将来目標とし、多数の電子が存在する固体中で量子性を保って伝搬する「準粒子」の基礎的な性質を解明する。具体的には、細線（一次元電子系）を長距離伝搬する電荷準粒子、局在したスピンと伝導電子から構成される多電子系（スピン多体状態）で定義される近藤準粒子の生成と変形、量子性と波動制御、相互作用に関する研究を行う。

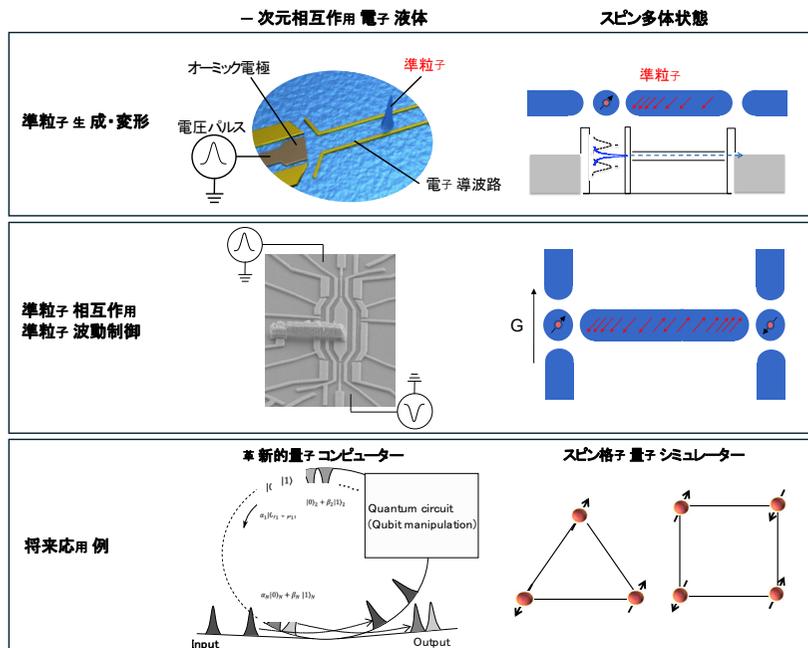


図1 準粒子波動工学研究の全体像

●研究背景

固体中の多数の電子から構成される多体電子系に入射する単一電子は、周囲の電子との相互作用により、非常に短い時間で量子的な性質を失ってしまう。これは、入射電子が持つ量子力学的な自由度が、周囲の電子に即座に拡散してしまうことを意味している。では、固体中の伝搬電子の運動を量子力学的に制御することは不可能であろうか。この問題を解決する手掛かりは、多電子で構成され、その系の性質を担う粒子である「準粒子」の視点に立つことで得られる。例えば、一次元相互作用電子系の伝導（電荷モード）を担うのは、プラズマ的な準粒子であることが知られている。また、局在スピンが周囲の伝導電子と量子力学的に結合した「近藤状態」では、「近藤準粒子」が電気伝導を担う。これらの準粒子は、通常の電子とは異なった振る舞いをするだけでなく、その量子的な情報を長距離に渡って伝送できることが知られている。これらの準粒子は、同時に固体の電子系で最も高速で情報を運ぶ情報担体でもある。その流れを高速で量子力学的に制御することができれば、伝導電子（準粒子）の量子性を利用した究極的に高速な量子デバイスを開発できる。

●目的と展望

本研究は、電子波としての情報を担う準粒子の生成、緩和、相互作用の物理を解明し、またその状態を波動工学に基づいて量子力学的に制御する指導原理を確立することを目的とする。これは、電子の流れに量子性を付加し、高速極限で動作する究極の電子波デバイスの開発に繋がるものである。具体的には、多電子がクーロン結合する一次元電子導波路における電荷準粒子（電子波束）と、スピンの量子的な結合によって形成される近藤準粒子の動的な制御を研究対象とする。これらはそれぞれ古典的（クーロン相互作用）、量子的（スピン量子もつれ）な相互作用を特徴付ける準粒子であり、固体の準粒子の代表例である。一方で、これらの準粒子の動的な性質は、まだほとんど研究されていない。

これらの多体準粒子の性質を解明することによって実現する電子波デバイスとして、電荷準粒子の状態で定義される量子情報を用いた新原理の量子コンピューター、局在スピンと伝導電子が共存する電子相関の強いスピン格子系の量子シミュレーターなどが具体的に挙げられる。これらに限らず、様々な物理系において生成される多電子の相互作用状態や量子もつれ状態のダイナミクスの解明が期待できる。また、本研究を通して一般的な半導体回路を準粒子の伝搬制御の視点で見直し、その設計思想を根本から構築し直すと共に、将来はより発展的な量子系の開発が期待できる。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●一次元電子系のプラズモン準粒子

一次元電子系の電荷準粒子は、微小なオーミック電極に短い電圧パルスを印加することによって、電子波束として生成される。まず、短い電圧パルスを生成する技術を開発し、準粒子波束の伝導特性を明らかにする。具体的には、(a) 準粒子の生成と変形、(b) 量子性の検証、(c) 準粒子間の相互作用を研究課題とする。(a)に関しては、電圧パルスの振幅が大きく、伝搬速度がエネルギーに依らない「線形分散領域」を超える場合の波束の変形（広がり）を明らかにする。(b)に関しては、準粒子が量子性を失う要因を解明する。特に、外部の電子系との結合による影響を評価する。(c)に関しては、準粒子間の相互作用を解明する。これらに関する実験では、電子干渉計を伝搬する準粒子による干渉信号（準粒子の位相変化）測定に加え、伝搬経路に設置したゲート電極（量子ポイントコンタクト：QPC）を用いた時間分解測定により、準粒子波束の伝搬速度と形状を精密に測定する（図2）。

●近藤準粒子

近藤効果は、局在スピンと伝導電子との間の相互作用によって生じる代表的な相互作用効果である。局在スピンと多数の伝導電子スピンの量子もつれ状態を形成し、局在スピンが遮蔽される。低温極限では、局在スピンの遮蔽の痕跡は準粒子の位相シフトだけに残り、これが近藤準粒子を特徴づける。本項目では、近藤準粒子に関する課題として、(a)近藤状態及び近藤準粒子の生成ダイナミクスの解明、(b) 近藤状態を変形する「近藤箱」を用いた準粒子間相互作用の検証、(c)複数の局在スピンが存在する系の準粒子の性質の解明に取り組む。(a)に関しては、近藤効果のオンオフをファブリーペロー干渉を利用して高速で操作しながら電気伝導測定を行うことにより、近藤状態がいつ、どこまで広がっているかを検証し、近藤状態生成のダイナミクスを明らかにする（図3）。(b)に関しては、温度上昇と共に活発となる準粒子間の非弾性散乱（エネルギーを保存しない散乱）によるエネルギー分散を、状態密度測定によって解明する。(c)に関しては、伝導電子を介した局在スピン間の相互作用を普遍的なパラメータ（スピン間の距離、近藤状態の広がり、スピン間で準粒子が得る位相）の関数として実験的に導出する。

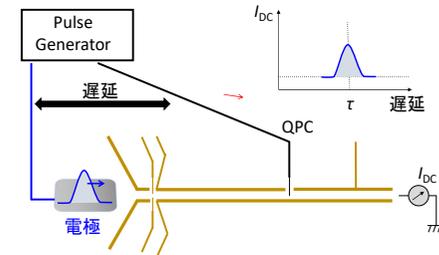


図2 電荷準粒子の速度、形状測定

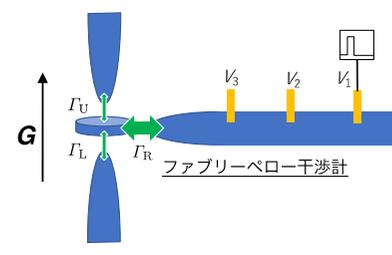


図3 近藤状態生成ダイナミクスの実験模式図