

論文の内容の要旨

論文題目 Quantum mechanical electron transport driven by surface acoustic waves

(表面弾性波に駆動された電子の量子的伝導)

氏名 伊藤 諒

従来、飛行量子ビットといえば光学フォトンを対象とする言葉でした。しかし近年、飛行量子ビットを電子系において実現しようとする試みが始まっており、私が研究する「表面弾性波に駆動された電子」もそのうちの一つです。この系においては圧電体中の表面弾性波を電子の駆動源として用いており、空乏化された一次元量子細線と組み合わせることで動く量子ドットに閉じ込めた電子の輸送が可能となります。この系において、飛行量子ビットを量子ドットに閉じ込められた電子の軌道状態やスピン状態、あるいは伝導経路によって定義することができます。光学フォトン飛行量子ビットと比較した場合の最大の利点は、表面弾性波の伝導が光と比べて遅いため、極めて密な飛行量子ビット列を形成することができることです。また静止量子ドット内の電子の状態で定義された量子ビットとも強い親和性があります。最新の研究では、動く量子ドットを介して、99%の効率で離れた静止量子ビット間で互いに電子を受け渡しできることが示されました。しかし、肝心の飛行量子ビット操作は、技術的な問題のため、最も基本的な量子操作素子であるビームスプリッターですら実現することができていませんでした。

飛行量子ビット操作を実現する上で鍵となるのは輸送電子の運動に対する正確な理解です。1990年代の後期には電子浴から動く量子ドットに電子を導入する場合、表面弾性波ポテンシャルに捕らえられる電子の数を整数個に量子化できることが示されました。これは動く量子ドット内部での電子間相互作用により余剰電子が外部に排出されるためです。このような電子の個数に対する研究、特にその安定化に対する研究は度量衡学的な電流基準の候補技術として詳細に研究されましたが、内部の量子的な状態に対する研究はほとんど行われていませんでした。しかし、我々が目指す飛行量子ビットを実現するためには特に単一電子軌道の情報が不可欠です。ビームスプリット操作を実現するために最も望ましいのは、初期電子軌道状態が常に基底状態に落ちていることです。しかし、先行研究におい

では基底状態が 100%ではないであろうことは示唆されていたものの定量的な研究は欠落した状態でした。この研究の重要な目標の一つは量子レベルでのビームスプリッターの実現になりますが、また同時に量子力学的なレベルでの表面弾性波に運ばれた電子状態の評価を行いました。

ビームスプリット操作は実験的にはトンネル結合した二重量子細線構造により実現することができます。この構造は二つの量子細線をトンネル結合を許容するほど近傍に並列して配置したもので、動く量子ドットにより輸送された電子は二つの量子細線間をトンネル振動し、最終的にどちらかの量子細線の終端で電流値として観測されます。二つの量子細線で量子位相を保ったまま半々の確率で観測されることが一般的なビームスプリッターの挙動となります。このトンネル振動は電子の初期軌道状態に依存しており、振動の様子は量子力学によって完全に記述されます。もし初期状態が 100%の基底状態であればほぼ 100%の可視度を持ったトンネル振動が観測されるはずですが、励起成分を持つ場合にはその限りではありません。私は実験的にこのトンネル振動を計測しました。計測データには量子位相を保持していることによるものであると考えられる特徴的な振動構造が現れ、これは表面弾性波で伝搬する電子系にとって初めての量子レベルでのビームスプリッターの実現になります。

しかし、実験によって得られたトンネル振動の可視度は数パーセントと低い水準でした。温度依存性の実験からデコヒーレンスは排除できることが確認され、また有限要素法によって計算された現実的な二重量子細線のポテンシャルを用いた電子の時間発展のシミュレーションでは可視度がほぼ 100%になることが示されたので、低い可視度がそもそもの二重量子細線構造によるビームスプリッティングの上限である可能性も排除することができます。よって低い可視度を説明する残された候補は初期状態の乱雑さのみになります。

初期状態の電子準位測定の実験は前の実験の二重量子細線の片側を電子浴と取り替えることによって行われました。表面弾性波に閉じ込められた電子は電子浴の電子と比べて高いエネルギーを持つため、電子浴から動く量子ドットへの電子の伝導はありません。しかし、動く量子ドットから電子浴への伝導は許され、その確率は軌道状態に依存したトンネル確率によって決定されます。ゲート電圧を調整することにより経路のポテンシャル形状を変化させ、それに応じたトンネル電流の変化をモデル計算によるフィッティングと照らし合わせることで動く量子ドット内部でどのような内部状態が形成されていたのかを明らかにしました。この手法では表面弾性波による閉じ込めと量子細線のポテンシャルによる閉じ込めの二方向で定義される電子の固有関数のうち、量子細線閉じ込めに起因する部分の固有関数の差異のみが判別されるため完全な量子状態の検出とは言えませんが、基底状態割合の評価を行うことができます。

物理的な背景がよくわかっていないものの数十%の高い可視度を持ったトンネル振動も実験的には観測されています。このトンネル振動では、動く量子ドットに閉じ込められた電子について観測された上記のトンネル振動と比較して、ゲート電圧依存性が数十分の一程度

であり、表面弾性波よりも非常に速く伝導する電子が関わっていることが示唆されます。しかし、その詳細は未解明であり、将来の課題となっています。

これまでの話は単一電子の軌道状態に対するものでしたが二電子のスピン状態に関する研究も合わせて行いました。一つの動く量子ドットに二つの電子が閉じ込められた時の基底状態は電子スピンの一重項状態となります。非局所量子もつれ状態作成の観点では、二電子の分離が重要なプロトコルになります。二電子の分離は電子間の反発作用を利用すると実現すると考えられ、Y字形の電子経路と組み合わせることにより、動く量子ドットによる伝導途中で電子対をそれぞれの経路に一对一に分離することに成功しました。しかし、初期状態が基底状態であるとは期待できないのであくまで現段階では電子対分離の成功という位置付けになります。

表面弾性波による飛行量子ビットの現在の最大の問題点は状態の初期化にあると言えます。この問題点はそもそも現行の単一電子や二電子対の導入過程が、多数の電子を蓄えた動く量子ドットから要らない電子を高速で振り落とすという過程によっているため、ある意味当然の帰結であるとも言えます。将来的には別の手法を用いた電子導入により基底状態への初期化を実現することが必要となると考えられます。今回実現したビームスプリッターは、ゲート電圧の調整により伝搬経路の量子ビットとして任意の一ビット操作を実現したものです。将来的には、クーロン斥力を利用した二量子ビット操作と組み合わせることにより、電子軌道に関する任意の量子計算を従来の固体デバイスとは全く異なるアーキテクチャーで実行することが可能になると考えられます。また、電子スピンに関しても、二電子分離を他のスピン操作や静止量子ドット系と組みわせることにより、バル測定による非局所量子もつれの実証や電子スピン量子ビットのスケラビリティの問題の解決が期待できます。