



丸文研究奨励賞 受賞者

高田 真太郎

大阪大学 大学院理学研究科 准教授

## 電子導波路中の電子波の精密な位相測定法の開発と量子素子への応用探索

半導体中を飛行する電子の量子状態制御に基づく物性探索と量子素子の基盤技術

### 研究の背景

電子波の位相は、様々な量子干渉現象の起源となる自由度であり、その振る舞いは電子を用いた量子素子の性質を決定づける。そのため、量子回路中の電子波の位相の振る舞いの理解は、学術的観点、及び電子波の量子素子への応用という観点から求められる課題である。高移動度な電子の高い可干渉性が実現可能な半導体二次元電子系では、電子が2つの経路を通過して干渉する2経路量子干渉計を実現し、その干渉振動から電子波の位相変化を観測する試みが行われてきた。しかし、先行研究で用いられた干渉計では、散乱された電子が想定された2経路とは異なる、余分な経路を通過して干渉する寄与の抑制が難しく(図1a)、解釈が困難な実験結果が多く報告されていた。

上記のような背景の下、本研究では、独自の2経路量子干渉計を用いて正確な電子波の位相測定法を実現し、その手法を用いて位相に関する未解明の問題に取り組んだ。また、位相測定で培った伝導電子の

量子制御技術を単一電子源・単一電子検出器と組み合わせることで、単一電子で動作する量子素子を実現することを目的とし、表面弾性波を用いた単一飛行電子の制御技術の開発に取り組んだ。以下にそれぞれ例を挙げ、詳細を説明する。

### 研究の成果

#### 1. 近藤効果が発現した量子ドットにおける伝達位相の解明

量子ドットは電子を3次元的に狭い空間に閉じ込めた0次元系であり、その内部では電子間のクーロン相互作用やスピンによって引き起こされる多彩な相関現象が生じる。本研究では、独自の2経路量子干渉計の片方の経路に典型的な多体効果として知られる近藤効果が発現する量子ドットを埋め込み(図1b)、電子が量子ドットを通過して散乱された際に獲得する伝達位相の測定を行った。近藤効果は、近藤温度 $T_K$ と呼ばれるエネルギースケールによって特徴づけられ、電子系の温度 $T$ が $T_K$ よりも十分に低温( $T \ll T_K$ )で発現し、多体のスピン一重

項状態である近藤一重項状態が形成される。このとき、近藤一重項状態を通過して散乱された電子は $\pi/2$ の位相変化を示すが、1974年にNozièresによって理論的に提唱されていた。先行研究では、2経路量子干渉計としての動作が期待される干渉計を用いて測定が行われたが、 $T \ll T_K$ では $\pi/2$ の位相変化は観測されず、一方で近藤効果が極めて弱い $T \gg T_K$ で $\pi/2$ の位相変化の観測が報告されていた。

私はそのような解釈困難な結果は、測定に用いた干渉計が純粋な2経路量子干渉計として動作していないことに起因すると考えた。従来の干渉計は出力電極が1個であり、流れる電流の干渉振動から位相測定を行うが、観測された位相に想定した2経路干渉以外の余分な寄与が含まれるか否かを知る術はなかった。一方で、我々の独自の干渉計は、2個の出力電極を持ち、干渉計が純粋な2経路量子干渉計として動作しているときは、2個の出力電流の位相がちょうど $\pi$ だけずれた干渉振動を示す。私はその点に着目し、2個の出力電流の位相関係を保ちながら位相測定を行うことで、正確な位相測定が行えることを実証した[1]。この研究では、実証した手法を用いて精密な伝達位相の測定を行い、 $T < T_K$ で近藤効果が発現している量子ドットにおいて、理論的に予測されていた $\pi/2$ の位相変化の初観測に成功した(図2)。また、伝達位相の温度依存性を調べ、 $T$ を $T_K$ に対して上昇させた際に、 $\pi/2$ の位相変化は $T \sim T_K$ 付近まで生き残り、 $T \gg T_K$ では消失することを解き明かした[2, 3]。

#### 2. 表面弾性波を用いた単一飛行電子の制御技術の開発

上記の位相測定に用いた2経路量子干

図1 (a) 従来の量子干渉計。(b) 独自の2経路量子干渉計。独自の干渉計では $I_1$ と $I_2$ の位相関係から余分な寄与を検出可能。

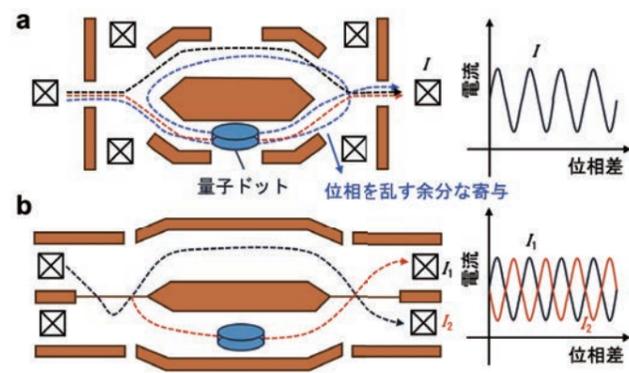
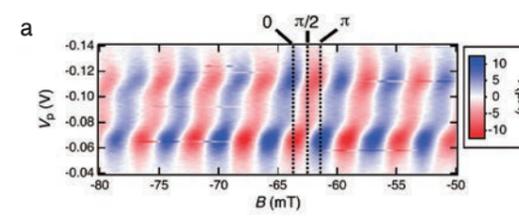
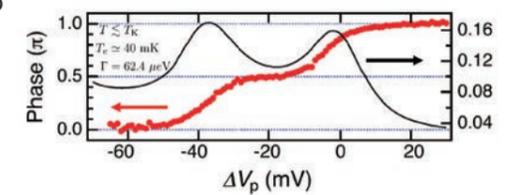


図2



磁場とゲート電圧に依存した量子干渉。

b



電子波の伝達位相と量子ドットを介した電流のゲート依存性。共振ピークを跨ぐごとに位相が $\pi/2$ だけ変化、近藤一重項が形成されるバレー( $\Delta V_p \sim -20$  mV)では位相が $\pi/2$ に固定。

渉計は、導波路中の電子波の精密な量子状態制御を確立することで実現しており、電子の飛行量子ビットとしての応用が可能である。私はその研究で培った伝導電子の量子制御技術を、研究当初、単一電子源、及び単一電子検出器が実現していた唯一の手法であった表面弾性波を用いた単一電子の制御技術と組み合わせることで、半導体中を飛行する単一電子の量子状態制御によって動作する量子素子を実現できると考えた。

本研究では、まず表面弾性波によって運ばれる単一電子の量子状態制御を行う素子の実現を目的として、2本の平行な量子細線がトンネル障壁を介して結ばれた結合量子細線における単一飛行電子の制御に取り組んだ。その実験では、電子の移送効率を従来の約90%から99%を超える効率に高め、系の拡張性の高さを示すとともに、結合量子細線と呼ばれる2本の平行な量子細線がトンネル障壁を介して結ばれた構造を用いて単一飛行電子の制御を行い、ビームスプリッタ操作を実証した(図3)。これにより、量子回路の中で電子の移送方

向の制御を行うことなどが可能となった[4]。次に、単一飛行電子の移送タイミングの制御技術として、1 ns以下の時間スケールの電圧パルスを用いる方法[5]と表面弾性波の孤立パルスを用いる方法[6]を実証した。これらの技術は、複数の単一飛行電子を同期して制御することを可能とし、2個の単一飛行電子の衝突実験によるクーロン相互作用に基づくアンチバンチングの観測[7]などに繋がっている。

### 将来の展望

本研究で開発した精密な位相測定法は、電子の干渉現象を探索する上で有用であり、2チャンネルの近藤効果などのエキゾチックな相関現象を伝達位相の振る舞いから探索するなど、学理の構築に貢献するものと考えられる。また、本研究で築いた表面弾性波を用いた単一飛行電子の制御

技術は、今後はスピンの自由度を絡めた単一電子の衝突実験などにより、フェルミ粒子である電子のバンチングなど、新たな現象の観測に繋がることが期待される。現在、半導体量子素子の開発は、量子ドットに局在した電子を用いる手法が主流であるが、単一電子で駆動する飛行量子ビットを実現することで、自在な量子ビット伝送を含んだ新たな半導体量子情報処理の実現に繋がるものと期待される。

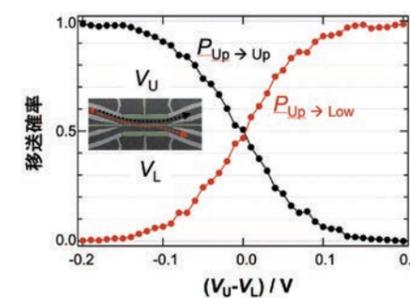
### 謝辞

本研究成果は、東京大学の樽茶清悟教授(現 理化学研究所)、山本倫久助教(現 理化学研究所・東京大学 教授)、仏ネール研究所のChristopher Bäuerle教授、産業技術総合研究所の金子晋久首席研究員をはじめ、国内外の多くの方々から多大なご支援とご協力を得て実現したものです。この場を借りて、深く御礼申し上げます。

### References(参考文献)

- [1] S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, K. Watanabe, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, Appl. Phys. Lett. 107, 063101 (2015).
- [2] S. Takada, C. Bäuerle, M. Yamamoto, K. Watanabe, S. Hermelin, T. Meunier, A. Alex, A. Weichselbaum, J. von Delft, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. 113, 126601 (2014).
- [3] S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, A. Alex, J. von Delft, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, Phys. Rev. B 94, 081303(R) (2016).
- [4] S. Takada, H. Edlbauer, H. V. Lepage, J. Wang, P. -A. Mortemousque, G. Georgiou, C. H. W. Barnes, C. J. B. Ford, M. Yuan, P. V. Santos, X. Waintal, A. Ludwig, A. D. Wieck, M. Urdampilleta, T. Meunier, and C. Bäuerle, Nat. Commn. 10, 4557 (2019).
- [5] H. Edlbauer, J. Wang, S. Ota, A. Richard, B. Jadot, P. -A. Mortemousque, Y. Okazaki, S. Nakamura, T. Kodera, N. -H. Kaneko, A. Ludwig, A. D. Wieck, M. Urdampilleta, T. Meunier, C. Bäuerle, S. Takada, Appl. Phys. Lett. 119, 114004(2021).
- [6] J. Wang, S. Ota, H. Edlbauer, B. Jadot, P. -A. Mortemousque, A. Richard, Y. Okazaki, S. Nakamura, A. Ludwig, A. D. Wieck, M. Urdampilleta, T. Meunier, T. Kodera, N. -H. Kaneko, S. Takada, and C. Bäuerle, Phys. Rev. X 12, 031035 (2022).
- [7] J. Wang, H. Edlbauer, A. Richard, S. Ota, W. Park, J. Shim, A. Ludwig, A. D. Wieck, H.-S. Sim, M. Urdampilleta, T. Meunier, T. Kodera, N. -H. Kaneko, H. Sellier, X. Waintal, S. Takada, C. Bäuerle, Nat. Nanotechnol. 18, 721 (2023).

図3



結合量子細線を用いた単一飛行電子に対するビームスプリッタ操作。閉じ込めの対称性制御によって電子の移送方向が変化、交点ではハーフビームスプリッタが実現。