The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	単一飛行電子を用いた量子電子光学実験
Author(s)	高田, 真太郎
Citation	大阪大学低温センターだより. 2024, 174, p. 11-12
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/94816
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

単一飛行電子を用いた量子電子光学実験

理学研究科　高田　真太郎
Email: takada@phys.sci.osaka-u.ac.jp

2023年10月に理学研究科物理学専攻・新見研究室の准教授に着任いたしました高田真太郎と申します。私はこれまで半導体微細加工技術を用いてナノスケールの量子回路を構築し、半導体中を飛行する電子の量子状態を制御する量子デバイスの研究に取り組んで参りました。本稿では自己紹介を兼ねて、私がこれまでに行ってきた研究について簡単に紹介させていただき、今後新見研究室での私の主要研究テーマの１つとして取り組む予定の単一飛行電子を用いた量子電子光学実験について述べさせていただきます。

私は2014年3月に「量子干渉計における電子のコヒーレント制御と位相測定」という題目で博士号を取得しました。この研究の舞台となるのは、GaAsとAlGaAsのヘテロ接合を持つ基板で、通称HEMT(High electron mobility transistor)と呼ばれる基板を低温に冷却すると、熱揺らぎを抑えられた電子はヘテロ接合界面に強く束縛され、平面的な動きのみを行うことができる二次元電子系が形成されます。実験では、基板表面から約100 nm直下に形成される二次元電子系に対してオーミック電極を作製し、電気伝導測定を行います。この系では基板表面にショットキーゲート電極を作製し、そこに負電圧を与えることで直下の電子を排斥することができるため、適切にゲート電極を設計することで、１次元系である量子細線や０次元系である量子ドット、及びそれらの複合系など多彩な量子回路を構成することが可能です。

私が学生時代に最初に取り組んだ研究は、２本の平行な量子細線がトンネル障壁を介して結合した結合量子細線とアハロノフ・ボーム(AB)リングと呼ばれるリング構造を組み合わせた独自の量子干渉計を作製し、その干渉計を純粋な２経路干渉計として動作させることでした。当時ABリングを用いた干渉計は先行研究で多く研究されていましたが、リングを周回するような余分な干渉経路の寄与を取り除くことが難しく、ABリングを用いた純粋な２経路干渉計と呼べる量子干渉計は実現されていませんでした。私たちの研究では、ABリングの両側で結合量子細線を用いた電子の量子状態制御を適切に行うことで純粋な２経路干渉計を実現することに成功しました。さらに実現した２経路干渉計では、電子が干渉計の上側の経路を通る状態をアップ、下側の経路を通る状態をダウンとして２状態を定義すると、結合量子細線で２状態の重ね合わせ、ABリングで２状態間の位相差を独立に制御できるため、飛行量子ビットを実現できることを示しました[1]。

博士号取得後は、フランスのネール研究所(2014/4-2017/3)、つくばの産業技術総合研究所(2017/4-2023/9)で研究を行ってきました。そこでは、学生時代に研究した量子干渉計をオーミック電極に印加したバイアス電圧で連続的に注入される伝導電子ではなく、単一電子源と組み合わせて動作させることで、固体中を飛行する単一電子の量子状態の制御を実現したいと考え、研究に取り

組んで来ました。そのような研究は、空間を飛行する光子の量子状態を制御して様々な実験が行われている量子光学と対応付け、量子電子光学実験と呼ばれます。量子電子光学では、光子の高い可干渉性を背景に空間を飛行する量子を用いた研究が進展している量子光学とのアナロジーで研究が進展することが期待される他、電子と光子の違いを利用した新たな量子操作なども提案されており、その研究は将来的には大規模な量子電子回路の実現に繋がると目され、近年盛んに研究が行われています。ここで、量子電子光学実験の基本素子である単一電子源については、これまで複数の方式が実現されています[2]。その中で、私はこれまで表面弾性波と呼ばれる物質の表面を伝播する音波を用いた方式を中心に研究を行ってきました。その結果、単一飛行電子に対する方向性結合器操作の実証[3]や２個の単一飛行電子をビームスプリッタで衝突させる実験を行い、クーロン相互作用に起因するアンチバンチングの観測などに成功しています[4]。

また、最近ではレビトンと呼ばれるオーミック電極へのローレンツ型の電圧パルスで励起される単一飛行電子[5]の量子状態制御技術の開発に取り組んでいます。通常、二次元電子系に接続したオーミック電極に電圧パルスを与えると、電子とともに正孔が励起されます。一方で、ローレンツ型の電圧パルスでちょうど整数個に相当する電子を励起すると、正孔励起の生じない純粋な電子励起を実現することが可能です。このレビトンは、フェルミ面上に指数関数的なエネルギー分布を持ち、電子と再結合して緩和を早める正孔励起もないことから高い可干渉性を持つことが期待されます。現在、このレビトンを用いた量子コンピューターの実現に向けた研究プロジェクトに取り組んでおり、今後、その量子状態を高い忠実度で制御する手法を確立するための研究を行う予定です。レビトンは一次元の相互作用液体である朝永ラッティンジャー液体の電荷モードとして知られるプラズモンモードの励起として伝播しますが、その量子回路におけるダイナミクスについてはまだよく知られていません。私は、極低温における高周波技術を用いてそのような相互作用系のダイナミクスについての研究を行うとともに、レビトンを用いた量子コンピューターの実現に向けた基盤技術開発に取り組みたいと考えております。このような研究は、熱揺らぎを抑え、電子の可干渉性を高く保つために希釈冷凍機を用いて極低温化で行われます。そのため、今後コアファシリティ機構低温科学支援部門の皆様には寒剤の使用などでお世話になります。また、コアファシリティ機構低温科学支援部門をご利用されている皆様とは、研究内容や低温実験のセットアップなどについて今後意見交換などをさせていただければ幸いです。どうぞよろしくお願いいたします。

参考文献

[1] M. Yamamoto *et al., Nat. Nanotechnol*. **7**, 247 (2012).

[2] C. Bäuerle *et al., Rep. Prog. Phys*. **81**, 056503 (2018).

[3] S. Takada *et al., Nat. Commun*. **10**, 4557 (2019).

[4] J. Wang *et al., Nat. Nanotechnol*. **18**, 721 (2023).

[5] J. Dubois *et al., Nature* **502**, 659 (2013).