

学位審査報告書

(ふりがな)	やまうち よしあき
氏 名	山内 祥晃
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科化学専攻
(学位論文題目)	
半導体電子干渉計における量子コヒーレンスに関する実験的研究	
論 文 調 査 委 員	(主査) 小林 研介 准教授 小野 輝男 教授 宗林 由樹 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山内 祥晃
論文題目	半導体電子干渉計における量子コヒーレンスに関する実験的研究		
(論文内容の要旨) 半導体や金属を微細加工し、そのサイズを小さくして行くと量子効果が顕著になる領域に達する。このような系をメゾスコピック系と呼ぶ。中でも、半導体二次元電子系を母体に用いて作製されたメゾスコピック系は不純物や欠陥などによる電子の散乱が少ないことから、その量子状態の制御が精密に行えるという特長を持つ。本研究では、半導体メゾスコピック系で観測される代表的な現象である、電子の干渉効果—アハロノフ・ボーム効果—に着目した。これは電子の波動性を色濃く反映した現象であり、昨今では電子マッハ・ツェンダー干渉計という、極めて理想に近い干渉特性を持つと目されているデバイスを用いた研究が盛んに行われている。しかしながら、このような研究の中で、電子の干渉性が失われて行く過程(位相緩和過程)が大きな問題として浮上している。主に問題となっているのは、電子マッハ・ツェンダー干渉計における電子の干渉性が注入電流や熱に対して脆弱であることである。特に後者はローブ構造と呼ばれる現象が発見されて以来、大きな関心が寄せられている。これは、電子干渉デバイスに流す電流を増加すると、位相反転を伴った緩和が生じる、非平衡位相緩和現象である。その発見以来、幾つか理論予測が提唱されているが、未だにローブ構造の起源ははっきりとしておらず、電子マッハ・ツェンダー干渉計に特有の現象であるのか、半導体電子干渉計一般に見られる現象であるのかも良く分かっていない。そこで今回、電子マッハ・ツェンダー干渉計とは異なる電子干渉計を用いて非平衡状態及び平衡状態での位相緩和過程の検証を行い、その普遍性について考察を行った。以下に研究経過の概略を記す。 1, 非平衡状態における位相緩和過程 実験ではファブリー・ペロー干渉計とアハロノフ・ボームリングという、二種類の電子干渉計を用いた。これらのサンプルを、希釈冷凍機を用いて数百 mK 程度に冷却し、伝導度測定を行った。その結果、これら 2 つの干渉計においてもローブ構造の観測に成功した。又、そのエネルギースケールは、電子マッハ・ツェンダー干渉計で見られたものよりも一桁大きな値を持っていることを確認した。複数のグループによる実験で測定されたローブ構造と比較することで、エネルギースケールが強く干渉計の大きさに依存することを見出した。この結果は、干渉計内の伝導電子間に働くクーロン相互作用がローブ構造の起源である可能性を強く示唆するものである。 2, 平衡状態における位相緩和過程 この実験では、先の実験で用いた干渉計における電子干渉の熱的緩和現象に関する測定を行った。本実験の結果と既報の実験結果を比較検討した結果、測定系が量子ホール状態にあるときのみ、特性温度(熱的緩和のし易さを示す指標)と干渉計の大きさとの間に普遍的な関係が存在することが確認された。これは、量子ホール状態にある電子干渉計中の伝導電子の位相干渉長が干渉計の形状や磁場強度等に依存せず、ほぼ一定の値を取る可能性があることを示す結果である。			

(論文審査の結果の要旨)

半導体メゾスコピック系はその制御性の高さから、電子の量子力学的性質を検証するのに理想的な舞台を提供している。申請者は今回、半導体電子干渉計を用いることで、バリスティック系における電子のコヒーレンスの定量的評価をテーマにした研究を行った。コヒーレンスはメゾスコピック物理の中心的テーマであり、長い研究の歴史がある。しかしながら、数多くの研究例が存在しているにも関わらず、特にバリスティック系での電子のコヒーレンスについては、統一的な理解が進んでいないのが現状である。また、近年、電子干渉計を量子情報デバイスに応用しようという研究に注目が集まっているが、そうしたデバイスのコヒーレンスがバイアス電圧や熱に対して極めて脆弱であるという問題点が指摘されている。特にマッハ・ツェンダー干渉計という電子干渉計で発見されたローブ構造と呼ばれる特異な非平衡位相緩和過程は、その起源や普遍性について議論が続いている状態であり、解明が待たれている。本研究はそのような背景から、電子のコヒーレンスが何によって決まるのかを検証する試みであり、古典的でありながらも非常に現代的なテーマであると位置付けられる。

研究は、極低温下に置かれた、ファブリー・ペロー干渉計とアハロノフ・ボーム(AB)リングという二種類の電子干渉計を用いることで行われている。非平衡領域における位相緩和現象の実験的評価を通して、バイアス電圧の増加に伴う AB 振動の位相反転や位相緩和現象を見出した。これはローブ構造と呼ばれる現象であり、電子干渉計一般に見られ得る現象であることを見出した。また、そのエネルギースケールがサンプルサイズに反比例するという、普遍的な関係を発見した。これらの事実から、申請者はローブ構造の起源が電子間に働くクーロン相互作用である可能性を指摘している。また、平衡領域における位相緩和(熱的位相緩和)過程に関する実験から、量子ホール状態にある電子干渉計は熱的緩和し易い傾向にあることや、その特性温度がサンプルサイズに反比例する関係にあるという結果を得ている。このことから申請者は、量子ホール状態にある電子のコヒーレンスは、通常の電子伝導と異なり、サンプル形状や基板特性に依らずある普遍性に支配されていることを示唆する結果であると指摘している。

本研究の成果は、バリスティック系における電子のコヒーレンスの実験的検証によってその普遍性を見出し、これを統一的に理解することに成功したことであり、メゾスコピック物理の発展に大きな貢献を果たすものと期待される。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について平成 22 年 1 月 19 日に試問を行なった結果、合格と認めた。