

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740230
 研究課題名（和文）ノード的準粒子の量子干渉効果の数理構造とグラファイトなどへの応用

研究課題名（英文）Mathematical Structure in the Quantum Interference Effects of Nodal Quasiparticles and its Application to Graphite etc.

研究代表者

守田 佳史（MORITA YOSHIFUMI）
 群馬大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：10292898

研究成果の概要：グラファイト（グラフェン）における量子干渉効果のうち、[1]状態密度および電気伝導度における欠陥による量子効果（非自明な指数をともなう低次元量子臨界現象の発現）[2]欠陥のまわりの局所状態密度（あたらしい共鳴状態の発見およびSTM実験への予言）に関して知見を得た。さらには、ノード的準粒子の発現は、グラファイト（グラフェン）のみならず2次元d波超伝導をはじめとした近年注目を集めている新奇な超伝導体、さらには有機導体をはじめとしたいくつかの強く相互作用する電子系でもその可能性が提案されている。それらを念頭に分野横断型の分析を発展させた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、数理物理・物性基礎

キーワード：数理物理、情報基礎、超伝導材料素子、物性基礎論、ナノ材料

1. 研究開始当初の背景

A. K. Geimらによりグラフェン（Graphene=単原子層グラファイト）が作成された[Nature438, 197(2005)など]。グラフェンではその特徴的構造を反映して、2次元におけるノード的準粒子が実現している。事実、特異な量子ホール効果（ホール伝導度が離散的な値をとる現象）などをはじめとした著しい実験結果のうちいくつかはすでにそのような観点から分析されており、私の理論的結果もその議論のなかで役割をはたしている。ま

た、この新奇な量子効果に注目した量子デバイス（量子力学の原理を利用したナノデバイス）の提案もすでに実験サイドからいくつかあり、将来次世代エレクトロニクスの一翼を担う可能性に注目が集まりつつある。つまり、ごく最近の大きな実験的進展を背景にしてグラファイト（グラフェン）をキーワードに2次元におけるノード的準粒子の基礎科学的側面に新しいひかりがあたりはじめているのと同時に、量子デバイスなど応用の可能性が拓きはじめているという背景がある。

2. 研究の目的

私は『1. 研究開始当初の背景』で述べたような事柄を念頭におき、以前からの研究の発展として、グラファイト（グラフェン）における欠陥による量子干渉効果に重点をおいた。この系における欠陥のもたらす物理の解明は、半導体物理でそうであったように、基礎および応用の観点から最重要な課題のひとつであると考えている。またこれは以前私が真木和美とともにおこなった磁場下2次元d波超伝導体における量子渦の物理の理論形式の発展ともいえる。さらには、上でもふれたように欠陥による量子干渉効果を数理構造に注目して解明するという独特の視点もある。このような背景に、本研究の特色と独創的な点がある。今回のグラフェンの発見にともない集中的な研究が近年世界中で始まったが、私はそのような文脈から独立して1997年前後よりすでに対応する理論的モデルである2次元におけるノード的準粒子の研究を開始しており、有利な立場である。またノード的準粒子の発現はグラフェンのみならず、すでに触れた2次元d波超伝導体をはじめとした近年注目を集めている新奇な超伝導体、さらには有機導体をはじめとしたいくつかの強く相互作用する電子系でもその可能性が提案されている。また私の以前のHubbardモデルにおける研究もそのような提案をしている。より具体的に目的を述べると、グラファイト（グラフェン）における欠陥による量子干渉効果のうち、欠陥の理論的モデル化をおこなったのちに、[1]状態密度および電気伝導度における欠陥による量子効果（非自明な指数をとともなう低次元量子臨界現象の発現）[2]欠陥のまわりの局所状態密度（新しい共鳴状態の発見およびSTM実験への予言）[3]グラフェン量子ホール効果の大域相図（欠陥による量子ホール効果の「崩壊」の仕方の解明）となる。いずれも特異な状態密度などに起因する独特な量子干渉効果が期待できる。いずれも現在グラフェンの文脈で実験、理論ともに集中的な研究が開始しているが、すでにのべたように私はそれにさきがけた研究をすでにおこなっており、特色があり独創的な研究が期待できる。さらには私の理学部および工学部をともに経験していることを活かし、量子デバイスなどにも提案をおこないたい。事実グラフェンは炭素原子が共有結合を通して結びつき強固な安定性があり、金属銅とくらべて二桁近く大きな電流密度がある。さらにはカーボンナノチューブと比べても、接触抵抗が小さいなど応用上も有利である。これと上記の独特な量子干渉効果を組み合わせで本質的に新しい量子デバイスの可能性が拓けるといいう意義もあると考えている。

3. 研究の方法

本研究では低次元性に起因する非摂動論的效果が随所に現れることが予想され、それが興味深い量子効果につながる反面、解析的アプローチを一般には困難にさせる。このようなときは解析的アプローチと数値的手法を相補的に用いるのが正攻法である。計算機環境を整備し、有効なソフトウェアを導入することによってこの問題を解決する。またすでに述べたように2次元におけるノード的準粒子は低エネルギー極限では(2+1)次元のDirac粒子（相対論的フェルミオン）としてふるまい、この事実が特異な量子干渉効果において重要な役割を果たす。つまり本研究は従来は巨大加速器による高エネルギー物理学が主に研究対象にしていたDirac粒子（相対論的フェルミオン）を固体中に創成し系統的に研究できるという基礎科学的側面と、うえにのべたグラフェンの量子デバイス（量子力学の原理を利用したナノデバイス）への応用など次世代エレクトロニクスへつながる可能性がる応用科学的側面が共存している。このように基礎から応用までまたがり、理学および工学の融合したようなアプローチは、東京大学理学部で研究を始め、助手時代は東京大学工学部に属し、さらに現在は群馬大学工学部に独立した研究室をもち、大学院は電気電子工学科にかかわっている私が特色と独創性を発揮できるテーマである。本研究ではこのような特色を最大限に活かしたアプローチをとったとも考えている。さらには、私は昨年度から物質材料研究機構(NIMS)の実験グループと、量子デバイス（量子力学の原理を利用したナノデバイス）実現を念頭においたカーボンマテリアルの理論・実験の共同研究を開始した。現在はラマン分光法（可視光領域の波長の光をプローブとしてフォノンなどのダイナミクスを調べる実験手法。物質の微視的情報がラマンシフトと呼ばれる散乱長の波長のズレとして検出される）を用いたグラフェンの評価法を理論・実験ともにほぼ確立し、その成果の一部は国際会議で発表済みで、現在論文投稿中である。今は実験サイドでは輸送現象の測定へ向けて進展しており、集積回路などの作成の端緒になるはずである。これらの延長で、カーボンベースの量子デバイス（量子力学の原理を利用したナノデバイス）の提案につなげていく予定でもある。このように本研究プロジェクトに「直接」対応する私の理論部門は独立した目的を持ち、同時に他の実験/理論グループとも横断的なコミュニケーションを積極的におこなった。

4. 研究成果

グラファイト（グラフェン Graphene=単原子層グラファイト）における量子干渉効果のうち、[1]状態密度および電気伝導度における欠陥による量子効果（非自明な指数をとる低次元量子臨界現象の発現）[2]欠陥のまわりの局所状態密度（あたらしい共鳴状態の発見およびSTM実験への予言）に関して知見を得た。さらには、ノード的準粒子の発現は、グラファイト（グラフェン Graphene=単原子層グラファイト）のみならず2次元d波超伝導をはじめとした近年注目を集めている新奇な超伝導体、さらには有機超伝導体をはじめとしたいくつかの強く相互作用する電子系でもその可能性が提案されている。それらを念頭に分野横断型の分析を発展させた。より具体的には Vortex Motion in quasi-2D d-wave Superconductors と題し、phys. stat. sol. (b)に成果を発表した。さらにはグラフェン量子ホール効果（ホール伝導度が離散的な値をとる現象）の大域的相図（欠陥による量子ホール効果の「崩壊」の仕方の解明）についても考察を開始し知見を得た。また関連してノード的超伝導を位相幾何学的数で分類し、それを基礎にした超伝導渦のコア状態の性質の分析およびその実験的検出に関して知見を得た。具体的にはまず最初のステップとして、3重項ノード的超伝導におけるハーフヴォルテックス（通常のヴォルテックスの1/2の磁束をとるヴォルテックス）について系統的な研究をし、結果を整理し、さらにはそれを含む成果を Journal of Superconductivity and Novel Magnetismなどにレビューとしてまとめた。

さらには、私は昨年度から物質材料研究機構(NIMS)の実験グループと、量子デバイス実現を念頭においたカーボンマテリアルの理論・実験の共同研究を開始した。現在はラマン分光法（可視光領域の波長の光をプローブとしてフォノンなどのダイナミクスを調べる実験手法。物質の微視的情報がラマンシフトと呼ばれる散乱長の波長のズレとして検出される）を用いたグラフェン Graphene=単原子層グラファイトの評価法を理論・実験ともにほぼ確立し、その成果の一部は国際会議で発表済みで、現在論文投稿中である。今は実験サイドでは輸送現象の測定へ向けて進展しており、集積回路などの作成の端緒になるはずである。

またノード的準粒子に関する包括的なまとめを LECTUERS ON THE PHYSICS OF STRONGLY CORRELATED SYSTEMS XI, 2007の中に記し、関連する数理構造について国際会議における口頭発表などもおこなった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5件）

1. H.-Y. Kee, Y. Morita and K. Maki, New Paradigm of Triplet Superconductivity, ACTA PHYSICA POLONICA A, 115 巻, 73-76, 2009, 査読有

2. K. Maki, H.-Y. Kee and Y. Morita Triplet Superconductivity in a Nutshell, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 22 巻, 71-74, 2009, 査読有

3. Y. Morita and K. Maki, Vortex Motion in quasi-2D d-wave Superconductors, phys. stat. sol. (b), 245 巻, 986-991, 2008, 査読有

4. H. Won, Y. Morita and K. Maki, High Tc cuprate superconductivity as a new paradigm, phys. stat. sol. (b), 244 巻, 4371-4385, 2007, 査読有

5. Y. Morita, Quantum effects in (2+1)-dimensional Dirac fermion and nodal superconductivity, phys. stat. sol. (b), 244 巻, 2508-2512, 2007, 査読有

〔学会発表〕（計 2件）

1. Y. Morita, (2+1)-dim. Dirac fermion and nodal superconductivity, MSM, 2007 年 9 月 24-29 日, Khiva (Uzbekistan)

2. Y. Morita, Quantum Algebra in Condensed Matter: the tJ and Azbel-Hofstadter model, ISQS, 2007 年 6 月 13-18 日, Prague (Czech Republic)

〔図書〕（計 1件）

1. Y. Morita, Melville, LECTUERS ON THE PHYSICS OF STRONGLY CORRELATED SYSTEMS XI, 2007, 4pages

6. 研究組織

(1) 研究代表者

守田 佳史 (MORITA YOSHIFUMI)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10292898

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：