

研究課題別 評価結果

1. 評価の概要

対象領域：戦略的国際共同研究プログラム (SICORP) 日独共同研究「ナノエレクトロニクス」

対象期間 (研究実施期間)：2010年2月～2013年3月末日

2. 共同研究課題 「トポロジカルエレクトロニクス」

3. 日独研究代表者名 (研究機関名・職名は研究期間終了時点)：

日本側研究代表者 樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

ドイツ側研究代表者 Laurens W.Molenkamp (ヴェルツブルク大学実験物理学部 EP3 教授)

4. 研究実施概要

本課題は、スピン軌道相互作用、トポロジカル絶縁体、非局所的なエンタングルメント生成といった現象に着目して、新しい量子力学的自由度を利用するエネルギー散逸のないエレクトロニクスを構築することを目的として開始した。成果の詳細については添付の報告書参照。

5. 事後評価結果

5-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果 (論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

日本とドイツそれぞれの側から理論、実験、計測で有力な研究者が集まり、研究を推進した。トポロジカル物理という同じテーマを掲げているが、たとえば試料ひとつをとってみてもドイツ側の HgTe に対して日本側の GaAs など、各々の研究手法には得意とする部分が異なり、共同研究の意義が認められた。研究は、スピン軌道相互作用、トポロジカル絶縁体、非局所エンタングルメントをキーワードとする 3 つのテーマで行われた。

(1) スピンを情報の担体として確立するための、基礎的な研究が行われた。幾つか列挙すると、○ スピン軌道相互作用を操作することにより、スピンが散乱を受けない persistent spin helix 状態の実現 ○ スピンのベリー位相が計算通りの振舞いをすることを微細回路で実証 ○ 量子ドット中の電子に対して電場による直接的な Rashba 効果の検証。

(2) 本研究開始以前にドイツ側では HgTe でトポロジカル絶縁体の実現することが示されていたが、その後エッジ状態を使ったスピン流の回路を実際に作り、輸送現象を測定するところまでに至った。さらに最近では、トポロジカル超伝導体に研究対象が広がられている。

(3) スピンが量子情報を担うためには、非局所なエンタングルメントを実際に示す必要がある。二つのスピンのエンタングルメントを示す典型的な実験として、singlet 状態の 2 スピンを各々独立の履歴をさせた後で singlet 状態が維持されることを示すための様々な実験的工夫がなされた。未だ、最終目標には到達していないが、2 つのスピンをある操作の後に干渉させるための基礎的なデバイスが複数のシナリオで作製され、その性能が調べられた。

以上のように、非常に遠い将来であろうと予想されるものではあるが、量子理論の幾何学的な構造に基づく離散性によって、擾乱に強い耐性をもつと考えられる量子位相を情報担体とするエレクトロニクスの基礎が多方面で進展した。成果は質量ともに優れている。特許の出願は無いが、研究の性格からして止むを得ないであろう。

共著論文数：4

日本側チーム論文数：59

特許出願数：0

5-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト

本チームの研究内容は新規性が高く、基礎研究分野では国際的に注目を集めている。チーム構成は、量子位相操作の概念を牽引する理論家と、量子現象を測定可能にするナノスケール試料を開発する実験家より成り、いずれも世界のトップレベルにある。この研究期間中の成果だけでも、基礎科学においてこの分野の先導的立場を維持し十分強い影響力を示した。

応用面での究極目標は量子位相をビットとする情報処理素子であるが、その実現までにはかなりの距離があり、応用上インパクトのある現象が派生的に発見されるにはいたっていない。したがって、現状では社会にインパクトを与えていないが、上述の通り学術研究の技術面、基礎物理の新規領域の開拓という面での成果は高く評価できる。

5-3. わが国の科学技術力強化への貢献（共同研究状況、研究交流活動状況等を含む）

日本のナノ量子物理実験技術の最先端を駆使する研究グループであり、その成果は国際的にも高く評価されている。それぞれのグループが新規な内容を含む多数の研究論文を発表しているが、日独の共著論文は新田および永長のグループによって発表されており、この部分では共同研究による大きな成果が得られている。理論グループと実験グループの連携も密に行われて成果につながっている。

国際研究集会は年一回開催されているが、国際協力が大きな相乗成果を生み出しているかどうか、は不明な点が残る。日本からドイツへの訪問者数に比べると、逆にドイツから日本への訪問者の数は少なく、アンバランスな印象を受ける。

研究課題別 評価結果

1. 評価の概要

対象領域：戦略的国際共同研究プログラム（SICORP）日独共同研究「ナノエレクトロニクス」

対象期間：2013年4月～2015年3月末日

2. 共同研究課題 「トポロジカルエレクトロニクス」

3. 日独研究代表者名（研究機関名・職名は研究期間終了時点）：

日本側研究代表者 樽茶 清悟（東京大学大学院工学系研究科 教授）

ドイツ側研究代表者 Laurens W. Molenkamp（ヴュルツブルク大学実験物理学部 EP3 教授）

4. 研究実施概要

物質の電子状態の幾何学的構造に由来する量子力学的特徴は、系を連続的に変形させるような外乱に対して保存される。このことを、系はトポロジカルに保護されていると表現し、そのような状態を用いた電子技術（トポロジカルエレクトロニクス）を本課題で提案し研究を遂行した。当初設定した期間（H22～24）にスピン軌道相互作用、トポロジカル絶縁体、非局所的なエンタングルメント生成などのキーワードに沿って研究を実施し、十分な成果が得られたため、さらなる研究の進展を期待して H25～26 に渡り期間延長を行った。成果の詳細については添付の報告書参照。

5. 事後評価結果

5-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果（論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む）

本テーマは日本とドイツそれぞれの側から理論、実験、計測で有力な研究者が集まって行われた。両グループは、テーマは共通ながら材料、計算・計測手法が異なり相補的であり、共同研究の意義が十分に認められた。延長前に得られていたスピン・軌道相互作用の外場による操作、エッジ状態のスピン流、電子対の移送などの現象をより定量的に明らかにするとともに、スキルミオンのダイナミクス、マヨラナフェルミオンの探索、バレー・ホール効果など、その後に新たに展開されたテーマに関しても、世界をリードする役割を果たした点は高く評価される。

延長前の評価で、日独共同研究の目に見える成果物が少ないとの批判があったが、多くの共著論文を出版することによって状況は大きく改善された。また関係研究者ほぼ全員が参加する合同研究会も毎年開催され、活発な議論が交わされるとともに、大学院学生・ポストドクターレベルの若手研究者の相互派遣も情報交換、技術移転に貢献した。

以上のように、本共同研究を通じてトポロジカルエレクトロニクスの基礎が多方面で進展した。成果は質量ともに優れている。特許の出願は無いが、研究の性格からして止むを得ないであろう。

H25～26 の主な業績

共著論文数：6

日本側チーム単独論文数：31

特許出願数：0

5-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト

本チームの研究内容は高い新規性によって基礎研究分野では国際的に注目を集めている。チーム構成は、量子位相操作の概念を牽引する理論家、量子現象を測定可能にするナノスケール試料を開発する実験家より成り、得意とする技術は両国で相補的な関係にある。延長期間中は、それ以前に明らかになっていた現象を定量的に押さえて位相制御をより工学に近づけることに成功した。永続的スピン螺旋状態

の実現、一重項状態の電子を空間的に分離した後再び元に戻る過程の検証などがこれに当たり、今後工学的視点を持ってこの分野に参入する研究者が現れることが予想される。また、トポロジカルエレクトロニクスの新展開として、マヨラナフェルミオン、スキルミオンダイナミクス、バレー・ホール効果など、新しい状態を探索し、幾つかの示唆的な結果を得た。今後、これらも定量的な理解へ向けた広範な取り組みの呼び水になるであろう。

応用面での究極目標は量子位相をビットとする情報処理素子であるが、その実現までにはかなりの距離があり、応用上インパクトのある現象が派生的に発見されるにはいたっていない。したがって、現状では社会にインパクトを与えていないが、上述の通り学術研究の技術面、基礎物理の新規領域の開拓という面での成果は高く評価できる。

5-3. わが国の科学技術力強化への貢献（共同研究状況、研究交流活動状況等を含む）

日本側グループは、トポロジカルエレクトロニクスの提唱者を含むトップレベルの理論家とナノ量子物理実験技術の最先端を駆使する実験家より成る。一方、ドイツ側は材料開発と計測に重心があるグループ構成であり、内容的には相補的な関係にある。延長前の評価においては、両者の相補的な協力関係は必ずしも明確ではなかったが、延長期間中はサンプルの交換、共同実験など有意義な交流が行われた。特に、接合の作製法や高周波測定技術においては、ドイツ側の技術移転が新現象を検出する鍵となった。

2度のワークショップはいずれも日本で行われ、ドイツ側の殆どの研究スタッフと大学院生が参加し、活発な議論が交わされた。