

## 学位論文の要約

題目 **Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>薄膜における量子干渉効果の研究**

氏名 松尾 貞茂

### 序論

微細加工技術の発展にともなって、電子が微小領域を伝導する際の量子干渉効果の重要性が認識され、活発に研究がおこなわれてきている。量子干渉効果とは、電子が波動関数で記述できることに起因し、電子波の干渉によって、輸送が特徴的な振る舞いをする現象のことである。代表例として、アンダーソン局在と普遍的伝導度ゆらぎ (UCF) がある。この二つの現象はともに1980年代に金属薄膜や半導体2次元電子系において非常によく研究され、理解されるに至っている。これら量子干渉効果は、系の伝導特性にどのような相互作用が寄与しているのか、その大きさがどのくらいなのかといった重要な情報を得るツールとして用いられる。

近年、強いスピン軌道相互作用によって、非自明な物質相であるトポロジカル絶縁体が発現することが理論的に予言され、実験的に確認された。この物質は、バルクではエネルギーギャップを持ち絶縁体になっているが、表面に特殊な表面状態が形成されており、電流を流すことができる。さらに、この表面状態の電子はディラック方程式で記述されることが知られており、電子スピンの運動量方向に対して偏極している。このディラック電子のスピン偏極はさまざまな新奇量子現象、新奇電磁気現象の発現をもたらすことが期待されており、トポロジカル絶縁体はディラック電子の基礎物性に迫る格好の舞台として世界的に研究がおこなわれている。このような新規物質における量子干渉効果を研究することの重要性は、グラフェンの基礎物性の解明に際して、メゾスコピック物理の知見を活かした量子干渉効果の研究と理解が大いに役立った事実からも明らかである。2007年の2次元トポロジカル絶縁体の発見以降、2次元トポロジカル絶縁体の量子干渉効果の研究が行われてきており、多くのことが明らかになってきた。それに対して、3次元トポロジカル絶縁体の量子干渉効果の研究は、試料作製が困難であったこともあり、報告例が少なく、解明に至っていなかった。とくに、3次元トポロジカル絶縁体の伝導度ゆらぎに関しては、はじめて報告された論文で起源が不明であることが指摘されて以来、起源が未解明なままであった。

本論文では、3次元トポロジカル絶縁体の典型的な物質であるBi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の量子コヒーレンスに関する実験を系統的に行い、未解明だった伝導度ゆらぎが普遍的伝導度ゆらぎ(UCF)であること、また、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>でのUCFが定量的に理論と一致することを初めて明らかにした研究に関して記述する。

### 1. Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の電子のコヒーレンスに関する研究

まず、本学位論文では、量子干渉効果の理解と伝導度ゆらぎの起源解明を目指して行っ

た、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 薄膜を微細加工して作製された260 nmの細線幅を持つホールバー型の形状試料の実験結果、解析、考察をまとめて記述している。この研究では低温・強磁場下での電気伝導度の磁場依存性および温度依存性の測定を行った。先述のとおり、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の伝導度ゆらぎは起源が不明な現象であったが、このゆらぎの起源がUCFであると仮定して解析を行った。UCFとして解析を行うことで伝導度ゆらぎから電子のコヒーレンス長の導出を行うことができる。さらに、この電子のコヒーレンス長は弱反局在効果からも導出することができる。 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ における弱反局在効果の実験報告例は既に多数存在しており、その結果と伝導度ゆらぎから導出された結果を比較することで、信頼性の高い $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の電子の位相コヒーレンスに関する情報を得ることができる。これら2種類の方法を用いて導出されたコヒーレンス長を比較した結果、コヒーレンス長は導出方法によらずほぼ一致することがわかった。同一試料での信頼性の高い現象からの情報と比較することで伝導度ゆらぎの起源に迫る結果を導いているため、この結果は信頼性の高いものであり、非常に意義深い。さらに、コヒーレンス長の温度依存性を調査した。その結果、コヒーレンス長は温度の上昇に対して温度のべき関数で短くなっていき、そのべき指数はほぼ-1/3となることがわかった。ここから、電子のコヒーレンスが壊れる機構に関して、ナイキスト機構という電子間相互作用による機構が主要な寄与をしていることがわかった。最後に $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の伝導度ゆらぎの温度依存性が、コヒーレンス長が熱拡散長よりも大きく、細線長さよりも小さい場合のUCFの理論で説明可能であることを明らかになった。この研究から、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の伝導度ゆらぎは起源をUCFとするものであることが明らかになった。

## 2. $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ における伝導度ゆらぎの大きさの定量的な評価

実験1によって、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で観測される伝導度ゆらぎの温度依存性やコヒーレンス長の比較から、ゆらぎの起源がUCFであることが明らかになった。しかし、上記の結果には不足している点もあった。それは伝導度ゆらぎの大きさの評価に関する疑問が残ったことである。伝導度ゆらぎの起源がUCFであるのかが不明とされた大きな要因は、ゆらぎの大きさがUCFの理論から予想される値よりもかなり大きかったことにある。先述の実験では、伝導度ゆらぎの大きさの温度依存性の評価はしているものの、ゆらぎ自身の大きさがUCFで記述されるものとして妥当であるかどうかに関しては検証できていなかった。この問題点に加え、メゾスコピック系におけるUCFの研究という点で、擬1次元系においてスケール関係式が成り立つのか、また、UCFの大きさはランダム行列のユニバーサリティクラスと縮重度によって記述される値程度になるのかは実証されていなかった。

そこで、本学位論文では、定量的な伝導度ゆらぎの評価のために行った、100 nmという非常に細い幅を持つ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 細線における伝導度ゆらぎの温度・細線長さ依存性の実験結果をまとめて記述している。この系は擬1次元系とみなせるものとなっており、弱反局在効果、およびUCFの解析は擬1次元系のモデルを用いて行った。実験として、2–15  $\mu\text{m}$ の様々な細線長さをもつ各細線試料の伝導度の磁場依存性・温度依存性の測定を行った。この測定

結果からゆらぎの成分を抽出し、細線長さ、コヒーレンス長、熱拡散長に対するゆらぎの大きさの依存性を調査した。その結果、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の伝導度ゆらぎの大きさは細線長さ・コヒーレンス長・熱拡散長によってスケーリングされ、UCFのスケーリング関数で温度・細線長さ・コヒーレンス長によらずに説明できることがわかった。また、伝導度ゆらぎの大きさはUCFの理論で予想されるものとほぼ一致していることがわかった。UCFのスケーリング関係の係数が試料の対称性（時間反転対称性が破れており、スピン縮重がなくなっている系）を反映した理論値とほぼ一致していることを実験的に示したのはこの研究がはじめてである。

以上の結果は、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ という現在注目されている物質における量子干渉効果を定量的に明らかにしただけでなく、スピン軌道相互作用の強い系で、UCFというメゾスコピック系の物理において普遍的な現象のスケーリング関係およびその大きさの検証を初めて系統的に行ったという点でも非常に大きな意味を持つ。