

半導体中の2次元電子系が強磁場下で示す基本的な伝導現象として量子ホール効果と呼ばれる現象が存在する。量子ホール効果状態を示す2次元電子層の端に沿ってエッジ状態と呼ばれる1次元的な電子状態が生成する。従来、このエッジ状態のスピン自由度まで含めた固有状態について十分理解が進んでいなかった。その理由は、スピン状態がナノメートルオーダーで空間的に変化する一方、それを検知可能な空間分解能を有する実験手法が存在しなかったためである。本論文の内容は、エッジ状態の電子スピンの半導体母体結晶(GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造)の核スピンとの間に超微細相互作用を持つことを巧みに利用して、電子スピンに対するナノメートルオーダーの空間分解能と感度を持つ測定系を構築し、エッジ状態の電子スピン状態の実験的理解を深めたものである。特に、エッジ状態におけるスカーミオンと呼ばれる電子スピン系の形態を初めて実験的に実証した。(通常、電子スピンの状態は磁場に対して平行か反平行かによってエネルギーが異なり、電子スピンを一つ反転させるためにはゼーマンエネルギーを要するが、スカーミオン生成下では多体効果のために実効的にエネルギーギャップが消失する。)研究の主な成果は以下の2つからなる。第一の成果は、非平衡分布したスピン分離エッジ状態によって生成した核スピン偏極の(エッジ状態に垂直方向の)空間分布を初めてナノメートル精度で明らかにし、かつ、核スピン偏極の生成・減衰の時間的ダイナミクスを核スピン偏極の拡散を含めて詳細に明らかにしたことである。これら第一の成果は、この研究のハイライトとも言うべき第二の研究に進むための実験手法の構築という意味がある。第二は、第一の研究で明らかになった核スピン偏極を、エッジ状態の電子スピン状態をナノメートルスケールで精密に調べるための微細プローブとして用いている。エッジ状態の電子スピン状態が静電ポテンシャルの勾配の大きさや磁場強度によって系統的に大きく変化することを明らかにし、その結果を理論的予測と比べることにより、15年以上前から理論的に存在が予測されながら確認されなかったスカーミオンが生成されていることを実験的に初めて明らかにした。以上をまとめ、本研究は強磁場中2次元電子系の基礎的理解の進展に大きな寄与を与えたと認められる。

本論文は7章からなる。第1章は序論で、エッジ状態の基本と核スピン偏極生成の物理的機構に触れたうえで本論文の目的を記している。第2章は量子ホール効果の一般的な解説に当てられ、第3章は試料や電氣的測定系を含めた実験系を解説している。第4章—6章は実験結果と考察に当てられる。まず第4章でエッジ状態の電子スピン系で核スピンを生成して検出する基本的実験結果が示され、第5章で核スピン偏極の空間分布と、生成後の時間的減衰の特徴が明らかにされ、生成メカニズムとともに減衰のメカニズムが明らかにされる。第6章は第5章、6章で明らかになった核スピン偏極の時空的特性を利用して、

エッジ状態の電子スピン状態を解明する実験結果が記述され、核スピン偏極の減衰時間の詳細な測定より、スカーミオンの生成 (Spin-textured edge states の出現) が結論される。第 7 章は結論のまとめとともに、さらなる発展的課題が記されている。

結び

なお、本論文の第 5 章と 6 章は、小林氏と小宮山氏との共同研究だが、論文の提出者が主体となって測定法の開発に当たりかつ実験を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、本審査委員会は博士 (学術) の学位を授与するにふさわしいものと認定する。