

論文審査の結果の要旨

氏名 関原 貴之

本論文では、空間反転対称性の破れた2次元超伝導のスピン状態を実験的に研究し、理論的に予言されていた特異な性質を発見した成果が報告されている。空間反転対称性の破れた超伝導では、パリティの破れたクーパー対が形成され、スピン一重項対・三重項対の混合、超伝導磁気電気効果、オーダーパラメータの位相が空間変調された超伝導状態の出現など、伝統的なBCS理論の枠をはみだした新規な物性の発現が理論的に予言されており、最近精力的に研究されているホットなテーマである。結晶構造に空間反転対称性のない物質を用いた研究は先行研究として多くの報告があるが、論文提出者は、絶縁体基板上に金属単原子層超伝導体を形成して空間反転対称性の破れた超伝導系を作った。物質表面では一方が真空であり他方が物質なので表面に関して鏡面对称性がない、つまり空間反転対称性が破れていることになる。そこに、垂直または平行方向に磁場を印加して電気伝導度を測定することによってクーパー対のスピン状態を実験的に初めて明らかにしたのが本論文である。単原子層超伝導鉛の層に平行に磁場を印加した場合、パウリ限界を超える強磁場でも超伝導が破壊されないこと、それは、強いスピン軌道相互作用によるラシュバ・スピン分裂したフェルミ面で説明できること、さらに磁場中ではオーダーパラメータの位相が空間変調されたヘリカル相と呼ばれる状態になっていることを、理論との定量的な比較によって結論した。また、スピン軌道相互作用の弱い単原子層インジウム超伝導体についても実験を行い、鉛の場合と比較して上記の結果を補強した。これらの結果は、結晶表面上の単原子層超伝導を、空間対称性の破れという観点から明らかにしたものであり、超伝導研究に新たな進展をもたらす実験的発見である。

本論文は4つの章から構成されている。第1章では本研究の背景として、単原子層超伝導、表面ラシュバ効果、および空間反転対称性の破れた超伝導に関する先行研究を概観し、その中から生まれた問題意識および本研究の目的が述べられている。第2章では、本研究で使用

した実験装置である真空中磁場下超低温電気伝導測定装置の構造と特徴について述べている。その場で基板結晶をへき開し、その表面上に金属原子層を蒸着できるユニークな装置となっている。磁場中で動作する温度計の精密な校正実験も行われており、それをもとに超伝導転移温度の微小な変化の測定が可能となった。第3章で、真空中でへき開したGaAs結晶基板表面上に蒸着した鉛とインジウム単原子層の超伝導特性の測定結果と解析が述べられている。鉛原子層の場合、パウリ限界を超える極めて強い平行磁場を印加しても超伝導が破壊されず、超伝導転移温度がほんのわずかに減少するだけであること、それは強いスピン軌道散乱によって臨界磁場が上昇していること、またオーダーパラメータの位相が空間変調した超伝導状態としてストライプ相ではなくヘリカル相の理論で実験結果がよく説明できることを明らかにした。鉛に比べて比較的スピン軌道相互作用の弱いインジウム原子層でも同様の実験を行い、鉛の場合と異なり、平行磁場の印加によって超伝導転移温度が顕著に減少することを見出した。鉛との比較によってインジウムの場合にはラシュバ・スピン分裂のエネルギーが一桁小さいことを、自身が拡張した理論とのフィッティングによって定量的に導いた。第4章において本論文で明らかにされた結果とその意義がまとめられており、さらに他の実験手法による研究も含めて今後の研究の展望が述べられている。付録として、本研究で実験データの解析に必要な理論がまとめられている。

以上のように、論文提出者は、絶縁体基板上の単原子層で見られる2次元超伝導に関して、空間反転対称性の破れた超伝導としての特異な物性の実験的証拠を示した。これは、世界的にも初めてとなる成果である。この成果は、単原子層・表面状態超伝導の研究に確固たる一歩を記し、さらなる基礎的・応用的研究のさきがけとなるものである。よって、本研究の物性物理学としての価値と独創性は十分と認められた。そのため、博士（理学）の学位論文としてふさわしい内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

最終試験の結果の要旨

氏名 関原 貴之

成績 合格

本委員会は論文提出者に対し、平成 26 年 1 月 29 日、学位論文の内容及び関連事項について、口頭試験を行った。

その結果、論文提出者は、物理学、特に物性物理学について、博士（理学）の学位を受けるにふさわしい十分な学識をもつものと認め、審査委員全員により合格と判定した。