

令和元年5月29日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14340

研究課題名（和文）トポロジカル超伝導体のNMRによる研究

研究課題名（英文）NMR studies of Topological Superconductors

研究代表者

俣野 和明 (Kazuaki, Matano)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：70630945

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：量子コンピューターなどへの応用が期待されているトポロジカル超伝導体の性質を明らかにすることを目的として、トポロジカル超伝導体候補物質 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶試料の作製及び物性評価、 $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 、 PbTaSe_2 の超伝導対称性研究を行った。 $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ および PbTaSe_2 については、超伝導対称性をNMR法を用いて研究し、超伝導対称性を明らかにすることに成功した。この成果は共にPhysical Review B紙に論文として報告した。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶試料の作成においては高品質な試料の作成に成功し、成果を日本物理学会にて報告した。また、成果に関する論文を執筆中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結果として $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 、 PbTaSe_2 の超伝導対称性は従来型の物であったが、トポロジカル超伝導になる条件を研究する上では重要な結果となった。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶試料の作成においては高品質な試料の作成に成功し、今後様々な研究に応用できることが期待されている。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ はトポロジカル超伝導であることが有力視されており、作成した試料を用いることでトポロジカル超伝導研究が発展するであろうことから意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to clarify the properties of topological superconductors that are expected to be applied to quantum computers and the like. Single crystal growth of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ and evaluation of its physical properties, and superconducting symmetry study of $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ and PbTaSe_2 were operated. These three samples are candidate for topological superconductor. For $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ and PbTaSe_2 , the superconducting symmetry was studied using NMR method and succeeded in revealing the superconducting symmetry. Both results were reported as papers in Physical Review B. In the preparation of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ single crystal samples, high quality samples were successfully prepared, and the results were reported at the meeting of Physical Society of Japan.

研究分野：低温物性

キーワード：トポロジカル超伝導

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体研究は、バルクでは絶縁体であるがフェルミ面のトポロジーに起因して、表面に伝導層を持ち、質量を持たないディラック電子が存在すると理論的に予測されたことから始まった。理論研究の発表後、複数の物質でディラック電子の存在が実験的に証明されることとなり、注目を集めた。現在、応用性の高さや新規物性の発見への期待から盛んに研究が行われている。

一方で、バルクでは等方的な超伝導ギャップを持ち、表面ではノードなどを持つことが期待されているトポロジカル超伝導体についてもトポロジカル絶縁体との対応から存在が予言され、さらに、その表面状態にマヨラナ粒子の存在などが示唆され、量子コンピューターへの応用などが期待できることから注目を集めている。しかし、複数の物質について理論的な予測が発表されているが、決定的な実験的証拠は現在まで報告されていない。

2. 研究の目的

トポロジカル超伝導体候補物質 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 及び PbTaSe_2 の超伝導対称性を核磁気共鳴 (NMR) 法を用いて明らかにし、トポロジカル超伝導の発見を目指す。

3. 研究の方法

本研究では NMR 法を用いて、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 及び PbTaSe_2 の超伝導対称性解明を目指す。具体的には超伝導ギャップ関数及びクーパー対スピンの対称性を明らかにする。主としてすでに非従来型超伝導が報告されており注目度の高い $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ について研究を行う。超伝導対称性がわかれば、トポロジカル超伝導体かどうか判断できるためである。

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 及び PbTaSe_2 の各試料において、予備実験として NMR 信号の強い高磁場にて ^{77}Se 、 ^{195}Pt 、 ^{209}Bi 、 ^{125}Te 核の NMR 測定を行う。信号が観測できたら超伝導転移の見える磁場まで磁場を下ろし本実験を行う。

本実験ではスピン格子緩和時間 T_1 及びナイトシフトの測定を行う。超伝導転移点前後の温度変化を測定し、理論的な予測と比較し超伝導対称性を決定する。

また、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ においては、電気化学法を用いて試料を作成し、これまで報告されていた超伝導状態での物性の角度依存性を測定する。

4. 研究成果

(1) $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 及び PbTaSe_2 の超伝導対称性の決定の成功

トポロジカル超伝導では奇パリティ超伝導が期待されているため、超伝導対称性を決定することが、トポロジカル超伝導で有るかどうかを調べるもっとも有効な方法である。本研究では NMR 法を用いて、超伝導転移点前後の物性を測定し、超伝導対称性を明らかにすることに成功した。

具体的には、スピン格子緩和率 T_1 測定で超伝導ギャップ関数の対称性を、ナイトシフト測定でクーパー対スピンの対称性をそれぞれ決定した。

図 1 および 2 は PbTaSe_2 におけるスピン格子緩和率 T_1 測定と、ナイトシフト測定の結果である。スピン格子緩和率 T_1 測定では超伝導転移点以下で、コヒーレンスピークと呼ばれる従来型超伝導に特有の温度変化が観測された。

ナイトシフト測定では、超伝導転移点以下での減少を確認した。これはクーパー対スピンの対称性が一重項であることを示唆する結果である。

以上の結果から、 PbTaSe_2 の超伝導対称性は従来型の s 波超伝導であると結論づけられた。これはトポロジカル超伝導で期待されている奇パリティ超伝導とは異なる結果となった。

同様の測定を $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ に対しても行い、同じく従来型の s 波超伝導であると結論づけられた。

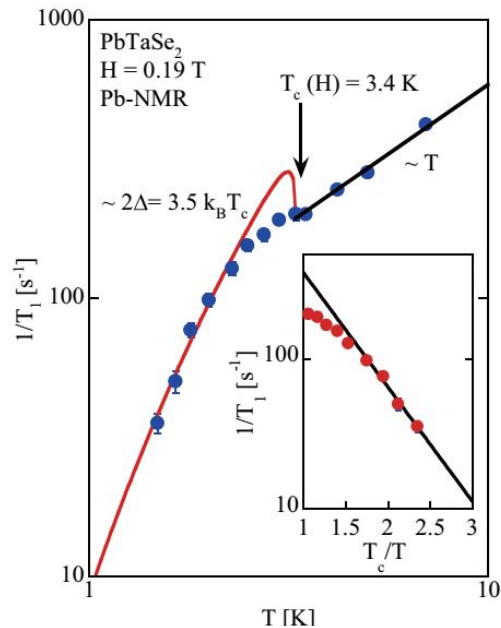


図 1 PbTaSe_2 のスピン格子緩和率 T_1 測定結果

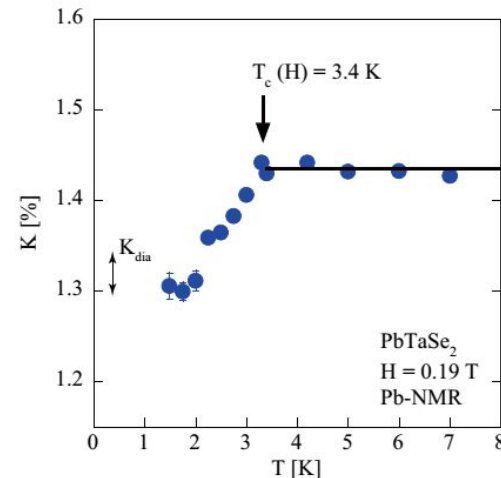


図 2 PbTaSe_2 のナイトシフト測定結果

双方共に、トポロジカル超伝導の候補として期待されていたが、トポロジカル超伝導であるという結果は得られなかった。しかし、この結果はトポロジカル超伝導になる条件を考える際に重要な指針になることは間違いない。

この成果は共に Physical Review B 紙に論文として報告した。

(2) $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶試料の作成および物性評価

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶試料の作成方法には数種類あり、一般的な固相反応法で作成すると、超伝導体積分率の小さな試料しかできない。一方で、電気化学合成法を用いれば超伝導体積分率の大きな試料を作成できることが報告されていた。本研究では、電気化学合成法を用いて高品質な試料の作成に成功した。さらに、作成した試料を用いて上部臨界磁場の角度依存性を測定した。結果、これまで報告されていたとおり、超伝導状態で面内の上部臨界磁場の温度依存性に角度依存性があることを見いだした。さらに、その角度依存性が試料ごとに異なることを世界で初めて発見した。すなわち、図 3 に示すように、上部臨界磁場が最低値を示す角度が 90° ずれているということを見出した。六方晶の結晶では、 60° ごとに同様の構造が現れる。しかし、 90° ずれるということは、結晶学的に異なる方向に上部臨界磁場が最小になる角度が現れるということを示している。

上部臨界磁場が最小になる角度は、スピン三重項超伝導に特有の d ベクトルの向いている角度に対応するが、その角度が試料ごとに異なるという発見は、この系における超伝導発現機構を考える上で重要な指針となる。

成果は日本物理学会にて報告した。また、成果に関する論文を投稿中である。

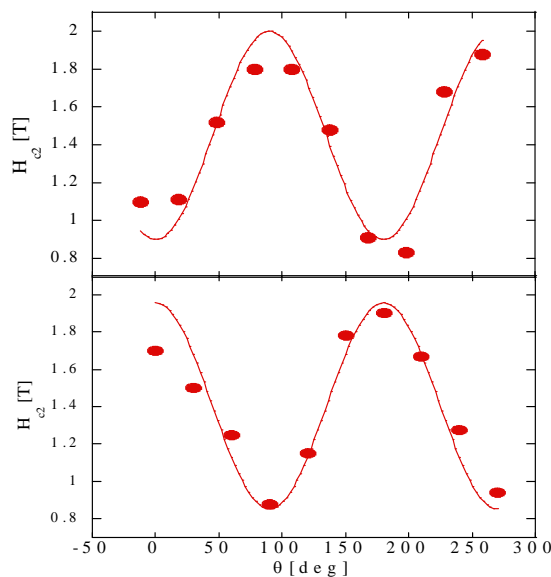


図 3 異なる 2 つの $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 試料における上部臨界磁場の角度依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

1) “Fully gapped spin-singlet superconductivity in noncentrosymmetric PbTaSe₂: 207Pb nuclear magnetic resonance study”

S. Maeda, K. Matano, and Guo-qing Zheng

Physical Review B 97, 184510-1-5 (2018/5/21) 査読有

2) 「Cu_xBi₂Se₃のスピン三重項・ネマティック超伝導」

俣野和明、米澤進吾 日本物理学会誌 第73巻 第2号最近の研究から (2018年2月). 査読有

3) “Spin-singlet superconductivity in the doped topological crystalline insulator Sn_{0.96}In_{0.04}Te”

S. Maeda, R. Hirose, K. Matano, M. Novak, Y. Ando, and G.-q. Zheng

Physical Review B 96, 104502-1-5 (2017/8/5) 査読有

〔学会発表〕(計2件)

1) 「Cu_xBi₂Se₃超伝導体の作製と物性測定」

河合哲大, 厚朴優樹, 神鳥吉史, 俣野和明, 神戸高志, 鄭国慶

日本物理学会 第73回年次大会 2018年3月25日, 東京理科大学

2) 「NMRから見たトポロジカル物質」(シンポジウム招待講演)

俣野和明 2017年度 日本物理学会秋季大会 領域4, 領域6, 領域8 合同シンポジウム「超伝導物質および超流動ヘリウム研究の切り開くトポロジカル物理の最前線」2017年9月22日, 岩手大学

〔その他〕

ホームページ等

http://www.physics.okayama-u.ac.jp/zheng_homepage/index.html

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。