



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



Tokyo Tech



広島大学

平成 27 年 10 月 9 日

国立大学法人東京大学
国立大学法人東京工業大学
国立大学法人広島大学

トポロジカルな電子構造をもつ新しい超伝導物質の発見 ～トポロジカル新物質の探索に新たな指針～

1. 発表者:

坂野 昌人 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士後期課程 3年)
大川 颯次郎 (東京工業大学 応用セラミックス研究所 博士後期課程 2年)
奥田 太一 (広島大学放射光科学研究センター 准教授)
笹川 崇男 (東京工業大学 応用セラミックス研究所 准教授)
石坂 香子 (東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 物理工学専攻 准教授)

2. 発表のポイント:

- ◆新規パラジウムビスマス超伝導体 (PdBi_2) の電子構造の直接観測に成功。
- ◆通常の物質とは異なるトポロジカルな性質 (注 1) をもつ表面の電子を検出し、その起源を解明。
- ◆新しい量子現象や機能が期待されるトポロジカルな超伝導の研究にむけて前進。

3. 発表概要:

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の坂野昌人大学院生、同研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 物理工学専攻の石坂香子准教授らの研究グループは、東京工業大学応用セラミックス研究所の笹川崇男准教授、広島大学放射光科学研究センターの奥田太一准教授らと共同で、新しい超伝導物質 PdBi_2 がもつトポロジカルな電子構造を実験的に検出するとともに理論的に証明し、トポロジカル超伝導の研究やさらなるトポロジカル新物質の探索にむけて大きく貢献しました。

私たちの身の回りの物質はこれまで電氣的性質により金属、半導体、絶縁体、超伝導体などに分類されてきました。ところが近年トポロジー (注 2) という数学的概念を電子状態に対して考慮することにより、真空と異なるトポロジカルな性質をもつ「トポロジカル物質」というそれまでにない分類が出現し、物理学、数学だけでなく化学、工学の広い分野にわたり注目を集めています。トポロジカル物質のもつ本質的な特徴として、固体内部とは異なる特殊な電子が表面に存在し、それらが新しい電氣的・磁氣的機能の担い手となる可能性があるからです。その中でもトポロジカル超伝導体では表面にマヨラナ粒子 (注 3) と呼ばれる

普通の電子とは全く異なる仮説的な粒子が出現することが予言されており、その特異な統計性を利用した新機能デバイスへの応用も期待されています。

今回研究グループは、パラジウム (Pd) とビスマス (Bi) で構成される新規超伝導体 PdBi₂ がトポロジカルな性質をもつ物質であることを明らかにしました。先端的なスピン分解・角度分解光電子分光法 (注 4) を用いて特異な表面の電子状態を実験的に直接検出するとともに、その表面状態が PdBi₂ のもつトポロジカルな性質により出現するものであることを第一原理電子構造計算 (注 5) により証明しました。本研究成果をもとに、新たな指針に基づくトポロジカル超伝導体の研究やトポロジカル新物質の探索が大きく進展することが期待されます。

本研究成果は、英国科学雑誌『Nature Communications (ネイチャーコミュニケーションズ)』(10月13日電子版) に掲載される予定です。

4. 発表内容:

①背景

近年、表面に特殊な電子構造 (トポロジカル表面状態) をもつトポロジカル物質が注目を集めています。トポロジカル物質研究の発展は、2005年のトポロジカル絶縁体の予言と、それに続く発見に端を発します。トポロジカル絶縁体は、内部は電気を通さない絶縁体である一方、表面では電気が流れる金属となっており、通常の絶縁体とは異なる新しい絶縁体に分類されます。このトポロジカル表面状態においては、質量ゼロの電子 (ディラック電子) が出現するとともにその電子スピン (電子自身をもつ微小な磁石) の向きが電子の運動に垂直な方向にそろっており、これまでにない電氣的磁氣的機能の創出が期待されています。その後、理論的、実験的研究が進むにつれ、絶縁体に限らず金属や超伝導体においても物質のもつトポロジカルな性質や表面状態が重要視されるようになってきました。特に、トポロジカル超伝導と呼ばれる状態においては、その表面状態にマヨラナ粒子と呼ばれる、いまだその存在が未検証な理論上の粒子が出現することが予言されています。トポロジカル超伝導を実現するための物質科学的指針の 1 つとして、これまでは主にトポロジカル絶縁体に対して化学的に電子をドーピングしたり強い圧力をかけたりすることによって超伝導体へと変化させる戦略が取られてきました。しかし、このようなチューニングにより得られる超伝導体の種類や質、堅牢さには厳しい制約があり、新たな物質開拓の指針が望まれていました。

②研究内容

本研究グループは、トポロジカル絶縁体に手を加えるのではなく、パラジウムとビスマスで構成される超伝導体 PdBi₂ (図 1) に着目しました。良質な結晶を作製して最先端のスピン分解・角度分解光電子分光法を用いることにより、PdBi₂ の電子構造の直接観測に成功し、トポロジカルな性質を理論的に証明するとともにその起源を解明しました。

具体的には、スピン分解・角度分解光電子分光法（図 2）により PdBi_2 の固体内部と表面状態における電子構造と電子スピンの向きをそれぞれ詳細に調べました。観測された表面状態の電子はディラック電子とよく似た特徴を示しており、さらにその運動方向と電子スピンの向きが直交している様子も検出されました（図 3）。この結果から、 PdBi_2 における表面状態がトポロジカル絶縁体表面に現れるものと酷似していることが明らかになりました。しかし、これだけではこの表面状態が真にトポロジカルな性質に由来するものであると証明されたわけではありません。研究グループはさらに第一原理計算により、 PdBi_2 の電子構造とそれを構成する電子の波動関数を解析しました。この計算結果は実際に観測された電子状態を非常によく再現するとともに、この表面状態がトポロジカル表面状態であることを証明するものとなりました。

③今後の展望

本研究により、 PdBi_2 がトポロジカルな性質と表面状態をもつ超伝導物質であることが明らかになりました。今回の実験では超伝導転移温度（5.3 ケルビン）以下での測定を行うことができませんでしたが、冷却性能の高い実験装置やその他の多様な実験手法を用いることにより超伝導状態の詳細な観測が可能となります。これにより、現段階では理論研究が圧倒的に先行しているトポロジカル超伝導の検出や解明を目指す実験が大きく進展する可能性があります。また、本研究で用いた実験・計算手法は新しいトポロジカル物質の探索とその評価の指針を提示するものであり、これまで通常の金属や超伝導体とわれてきた物質の再考も含め、幅広い新物質群の開拓へとつながることが期待されます。

5. 発表雑誌:

雑誌名: 「Nature Communications」 (平成 27 年 10 月 13 日電子版)

論文タイトル: Topologically protected surface states in a centrosymmetric superconductor $\beta\text{-PdBi}_2$ symmetry (和訳: 空間反転対称な超伝導体 $\beta\text{-PdBi}_2$ におけるトポロジカルに保護された表面状態)

著者: M. Sakano, K. Okawa, M. Kanou, H. Sanjo, T. Okuda, T. Sasagawa, and K. Ishizaka*

6. 注意事項:

Nature Communications 誌の規定により、日本時間 10 月 13 日 (火) 午後 6 時 (ロンドン時間: 午前 10 時) 以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先:

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター
准教授 石坂 香子 (いしざか きょうこ)

東京工業大学 応用セラミックス研究所
准教授 笹川 崇男（ささがわ たかお）

広島大学 放射光科学研究センター
准教授 奥田 太一（おくだ たいち）

8. 用語解説

注 1) トポロジカルな性質

ここでは、トポロジーで分類した際に真空状態と同じ物質を「通常の物質」、異なる物質を「トポロジカルな性質」をもつ「トポロジカル物質」と呼んでいます。

注 2) トポロジー（位相幾何学）

連続的に変形できるか否かにより形を分類する数学の学問です。一例としてよく挙げられるのがドーナツとマグカップです。これらはいずれも穴の数が 1 つであり、連続的に変形させたときに互いに行き来することができるので同じ分類になります。一方で饅頭には穴が無いいためマグカップやドーナツへと連続的に変形することはできず、異なる分類になります。

注 3) マヨラナ粒子

物理学者マヨラナによって提案された電荷を持たない素粒子で、自分自身の反粒子となる特殊な性質をもっています。素粒子物理学でニュートリノとの関連が議論されていますが、マヨラナ粒子の確たる実験的証拠はいまだ提示されていません。

注 4) スピン分解・角度分解光電子分光法

物質に光を照射すると、電子（光電子）が試料から真空中へ放出されます。その光電子の運動エネルギー、および脱出角度を調べることによって、物質中の電子のエネルギーと運動量を直接観測できる実験手法です。さらに、スピン検出器を用いて光電子のスピンを測定することにより、物質中の電子スピンの向きを調べることもできます（図 2）。物質中の電子の運動量、エネルギーとスピンの向きが分かると、電子構造を完全に理解することができます。

注 5) 第一原理電子構造計算

量子力学の基礎的な方程式を用いて、物質を構成する原子の種類と位置の情報から電子構造を計算する手法です。結晶構造さえ決まれば非経験的に電子構造を得ることができるため、性質の不明な新物質に対しても威力を発揮します。

9. 添付資料

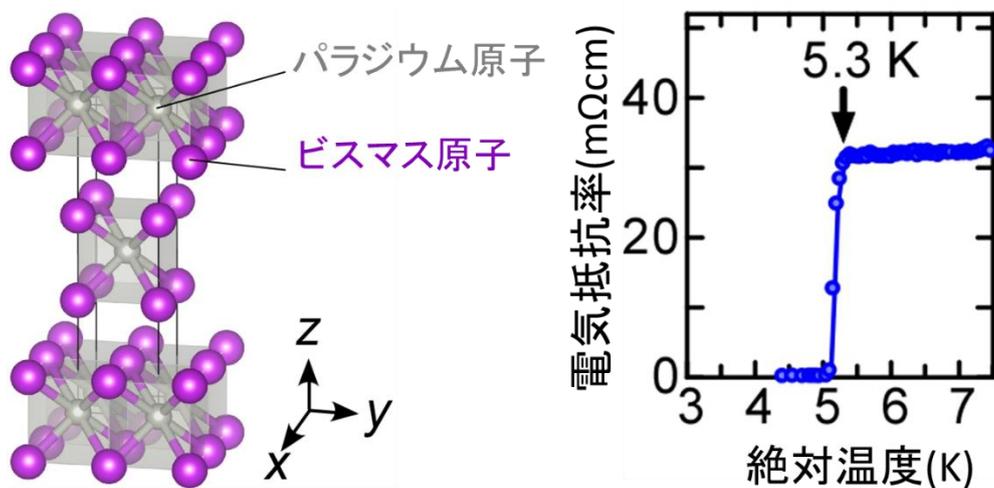


図1 パラジウムビスマス超伝導体 PdBi₂ の結晶構造と電気抵抗率

左図は PdBi₂ の結晶構造を示しています。パラジウム原子の周りを 8 個のビスマス原子が囲み、それらが層状に積層した結晶構造を形成します。右図は電気抵抗率の温度依存性です。絶対温度 5.3 ケルビンにおいて金属状態から超伝導状態に相転移する様子を表しています。

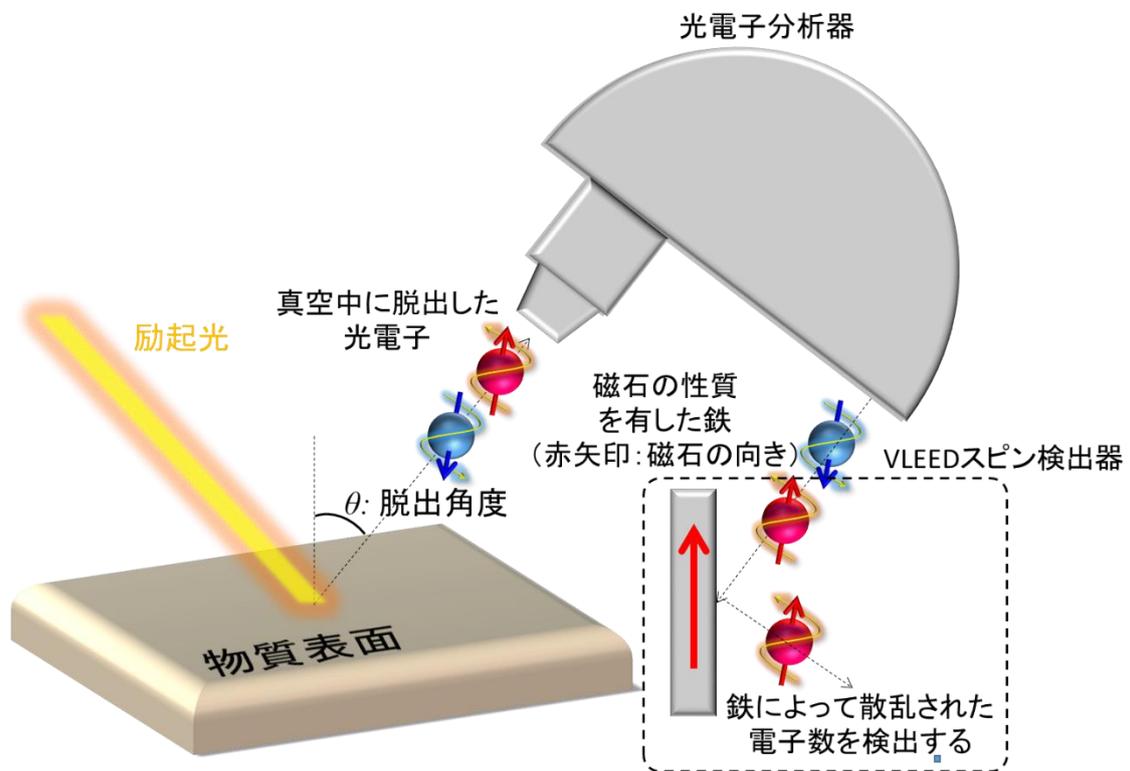


図2 スピン分解・角度分解光電子分光法の概念図

物質に光を照射すると、物質の表面から電子（光電子）が真空中へ脱出します。スピン分解・角度分解光電子分光法は、その光電子の運動エネルギー、脱出角度およびスピンを調べることによって、物質の電子構造を観測できる実験手法です。本研究では、スピンを調べる際に広島大学放射光科学研究センターの実験装置（ESPRESSO）を用いました。この装置のスピン検出器（VLEED）では鉄の磁石の性質を利用することにより、従来に比べて100倍の効率で光電子のスピンを調べることができます。

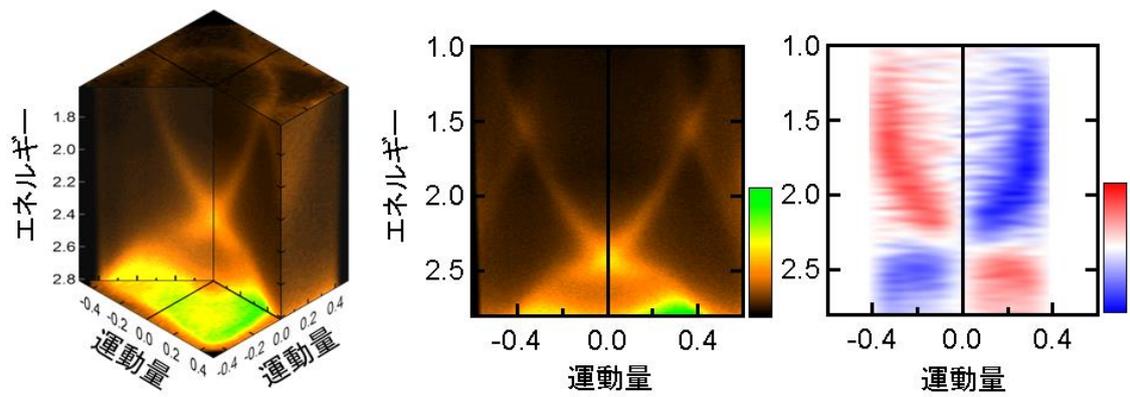


図3 スピン分解・角度分解光電子分光で得られた電子構造と電子スピン

左図・中央図は PdBi_2 のトポロジカル表面状態を示す角度分解光電子分光の結果です。質量ゼロのディラック電子が示す円錐状の電子構造が見られます。右図は同じ領域のスピン分解・角度分解光電子分光の結果です。上向きスピン（赤）と下向きスピン（青）が電子の運動方向（運動量の符号）と結びついている様子を示しています。