

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	石坂 仁志
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論文題目			
<p>Experimental determination of electronic structures of superconductors $ZrP_{2-x}Se_x$ and Nb_3Y ($Y = Al, Sn$) (超伝導体 $ZrP_{2-x}Se_x$ および Nb_3Y ($Y = Al, Sn$) の電子構造の実験的決定)</p>			
論文審査担当者			
主 査	教 授	木村 昭夫	
審査委員	教 授	生天目 博文 (放射光科学研究センター)	
審査委員	教 授	森吉 千佳子	
審査委員	教 授	鈴木 孝至 (先進理工系科学研究科量子物質科学プログラム)	
審査委員	教 授	井野 明洋 (久留米工業大学)	
〔論文審査の要旨〕			
<p>超伝導は電気抵抗率がゼロになる物理現象である。1911年に発見され、その後超伝導転移温度 (T_c) は上昇していったが、未だ常温常圧で発生する超伝導体は見つかっていない。固体の性質は主に物質中の電子が担うと言っても過言ではない。超伝導発現には電子が対として振る舞う必要があることが超伝導の標準理論として知られるBCS理論で示唆されてきた。1980年代の格段に高い T_c をもつ銅酸化物高温超伝導体の発見は、その標準理論が予言する臨界温度の限界値を超えたことから、高温超伝導発現メカニズムは標準理論では不十分であることを示唆した。このように、超伝導発現機構もその物質の電子状態に起因している。このことは、超伝導発現機構の解明には電子構造の直接決定が必要不可欠であることを意味している。光電子分光は、固体の電子構造を直接可視化する有力な実験手法の一つである。申請者は、従来型の超伝導体 Nb_3Y ($Y = Al, Sn$) と 2014年に新たに発見された新奇超伝導体 $ZrP_{2-x}Se_x$ についてこれらの超伝導発現機構解明を目指して光電子分光を行い、その電子状態を実験的に決定した。</p> <p>$ZrP_{2-x}Se_x$ については異なる角度からの研究も行なっており、公表論文として挙げられている。見かけ上の質量がゼロになるディラック電子は、不純物があってもぶつかることなく進み続けるという目覚ましい特徴をもっており、炭素原子が蜂の巣格子を組むグラフェンで最初に発見された。高速で移動度の高い電気伝導を実現するため、グラフェンを用いた電子デバイスの開発が進められている。ディラック電子が示す特殊な量子ホール効果は、2010年のノーベル物理学賞の対象にもなった。このディラック電子は、現在、2種類に分けられノードと呼ばれるエネルギーの原点が「点状」のものと「線状」のものが知られる。グラフェンを含め、これまで発見された物質中のディラック電子は、ほとんどが点ノード型で、線ノード型はほとんど存在しない。線ノード型は、ディラック電子のエネルギー分散関係が運動量空間で連続的につながっているため、電子が散乱されにくいという性質が強調されることに期待が高まっているが、さらなる次世代のデバイス開発のためには、「線状」でかつ「高速」なディラック電子を持ち、さらに「超伝導」を示すことが要求される。</p>			

最近、半金属 ZrSiS に線ノード型のディラック電子が存在することが報告されたが、その速さはグラフェンの 65%で、超伝導は示さない。また超伝導体 PbTaSe₂ に線ノード型ディラック電子が発見されたが、その速さはグラフェンの 40%であった。この物質は、線ノード半金属 ZrSiS を形作るシリコン Si の単原子層を、リン P の単原子層に置き換えたものになっていることから、同様の線ノードが現れるものと第一原理計算で予測されていた。そこで、申請者は、超伝導体 ZrP_{2-x}Se_x の電子構造を直接観測し、線ノード型ディラック電子の有無とその形成起源を調べるために、放射光を用いた角度分解光電子分光を行った。正確な電子構造の解明に不可欠な単結晶試料育成方法に工夫を凝らし、2ミリメートル大の単結晶を用いた実験の結果、超伝導体 ZrP_{2-x}Se_x にはダイヤモンド型をした環状の線ノードが存在することを明らかにし、観測されたディラック分散関係の傾きから、線ノード型ディラック電子の速度がグラフェン中の点ノード型ディラック電子の速度に匹敵し、これまでに知られている線ノード型ディラック電子の速度を大幅に上回ることが初めて見いだされた。また、リン P 原子の正方格子でできた単原子層を仮定して強束縛近似によるモデル計算を行ったところ、実験結果を再現する結果が得られた。これらのことから、超伝導体の中に観測された特徴的な環状の線ノードと最速のディラック電子が、リン P 原子の正方格子によって実現することがわかった。

本博士論文では、「線状」でかつ「最速」のディラック電子を「超伝導」物質に見出した。この発見により次世代の高速デバイス開発への明確な指針が見出されインパクトは高い。また、本研究は指導教員を含む複数の研究者との共同研究によるものであるが、研究の全過程において申請者の主体的・中心的な寄与が認められる。

以上のことより、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

(1) Evidence for Dirac nodal-line fermions in a phosphorous square-net superconductor

S. Ishizaka, A. Ino, T. Kono, Y. Miyai, S. Kumar, K. Shimada, H. Kito, I. Hase, S. Ishida, K. Oka, H. Fujihisa, Y. Gotoh, Y. Yoshida, A. Iyo, H. Ogino, H. Eisaki, K. Kawashima, Y. Yanagi, and A. Kimura

Physical Review B, (2022), *in press*.