

実験結果

我々のグループは、反転対称性の破れた2次元超伝導体の性質を調べるために原子膜材料である二硫化モリブデン(MoS₂)の高品質な単結晶を用いて、EDLT構造(図1)を作製した。MoS₂は遷移金属ダイカルコゲナイドの一種でスコッチテープ法により原子層レベルまで劈開でき、輸送特性だけでなく、光学特性やバレー自由度、スピン軌道相互作用の観点から精力的に研究が進められている。EDLTとの組み合わせでMoS₂の表面に極めて不純物の少なく高濃度の2次元電子ガスを誘起できる。その厚さは、第1原理計算に基づくPoisson-Schrödinger方程式(電場による閉じ込めポテンシャルの空間分布から電荷密度の空間分布を求めるSchrödinger方程式と、逆に電子密度分布からポテンシャル分布を求めるPoisson方程式を組み合わせた自己無撞着方程式)から、超伝導が実現できるキャリア密度では、単層レベル(0.6 nm程度)と見積もられている[11]。MoS₂の単層構造では、MoとSの非等価性及び3回対称の構造から面内の反転対称性が破れている。また、MoS₂をはじめとする遷移金属ダイカルコゲナイド物質は、スピン-軌道相互作用が強いということが知られている。こうした面内の反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用は、運動量空間でのK点で面直方向の有効磁場によりスピン分極を引き起こす。我々はこのスピン軌道相互作用をZeeman型スピン軌道相互作用と呼んでいる(Ising型スピン軌道相互作用とも呼ばれている)。さらに、K点と-K点は時間反転で結ばれているのでそこでの有効磁場は逆向きでなければならない。このようなスピンとバレーが結合してスピンを固定している状況spin-valley lockingは、理論的[12]にも実験的[13]にも既に証明されており、TMD特有の物性を理解する上での重要なファクターとなっている。

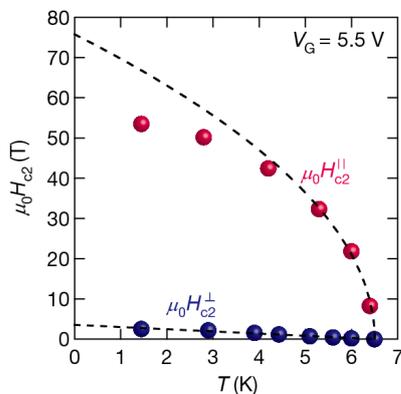


図1 上部臨界磁場の温度依存性。丸(赤:面内方向、青:面直方向)は実験データ、点線は2次元のギンツブルク・ランダウモデルによるフィッティング線。参考文献[13]から転載。

こうした特殊なスピン分極を有するMoS₂単層超伝導の性質を調べるために東京大学物性研究所国際超強磁場科学研究施設のパルスマグネットと回転機構付き抵抗測定プローブを用いて、上部臨界磁場の詳細な測定を行った。測定で得られた、MoS₂の零磁場での $T_c = 6.7$ K、電子面密度 $8.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ における電界誘起超伝導の磁場-温度相図を示す。 H_{c2} は電気抵抗が常伝導抵抗の75%まで減少した時点での磁場として定義されたものである。このデータの意外な点は、低温(1.5 K)における面内の上部臨界磁場 H_{c2}^{\parallel} が52 Tと極めて大きな値であるという点である。上部臨界磁場は一般に軌道限界とパウリ限界のどちらか低い方の値で決まる。実際、軌道限界を示すギンツブルク・ランダウの式でフィットすると T_c 近傍ではよく合うが、低温では明確な乖離が見られる。そのため我々は低温ではパウリ限界で上部臨界磁場が決まっていると考えた。ところが弱結合BCS理論の枠組みでのパウリ限界は T_c の1.86倍(単位はテスラ)になるので今の場合、 $T_c = 6.7$ Kに対して12.5 Tと予想される。観測された52 Tはその4倍強になるので、パウリ限界がかなり増強されたことを示唆している[13]。

このパウリ限界の増強を理解するために、運動量空間での詳細な電子状態を知る必要がある。電場下での第1原理計算によるとこの実験におけるキャリア面密度($8.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)では、フェルミエネルギーが約150 meV、フェルミエネルギーでのスピン分裂は約13 meV程度であり、約100 Tの面直方向の有効磁場の存在を意味している。フェルミ面のクーパ対は、重心運動量をゼロにしてエネルギーを最小化するように、Kと-Kで逆向きのスピン1重項がバレー間において組まれる。すなわち、このKと-Kで組まれたクーパ対は実効的に100 Tに及ぶ面直の内部磁場によって強固に保護されていると考えることができる。この時のフェルミ面のスピン分極の模式図が図2である。スピン分極によって、K点は下向きに、K'点は上向きにスピン分極している。このスピン分極方向に垂直な面内磁場を印加した際に軌道運動の寄与が無視でき、 H_{c2}^{\parallel} がパウリ限界によってのみ決定されるとすると、内部磁場に匹敵する程度の強磁場を印加しないと超伝導は破壊できない。これが、本研究でのMoS₂電界誘起超伝導におけるパウリ限界の増強の物理的説明である。実際、第1原理計算によるバンド構造を強束縛近似でモデル化し、それをもとにBCS理論のギャップ方程式によって H_{c2}^{\parallel} の温度依存性を計算すると、実験結果とコンシステントな結果が得られており、上記の解釈をより一層裏付けている[13]。同時期に

