

Superconductivity protected by spin–valley locking in ion-gated MoS2

著者: Yu Saito, Yasuharu Nakamura, Mohammad Saeed Bahramy, Yoshimitsu Kohama, Jianting Ye, Yuichi Kasahara, Yuji Nakagawa, Masaru Onga, Masashi Tokunaga, Tsutomu Nojima, Youichi Yanase^{3,7} and Yoshihiro Iwasa

アブストの翻訳

対称性の破れは、強いスピン軌道相互作用 (SOI; 文献1,2,3,4,5,6) を持つ非中心対称超伝導体において、重要な役割を果たすことが知られています。しかし、これまでの研究は主に、特定の種類のSOI、すなわちラシュバ型SOI (文献7) に焦点を当ててきました。このSOIでは、電子スピンが運動量と直角に固定され、平面内の螺旋的なスピネクスタを形成します。本研究では、モリブデンジスルフィド (MoS₂) における電場誘起超伝導について議論します。この物質では、本質的に異なる種類の内在的SOIが現れ、エネルギー谷で面外ゼーマン型スピン分極として現れます (文献8,9,10)。私たちは、1.5 Kで約52 Tの上部臨界磁場を観測しました。これは、中心対称の通常の超伝導体におけるパウリ制限と比較して4倍の強化を示しています。現実的なタイトバインディング計算を用いて、この異常な振る舞いがゼーマン型スピン-谷ロッキングによって対称的に保護された谷間ペアリングによるものであることを明らかにしました。本研究は、制限された幾何学における反転対称性の非対称性とSOIの相互作用、そしてその超伝導における役割を解明します。

研究背景・問題意識

- **MoS₂**: 層状半導体遷移金属カルコゲナイドの一員。ポストグラフェン物質とされている。孤立した単層ではゼロ磁場でK点にゼーマン型スピン分極があるのが特徴。
- MoS₂特有のスピン分裂は遷移金属のd軌道における比較的強いスピン軌道相互作用に起因している。
- ラシュバ型バンド構造における超伝導は、スピンと運動量ロッキング効果とともに研究されてきたが、ゼーマン型スピン分極に関してはこれまであまり議論されてこなかった。

研究手法

- 磁気輸送測定を行う。MoS₂表面では電場誘起超伝導が起こる。

結果

- 超伝導における非常に大きな異方性が、磁場印加の方向により確認される。例えば、垂直磁場の場合超伝導状態は9Tで完全に消失するものの、平面内磁場の場合はほぼ変化しない。
- 上部臨界磁場の温度依存性は銀つブル克蘭ダウモデルによって良好にフィットされる。

$$H_{c2}^{\perp}(T) = \frac{\phi_0}{2\pi\xi_{\text{GL}}^2(T)}$$

$$H_{c2}^{\parallel}(T) = \frac{\phi_0}{2\pi\xi_{\text{GL}}(T)d_{\text{SC}}}$$

- 平行磁場が転移温度付近で急激に増加するために、システムが2次元的な性質を持つことが示される。

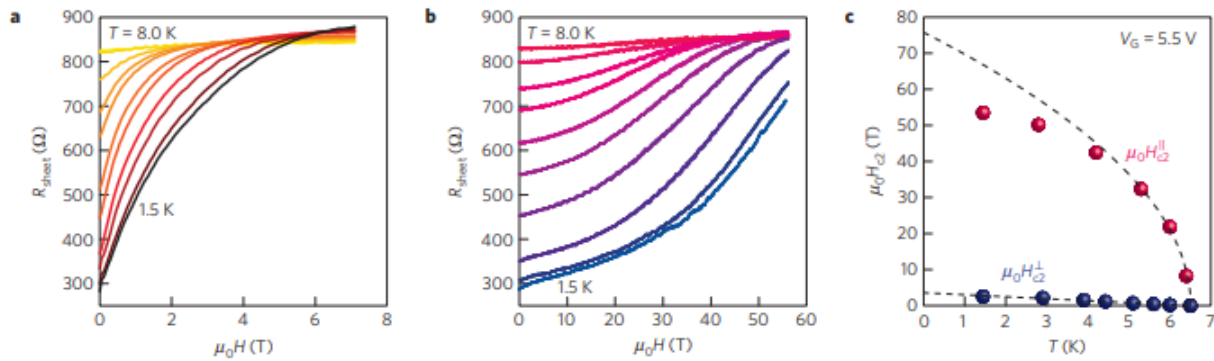


Figure 3 | Huge upper critical fields in ion-gated MoS₂. **a, b**, Sheet resistance of a MoS₂-EDLT at $V_G = 5.5$ V as a function of magnetic field up to 7 T for perpendicular magnetic fields $\mu_0 H^\perp$ at 1.5, 2.9, 3.9, 4.4, 5.1, 5.6, 6, 6.5, 6.8, 7.3 and 8.0 K (**a**) and up to 55 T for parallel magnetic fields $\mu_0 H^\parallel$ at 1.5, 2.8, 4.2, 5.3, 6, 6.4, 6.5, 6.8, 7.1, 7.6 and 8.0 K (**b**). **c**, In-plane and out-of-plane upper critical fields as a function of temperature. H_{c2} is defined as the magnetic field where R_{sheet} reached 75% of the normal state sheet resistance. The black dashed curves show the 2D-GL model. The value of H_{c2}^\parallel increases with decreasing temperature, following the 2D-GL model near T_c , but deviates from the model at lower temperatures and eventually saturates at approximately 52 T at 1.5 K, suggestive of an enhancement of the Pauli limit.

- 図3(c)は平行及び垂直な方向の上部臨界磁場をまとめている。平行な場合、上部臨界磁場は1.5Kで約52Tに達して飽和する。この値はパウリリミット12Tの4倍以上である。
- パウリリミットの説明に最初は微視的KLB理論を用いたが、全散乱時間のほうがスピン軌道散乱時間よりも大きくなってしまい不適当。
- まずタイトバインディングの計算を行い、強い電場を印加したもとでMoS2の表面に高密度の2次元電子系が形成されることが示された。
- 正のゲート電圧が印加されると、伝導体のそこは $\pm K$ 点に移動する。バルクMoS2では、伝導体のそこは $\Gamma - K$ 方向に沿った6つの対称的に等価なk点に位置している。これよりMoS2における電場誘起2次元超伝導は $\pm K$ のパレーによってのみ媒介されることが期待される。
- シートキャリア密度が $n_{2D} = 8,7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の場合、 $\pm K$ 点におけるバンドはゼロ磁場でもスピン分裂を示す。K点からわずかに離れると、これらのスピン分裂バンドが交差して、フェルミ準位で13meVのスピン分裂を示す。これらのバンド構造の特徴は、タイトバインディング法およびkpモデルから得られた単層MoS2の場合と質的に等価になる。この一致は、強い電場のもとでバルクまたは多層TMDが実質的に単層のようにふるまうことを示唆している。実験的に、単層的挙動は円偏光フォトルミネッセンスを示す二層系、磁気伝導でゲート誘起の弱局在効果を示すバルク系で見られている。
- FFLOやゼーマン型SOIから派生するスピントリプレット成分による上部臨界磁場の増強は無視できる程度であることが確認されている。またラシュバSOIや量子臨界点、修正された電子g因子は、本系では排除される。したがって、内在的ゼーマン型SOIによるスピナーパレーロッキングが、上部臨界磁場補強の最有力の起源であると考えられる。

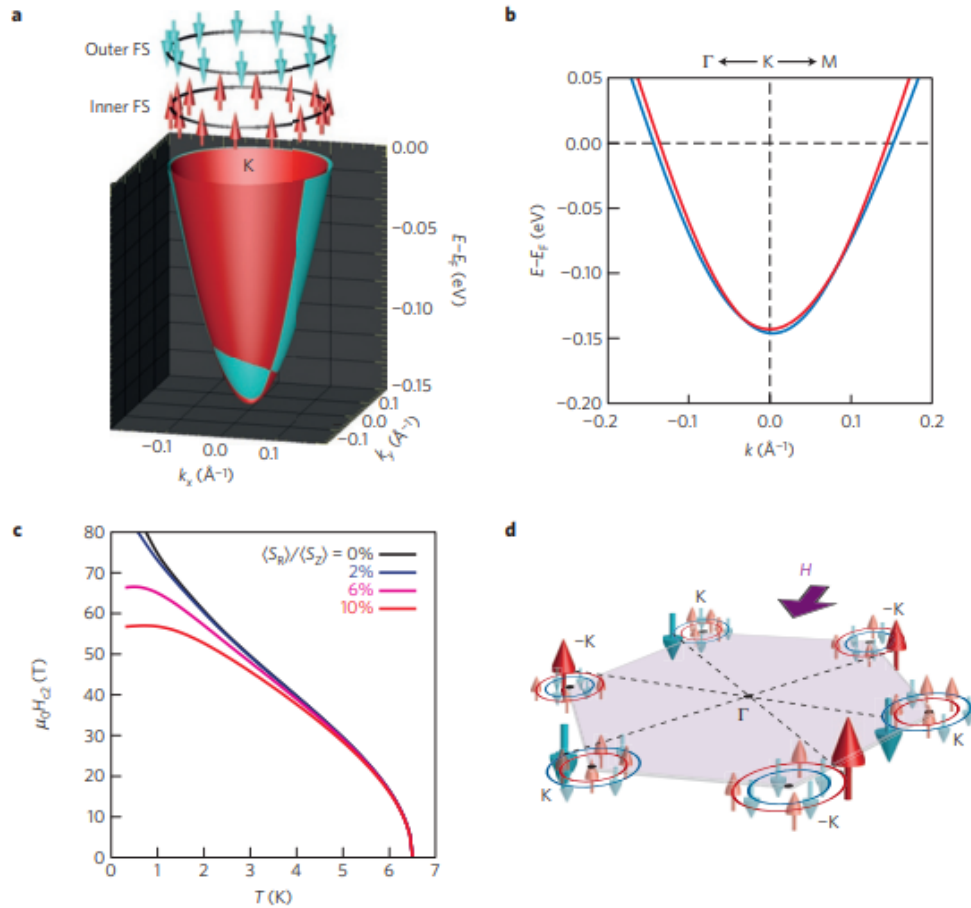


Figure 4 | Ising pairing protected by spin-valley locking in electric-field-induced 2D superconductivity in MoS₂. **a**, Energy band dispersion and spin texture of the conduction band around the K point of bulk MoS₂ under a strong electric field at $n_{2D} = 8.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. The inner Fermi surface (FS) and the outer FS at the K points have out-of-plane spin polarization with opposite directions because each band is almost fully out-of-plane spin polarized by the effective valley Zeeman fields, whereas the in-plane Rashba-type component is very small, with less than 2% of the total spin polarization. **b**, Two-dimensional energy band dispersion near the K point. The spin-split bands cross each other. The splitting at the Fermi level becomes $\sim 13 \text{ meV}$, whereas that at the K point is $\sim 3 \text{ meV}$. **c**, Theoretical curves of the Pauli limit considering both the Zeeman-type and small Rashba-type SOIs (see also Supplementary Figs 5 and 7). Black curve is the upper critical field in the tight-binding model reproducing the band structure calculation (Supplementary Fig. 4). The ratio of the Rashba-type and Zeeman-type SOIs, $\langle S_R \rangle / \langle S_Z \rangle$, is varied from 0 to 10%. **d**, Schematic image of the Fermi surfaces with valley-dependent spin polarization in the in-plane magnetic field geometry. The direction of each spin is orthogonal to the magnetic field. Inter-valley Ising pairing formed between the K and $-K$ valleys is robust against an external magnetic field H , which realizes spin-valley-coupled 2D Ising superconductivity in ion-gated MoS₂.

- K, -Kのバレーの間のスピングレットクーパー対は、ゼーマン型スピン分裂により保護されることがわかる。すなわち面買いスピン分極がに方向にロックされたクーパー対により、パウリリミットを大きく上回る増強が示される。なおラシュバSOIを考慮に入れると、パウリリミットは大幅に抑制される。
- つまり、強い電場を印加することで、ゼーマン型スピンバレーロッキングによりクーパー対が保護される非従来型2次元イジング超伝導体になることが示される。これは外部磁場に対して頑強で、パウリリミットの増強が生じることになる。

感想・メモ

- MoS₂は楠瀬先生の本で読んだことがあるが、バレー自由度のことをあまり理解していない気もするので勉強してみたい。