

50 テスラ超強磁場まで維持される 2 次元超伝導状態を発見

— 相対論的効果により出現する新奇超伝導現象の解明 —

1. 発表者：

斎藤 優（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 1 年）
中村 康晴（新潟大学大学院自然科学研究科 数理物質科学専攻 博士課程 2 年）
M. S. Bahramy（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 特任講師／理化学研究所 創発物性科学
研究センター創発計算物理研究ユニットユニットリーダー）
小濱 芳允（東京大学 物性研究所 附属国際超強磁場科学研究施設 特任助教）
笠原 裕一（京都大学大学院 理学研究科 物理学第一教室 准教授）
徳永 将史（東京大学物性研究所 附属国際超強磁場科学研究施設 准教授）
野島 勉（東北大学 金属材料研究所 准教授）
柳瀬 陽一（京都大学大学院 理学研究科 物理学第一教室 准教授）
岩佐 義宏（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 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター
創発デバイス研究チーム チームリーダー）

2. 発表のポイント：

- ◆市販ネオジウム磁石の 100 倍以上の超強磁場中で維持される 2 次元超伝導体を発見。
- ◆電子状態の第一原理計算とそれに基づく超伝導理論を用いることにより、実験結果を相対論的効果で説明することに成功。
- ◆磁場中新奇超伝導現象の探索や磁場に強い超伝導材料開発への新機軸となることが期待。

3. 発表概要：

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・物理工学専攻の岩佐義宏 教授（理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー兼任）、M. S. Bahramy 特任講師（理化学研究所 創発物性科学研究センター創発計算物理研究ユニットユニットリーダー）、同研究科物理工学専攻の斎藤優 大学院生らの研究グループは、同大学物性研究所 徳永将史 准教授、京都大学大学院理学研究科 柳瀬陽一 准教授と笠原裕一 准教授、東北大学金属材料研究所 野島勉 准教授らと共同で、原子膜材料^(注1)である二硫化モリブデン (MoS_2) の電気二重層トランジスタ (EDLT) 構造^(注2)において、 MoS_2 表面に誘起される原子 1 層分の厚さの極めて薄い 2 次元超伝導体が、層に平行な方向の磁場に対して極めて強い耐久性を示すことを発見しました。さらに、第一原理に基づく理論計算^(注3)により、この超伝導体では超伝導電子対のスピンの層に対し垂直方向に固定されている、前例にない特殊な超伝導状態が実現していることを初めて実証しました。本研究成果は、対称性が破れた 2 次元電子系における新奇超伝導という新たな学術分野を切り開く礎となるだけでなく、強磁場に対して極めて安定な超伝導材料を開発するための新機軸となることが期待されます。

本研究成果は、英国科学雑誌『*Nature Physics*』のオンライン（平成 27 年 12 月 7 日版）に掲載されます。

本研究は科学研究費補助金特別推進研究などの支援を受けて行われました。

4. 発表内容：

《背景》

超伝導は電気抵抗がゼロになる現象で、消費電力を発生することなく電気を流すことができるため、省エネルギーにつながる次世代の技術として期待され、基礎及び応用的な面から世界中で研究されています。物質中の個々の電子は、電荷に加え磁石の性質である「スピン」を持ちます。多くの超伝導体では、共通してこのスピンの逆方向に向いた 2 つの電子が対をなす状態が形成されるため、ある大きさ以上の磁場を加えることによってスピンの同方向へ整列させようとする力が働くと、超伝導が不安定になり、壊れてしまう原因となります。しかしながら、医療現場で利用されている磁気共鳴イメージング装置(MRI)や、交通・輸送分野で活躍が期待されるリニアモーターカーなどは強磁場下で超伝導を利用しているため、この磁場の上限を向上させた強磁場下で安定な超伝導体をデザインし作製することは、学術的に中心的な課題の一つであり、かつ材料開発において世界的に急務となっています。この候補物質として原子層レベルまで薄くした 2 次元超伝導体が挙げられ、実際様々な形態の 2 次元超伝導の研究が世界中で盛んに行われています。

《研究内容》

本研究グループは、原子膜材料の一種である層状物質・二硫化モリブデン(MoS_2)の高品質な単結晶を用いて、電界効果トランジスタの一種である EDLT 構造 (図 1) を作製しました。この構造では、超強電界によって誘起された電子の集団が MoS_2 の単結晶表面に蓄積できるため、原子層 1 層分の厚さの、極めて薄い、究極の 2 次元超伝導を人工的に実現することが可能です。本研究では、この極薄の 2 次元超伝導体の磁場への耐久性を調べるために、東京大学物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設で約 55 テスラの超強磁場中における超伝導転移現象を電気抵抗測定により調べました (テスラは磁場の単位 (注4))。この 55 テスラという磁場は、市販のネオジウム磁石 (約 0.5 テスラ) の 100 倍以上の大きさに相当します。測定の結果、極低温領域の 1.5 ケルビン (マイナス 271.7°C) において、原子層に平行方向の臨界磁場 (超伝導が維持できる磁場の最大値) は 52 テスラまで上昇することを発見しました。これは従来型の超伝導体を仮定した場合の理論的予測値 (常磁性極限またはパウリ極限と呼ばれる値) の 4 倍以上の大きさになります (図 2)。本研究グループは、さらに第一原理に基づく電子状態の理論計算、およびその計算結果を用いた臨界磁場の理論的導出を行った結果、この超伝導体では、 MoS_2 単層結晶構造の特殊性である面内の反転対称性の破れ (図 3) と相対論的效果により局所的な内部磁場が発生し、超伝導電子対のスピンが、面直方向に強く固定されていることを突き止め、これが原因となって外部磁場に対して極めて強いことを明らかにしました。これは世界的にも前例にない特殊な超伝導状態 (図 4) が MoS_2 薄膜で実現していることを示しています。

《今後の展望》

本研究により、反転対称性が破れた原子層 1 層分の厚さの 2 次元超伝導体では、面に平行な外部磁場に対して極めて耐久性の高い特殊超伝導が実現されることが分かりました。今後、この原子層超伝導の特異な超伝導特性や電子対形成機構が明らかになることが見込まれます。本研究成果は、対称性が破れた 2 次元超伝導という新たな学術分野を切り開く礎となるだけでなく、強磁場に対して極めて安定的な超伝導材料を開発する指針となることが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Physics」（平成 27 年 12 月 7 日 オンライン速報版）

論文タイトル：「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, Yoshihiro Iwasa*

DOI 番号：10.1038/nphys3580

6. 用語解説：

注1 原子膜材料

2010 年のノーベル物理学賞で有名となったグラフェンなどの 2 次元物質として注目されている、原子層 1 層あるいは数層で形成される材料。これらの物質の多くはスコッチテープ法で劈開（へきかい）し、ナノメートルスケールの厚さの薄膜を容易に作製できるため、ナノデバイスへの応用の期待が高まっている。

注2 電気二重層トランジスタ (EDLT)

日常生活の至る所に使われている電化製品の中核を担う電界効果トランジスタ (FET) の絶縁層をイオン液体と呼ばれる特殊な塩（えん）で構成される液体に置き換えたトランジスタ（図 1 参照）。液体の塩あるいは塩を溶かした液体の中に 2 つの固体電極を入れ、電極間に電圧を加えた時に液体と固体の界面にできる帯電層は電気二重層 (electric-double-layer : EDL) と呼ぶ。この電気二重層では、塩を構成している陽イオン（正の電荷を持つ）と陰イオン（負の電荷を持つ）はそれぞれ負と正の電圧が加えられている電極に引き寄せられ、最終的に電極界面に整列し、同時に電極内では、イオンとは反対の符号を持つ電荷が界面に引き寄せられている。

注3 第一原理計算

原子レベル、ナノスケールでの物質の基本法則である量子力学に基づいて、原子番号だけを入力パラメータとして、非経験的に物理機構の解明や物性予測を行う計算手法のこと。実験では分からないミクロな情報を補うことで、実験結果の理解に役立つだけでなく、最近では、まだ合成されていない新物質や、実験困難な極限条件下の物質科学研究のために、欠くことのできない研究手法となりつつある。

注4 テスラ

国際 (SI) 単位系での磁束密度の単位であり、磁場の強さを表す。市販で最も強いネオジム永久磁石の表面磁束密度は約 0.5 テスラ、フェライト磁石の磁束密度は約 0.1 テスラ、地磁気は日本では 0.00005 テスラ程度である。

9. 添付資料：

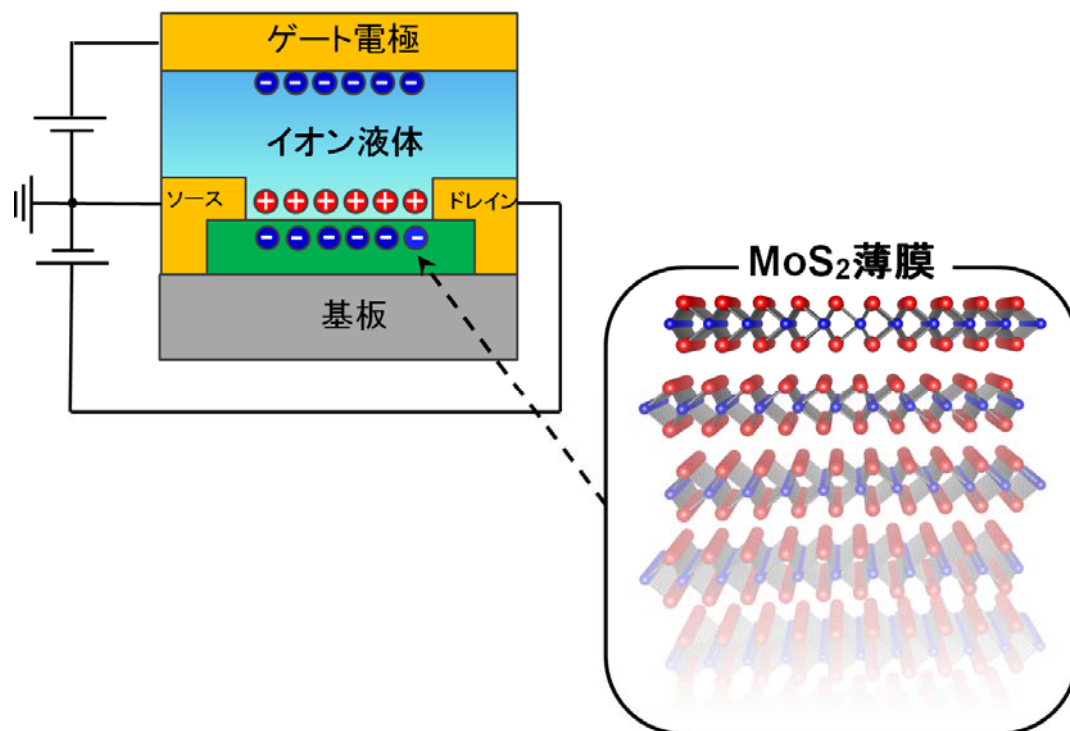


図1：二硫化モリブデン MoS_2 を用いた電気二重層トランジスタ構造

MoS_2 薄膜をトランジスタのチャンネルに用いた電気二重層トランジスタ（EDLT）のデバイス構造。本研究で用いた MoS_2 薄膜の厚さは約 20 ナノメートル（nm）。正の電圧を加えることで MoS_2 の表面（原子層 1 層分の厚さ）にのみ電子が蓄積する。

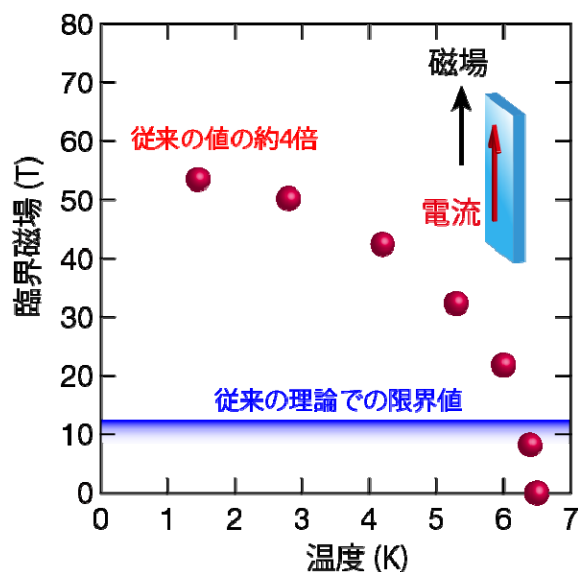


図2： MoS_2 -EDLT における面内磁場下における臨界磁場の温度依存性

面内方向に磁場を加えた場合の（上部）臨界磁場（超伝導が壊れる限界の磁場）の温度依存性。最低温での臨界磁場は、従来の理論での限界値の 4 倍の大きさになっている。

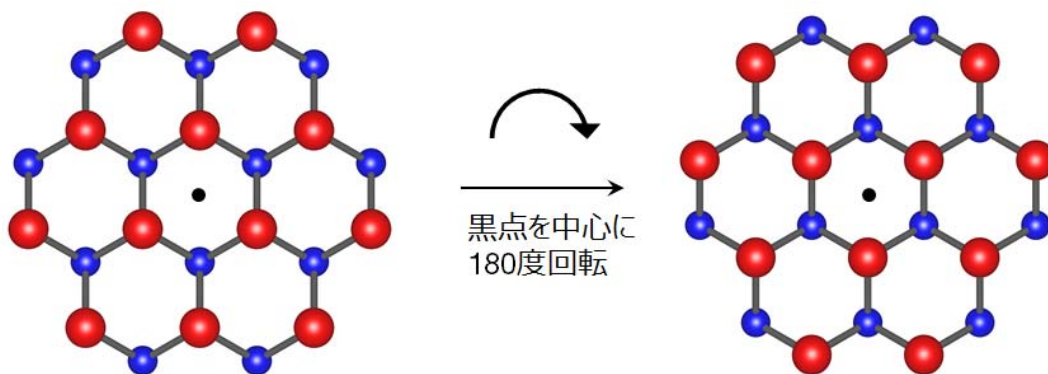


図3: MoS₂の面内方向の反転対称性の破れ

MoS₂ 1層の表面に対して垂直方向から見た様子。ある一点を中心に MoS₂表面と同じ面内で180度回転、すなわち“反転”を行うともとの構造に一致しない。これを“反転対称性の破れ”という。相対論的効果とこの反転対称性の破れによって、結晶内部に局所的な有効磁場を生じている。

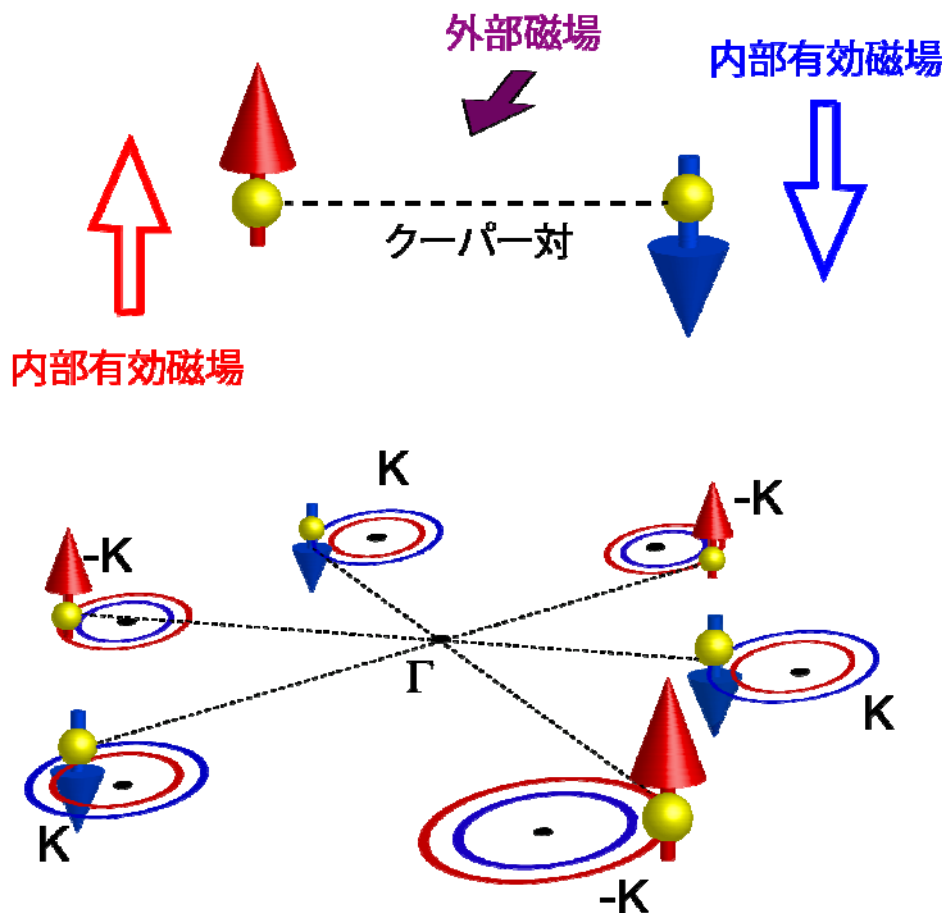


図4: 内部有効磁場によって面直方向に固定された非従来型のクーパー対

クーパー対（超伝導電子対）は、面内の対称性の破れに起因する約 200 テスラの内部有効磁場によって、層に垂直な方向に固定されているため、層に平行な方向の外部磁場（約 50 テスラ）を加えてもその超伝導状態は維持される。下の図は、波数空間でのクーパー対の様子を示したものである。結晶構造の対称性から六角形の波数領域でペアを組む。