

超伝導磁束の液晶状態を発見

～磁束液晶が作る渦対と渦輪のダイナミクス～

ポイント

- ・遷移金属ダイカルコゲナイド化合物において量子化磁束の液晶状態を発見。
- ・磁場中でのスメクチック固体—液体転移を観測。
- ・磁束液晶に特有なトポロジカル量子数に期待。

概要

北海道大学大学院理学研究院の延兼啓純助教、丹田 聡名誉教授（研究当時：同大学大学院工学研究院）らの研究グループは、2次元層状物質である遷移金属ダイカルコゲナイド化合物に微量の鉄(Fe)原子をインターカレート^{*1}することで超伝導^{*2} 磁束^{*3} の液晶状態^{*4} とそのダイナミクスの観測に成功しました。

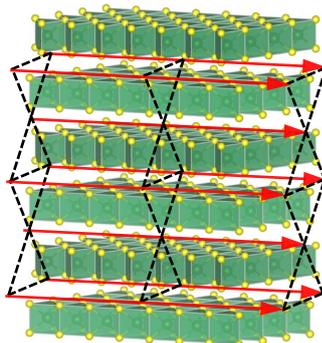
遷移金属ダイカルコゲナイド (MX_2 : M = Nb, Ta など、X = S, Se, Te など) は、超伝導と電荷密度波が競合または共存している物質群として、1970年代より研究が進められてきました。近年は2004年にノボセロフ博士、ガイム教授らによる単層グラフェンにおける量子ホール効果の発見（2010年ノーベル物理学賞）を契機として、原子層デバイスにおける新奇物性探索が世界的に流行しています。

また測定技術の進歩により、2021年には2次元層状物質 NbSe_2 におけるクーパー対密度波と電荷密度波の共存も報告されました。以上のように MX_2 系（2次元層状物質）は基礎研究からデバイス応用までの垣根が低いことが特徴と言えます。

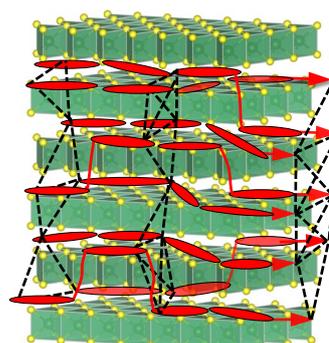
本研究では、 NbS_2 （超伝導転移温度 5K）に鉄を 0.08%の組成比で封入した $\text{Fe}_{0.08}\text{-NbS}_2$ 単結晶を作成し、その超伝導特性を調べました。鉄原子が層間に侵入すると、通常は超伝導が抑制されますが、興味深いことに超伝導の転移温度や上部臨界磁場が鉄を含まない試料よりも高い、つまり超伝導がより増強されることを発見しました。さらに、磁場中で磁束が固体と液体の中間状態である液晶になっていることを発見しました。これまでに MX_2 物質群で磁束液晶に関する報告はなく、超伝導の発現機構の解明や磁束液晶状態を利用したナノスケールデバイス研究への発展が期待されます。

なお、本研究成果は、2024年5月2日（木）公開の *Physical Review B* 誌に掲載されました。

アブリコソフ格子



磁束液晶



通常の超伝導体におけるアブリコソフ三角格子（左）と Fe-NbS_2 超伝導体において発見された磁束液晶（右）。

【背景】

2次元層状物質 MX_2 は外部圧力、非磁性原子・有機物をインターカレートすることで低次元性を制御し、超伝導の異方性や電荷密度波との競合・共存関係が研究されてきました。一般的に磁性原子が層間に侵入すると超伝導を抑制するため、 MX_2 の超伝導研究ではあまり行われてきませんでした。ランダムな局在磁性スピンをインターカレートした場合、層状 MX_2 超伝導体にどのような影響を及ぼすでしょうか。研究グループのこれまでの研究結果から「Fe1%以上封入した NbS_2 では超伝導を示さず、Fe スピンと伝導電子の相互作用による近藤効果やスピングラスの振る舞いが顕著になる」ことが分かっています。本研究では、Fe 濃度を更に希薄にした単結晶を作成して、Fe- NbS_2 の超伝導特性、及び低次元性による電荷密度波形成の可能性などを調べることにしました。また近年 MX_2 の結晶性、劈開性の良さを利用した単層～数層のナノスケールデバイスにおける基礎物性研究において、バルク結晶では見られなかった新奇量子現象が次々と発見されており、基礎研究から量子デバイス応用まで幅広い展開が期待される分野です。

【研究手法】

化学気相輸送法により鉄を 0.08% の組成比で混ぜた NbS_2 単結晶を作成し、低温・磁場中での Fe- NbS_2 の超伝導状態の振る舞いを電気抵抗測定により調べました。外部から電流と磁場をかけると超伝導体中の磁束にはローレンツ力が働き、超伝導体中を動くことで、散逸となり抵抗が発生します。外部電流や磁場の大きさ、方向を制御することで磁束の特徴（相互作用や次元性）、そのダイナミクスを明らかにすることができます。

【研究成果】

鉄 0.08% を含む Fe- NbS_2 は鉄を含まない NbS_2 よりも超伝導転移温度と上部臨界磁場が高温・高磁場側へシフトすることが分かりました。つまり、微量の鉄をインターカレートした場合、より頑強な超伝導が実現しています。Fe- NbS_2 は超伝導転移幅が NbS_2 よりも広がっており、これは磁束にローレンツ力が働き、運動していることに起因しています（図 1）。

また、磁束格子（固体）状態から磁束液体状態への融解の過程を詳しく調べると、スメクチック磁束液晶^{*5}の固体-液体転移の臨界指数が 1.4 であることを発見しました。通常の超伝導体中の磁束は直線的に整列したほうがエネルギー的に得ですが、研究グループの試料内にはランダムな Fe スピンが配置されているために磁束が柔らかく、ぐにゃぐにゃの液晶状態になっていると考えられます。

さらに、2次元伝導面内に磁場を回転させると磁束液晶状態による 2 回対称性が観測されました（図 2）。磁場を強くしていくと超伝導から常伝導^{*6}に転移する過程でキंक構造を観測しました（図 3）。研究グループは、磁束液晶状態における渦対のスライディング（2次元融解）、及び渦輪の整列による 3次元渦の形成（再結晶化）を提案しています。

【今後への期待】

超伝導体中の量子化された磁束を動作原理とする高感度な磁気センサーは、既に医療機器や磁気特性測定装置に組み込まれています。 MX_2 は高結晶性かつ劈開性が良いため、デバイス設計、応用研究への展開が期待されます。今後、世界的に開発競争の起きている量子制御・計測が MX_2 超伝導体を用いた磁束液晶の量子もつれ状態により実現する可能性があります。

論文情報

論文名 Dynamics of liquid crystal vortex in a layered superconductor (層状超伝導体における磁束液晶のダイナミクス)

著者名 延兼啓純^{1, 3}、宇野瑛莉香^{2 (研究当時)}、田畑裕一^{2 (研究当時)}、高橋杏介²、酒部大樹^{5 (研究当時)}、
丹田 聡^{3, 4 (研究当時)}、⁶ (1北海道大学大学院理学研究院、²北海道大学大学院理学院、³北海道大学量子トポロジー理工学教育研究センター、⁴北海道大学大学院工学研究院、⁵北海道大学大学院工学院、⁶北海道大学名誉教授)

雑誌名 Physical Review B (物理学の専門誌)

D O I 10.1103/PhysRevB.109.174505

公表日 2024年5月2日(木)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 助教 延兼啓純 (のぶかねひろよし)

T E L 011-706-4431 F A X 011-706-4927 メール nobukane@sci.hokudai.ac.jp

U R L https://phys.sci.hokudai.ac.jp/research_lab/b-06/ja/

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

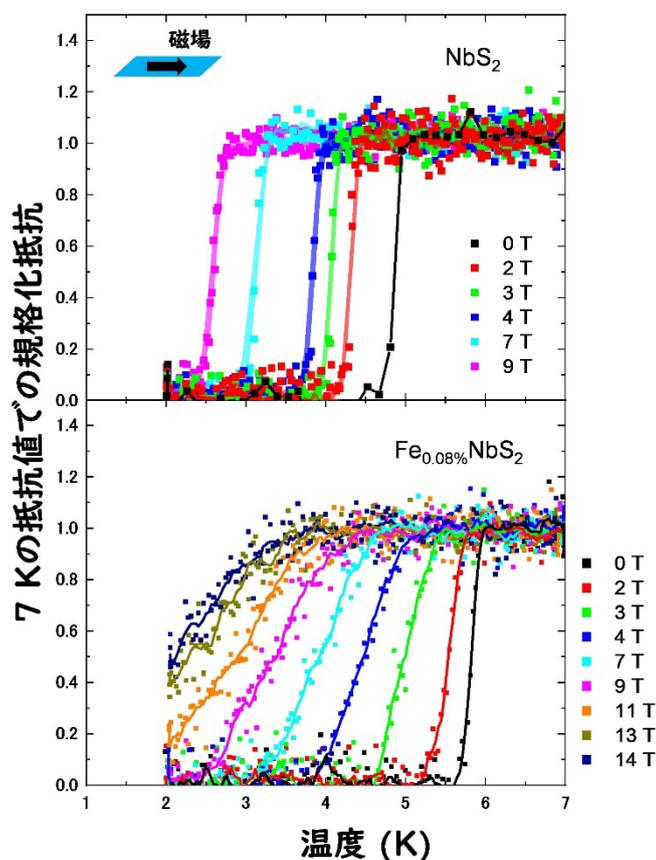


図 1. Fe_{0.08}NbS₂ と NbS₂ の抵抗の温度依存性。

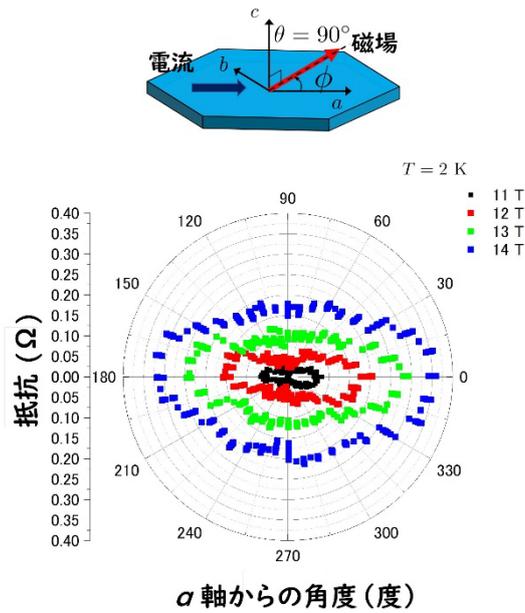


図 2. $\text{Fe}_{0.08}\text{NbS}_2$ の伝導面内の抵抗の角度依存性。磁束液晶の配向特性を反映している。

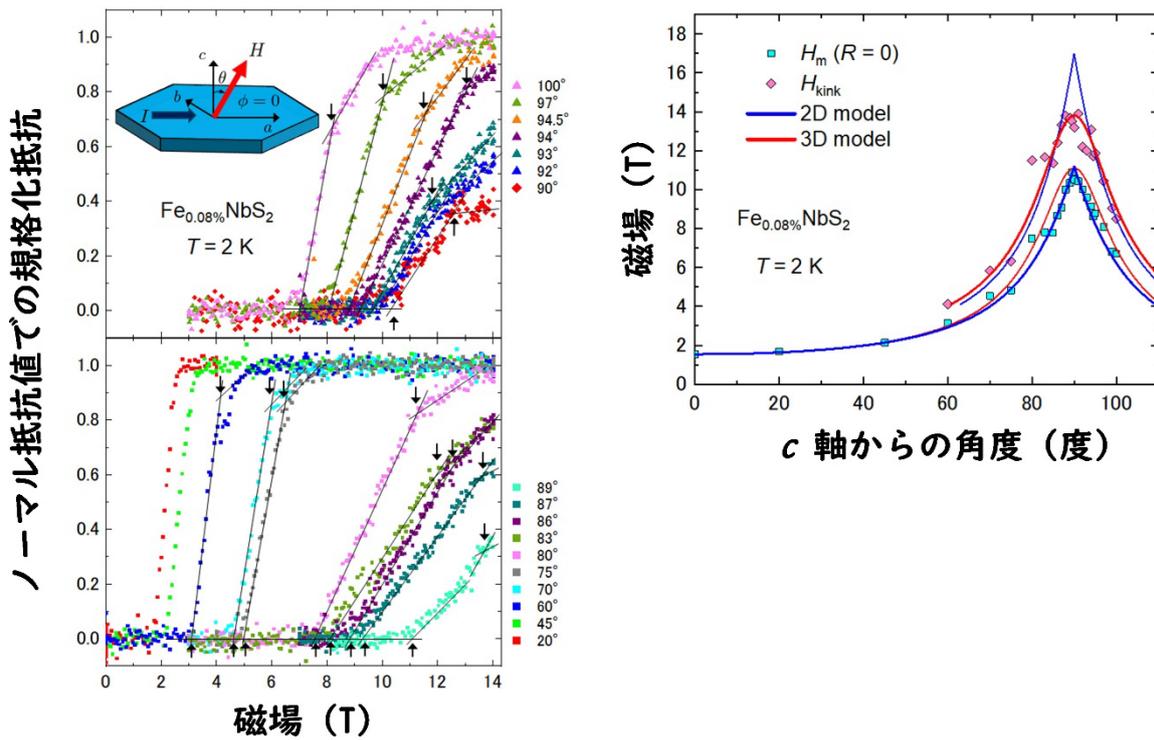


図 3. 磁気抵抗の角度依存性 (左) と融解磁場とキंक構造を示す磁場における角度依存性 (右)。融解磁場では 2 次元性、キंक磁場では 3 次元性がそれぞれ顕著になっており、磁束液晶の特徴を明らかにした。

【用語解説】

- *1 インターカレート … 層状物質の層間に他の原子や分子が挿入すること。
- *2 超伝導 … 大きな特徴は二つ。電気抵抗がゼロになることと外からの磁束を排除すること。
- *3 磁束 … 超伝導には二つのタイプがある。第一種超伝導体は、ある磁場以上になると超伝導が完全に壊れる。第二種超伝導体では自分自身（超伝導）が磁場により完全に壊されてしまう前に、その一部を破壊して磁場の侵入を許す。このとき超伝導中の磁束は量子化される。
- *4 液晶状態 … 固体と液体の中間の状態。結晶の持つ周期性と液体の流動性を併せ持つために多彩な配向秩序（秩序パラメータ）が現れる。本研究で観測した磁束液晶は一直線の長いロープ（渦糸）というよりもある長さ（相関長）でロープをぶつ切りにしたような棒状から成る。
- *5 スメクチック磁束液晶 … 磁束が1次元の周期性を持った棒状の液晶のようになること。
- *6 常伝導 … 金属状態のこと。金属状態ではオームの法則が成り立つ。