

New magnetotransport properties in nonmagnetic/ferromagnetic bilayer semiconductor heterostructures: Giant proximity magnetoresistance, novel symmetry, and control by gate voltage

Kosuke Takiguchi¹, Le Duc Anh^{1,2,3,*}, Takahiro Chiba⁴, Harunori Shiratani¹,
Ryota Fukuzawa^{1,5}, Takuji Takahashi^{5,6} and Masaaki Tanaka^{1,6,7,*}

¹ EEIS, The University of Tokyo, ² IEI, The University of Tokyo, ³ PRESTO ⁴ NIT, Fukushima College,
⁵ IIS, The University of Tokyo, ⁶ NanoQuine, The University of Tokyo, ⁷ CSRN, The University of Tokyo.

The magnetic proximity effect (MPE) induced at the interface of a ferromagnetic (FM) insulator and a nonmagnetic (NM) conducting material with strong spin-orbit coupling is a promising platform for the emergence of novel phenomena [1-3]. Here we present novel magnetotransport phenomena originated from MPE in non-magnetic InAs/ferromagnetic semiconductor (FMS) (Ga,Fe)Sb heterostructures, where (Ga,Fe)Sb is an FMS with a high Curie temperature over 300 K [4]. In this structure, the two-dimensional electron wavefunction in the InAs quantum well (QW) penetrates into the (Ga,Fe)Sb side so that the strong MPE is realized. In addition, the gate-voltage application can enhance the MPE by pushing the wavefunction towards the FM layer.

Firstly, we report a giant and gate-tunable MPE in a NM InAs QW interfaced with (Ga,Fe)Sb, in which a spin splitting Δ (~ 3.8 meV) in the InAs QW is induced and controlled by the gate voltage. This large Δ causes a new giant magnetoresistance that is two or three orders of magnitude larger than previously reported ones [1-3] and has unique angular symmetry, to which we refer as “proximity magnetoresistance” (PMR) [5].

In addition to PMR, the InAs/(Ga,Fe)Sb system exhibits an extra unusual transport property due to the space inversion symmetry (SIS) breaking and time reversal symmetry (TRS) breaking. The odd-parity magnetoresistance (OMR) in a linear response regime is a novel phenomenon only observed in systems where both TRS and SIS are simultaneously broken [6–8]. Here we have found a giant and gate-controllable OMR as large as 27% in edge transport channels of the InAs QW, which is magnetized by an MPE from the underlying (Ga,Fe)Sb layer. We argue that the origin of the large OMR in our system is attributed to TRS breaking and SIS breaking from MPE and from the strong Rashba effect at one-dimensional channel, respectively [9].

References [1] I. Vobornik, *et al. Nano Lett.* **11**, 4079–4082 (2011). [2] H. Nakayama, *et al. PRL* **110**, 206601 (2013). [3] S. Cho, *et al. Sci. Rep.* **5**, 14668 (2015). [4] N. T. Tu, *et al. APL* **108**, 192401 (2016). [5] K. Takiguchi, *et al. Nat. Phys.* **15**, 1134 (2019). [6] R. Moubah, *et al. JAP* **115**, 053911 (2014). [7] Y. Wang, *et al. Nat. Commun.* **11**, 216 (2020). [8] T. C. Fujita, *et al. Sci. Rep.* **5**, 9711 (2019). [9] K. Takiguchi, *et al. arXiv* 2003.11731 (2020).

二次元磁性体 Cr_3Te_4 における磁性のゲート制御

Gate control of magnetism in two-dimensional magnetic material Cr_3Te_4

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室
梶原駿、松岡秀樹、王越、中野匡規、岩佐義宏

代表的な層状物質である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)は遷移金属とカルコゲンの組み合わせに依存して多彩な物性を示すことから、2次元物質の母物質として非常に重要な物質群である。 Cr_3Te_4 はTMDCに属する CrTe_2 の層間にCrが規則正しくセルフインターカレートされた物質とみなすことが可能であり、バルクでは室温強磁性を示すことが知られている[1]。我々のグループでは、分子線エピタキシー法(MBE法)を用いて Cr_3Te_4 のエピタキシャル薄膜を作製することに成功し、薄膜作製条件を調整することで強磁性転移温度や磁気異方性などの磁気特性を大きく変調できることを見出している[2]。本発表では、この Cr_3Te_4 エピタキシャル薄膜試料に対してイオンゲートを適用し、電気化学的にLiをインターカレーションすることで得られた磁気特性や輸送特性の変化について報告する。

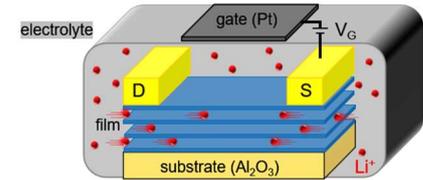


図 1: インターカレーションの模式図

[1] E. F. Bertaut et al., J. Phys. 25, 582 (1964).

[2] Y. Wang et al., 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 11a-Z29-9, 2020

Novel Behavior of Relaxation of Magnetization in a Remagnetized (Ba,Rb)Fe₂As₂

Tamegai Lab., Dept. of Appl. Phys. The Univ. of Tokyo

T. Ren, S. Pyon, and T. Tamegai

In the preceding study, a turbulent vortex structure at the remagnetization boundary of a superconductor was reported in a single crystalline iron-based superconductor (Ba_{0.67}Rb_{0.33})Fe₂As₂ [1]. Such structure, named Meissner hole, was observed in both pristine crystal and one with artificial defects, accompanied with a local excess current at the remagnetization boundary. Using the critical state model, we find a relation between the motion of the Meissner hole and the relaxation of magnetization. We then tracked the motion of the Meissner hole, with total tracking time up to 1 hour. The result qualitatively proved the validity of the model, while the actual relaxation rate at the remagnetization front is considerably under-estimated. To fix this, we further investigated the configuration variation of the Meissner hole as shown in Fig. 1. We find that the curvature of the remagnetization boundary could significantly accelerate the local motion of the Meissner hole.

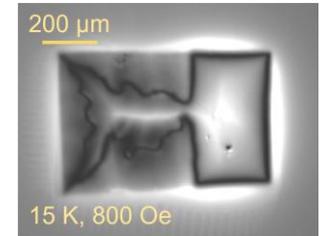


Fig. 1 A single crystalline (Ba_{0.67}Rb_{0.33})Fe₂As₂ that was partly irradiated with 3 MeV proton. The Meissner hole appears as a black wiggling ring.

[1] T. Ren, S. Pyon, T. Tamegai, J. Phys. Conf. Ser. 1975, 012013 (2021).

Tuning ultra-low frequency vibrations for magneto-luminescent compounds

¹*School of Science, Department of Chemistry, The University of Tokyo*

Kunal Kumar,¹ Olaf Stefanczyk,¹ Koji Nakabayashi,¹ Yuuki Mineo,¹ Shin-ichi Ohkoshi¹

The ultralow-frequency (ULF) vibrations explored through terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) and Raman spectroscopy reveal the characteristics of phonon and magnon, which influence the bulk properties like luminescence, magnetism, etc. in the sub-terahertz (below 1 terahertz) region.^{1,2} We prepared two supramolecular assemblies with the molecular formula $[\text{Nd}^{\text{III}}(\text{phen})_3(\text{NCX})_3] \cdot 0.3\text{EtOH}$ ($X = \text{S}$, **NdS**; Se , **NdSe**; phen = 1,10-phenanthroline) to unravel the presence and influence of phonons in the molecular complexes. They crystallize into a centrosymmetric triclinic *P*-1 space group, revealing nine coordinated muffin shape geometry in the first coordination sphere around Nd^{3+} ion (**Figure 1**).

Both complexes have ability to absorb THz-wave at 0.59 THz (19.7 cm^{-1}) for **NdSe** and 0.65 (21.7 cm^{-1}) for **NdS** (**Figure 1**). Observed redshift in THz-wave absorbance for selenium-containing assemblies is explained through quantum chemical calculation suggesting pendulum-like vibrations of coordinated pseudohalides (NCS/NCSe) and phen molecule. A similar redshift is visible in the Raman spectra in the sub-terahertz region. Additionally, the presence of Nd^{3+} ions imparts near-infrared emission behaviour, which changes as a function of temperature, allowing them to act as a ratiometric thermometer. They also exhibit field-induced single-molecule magnetic properties.

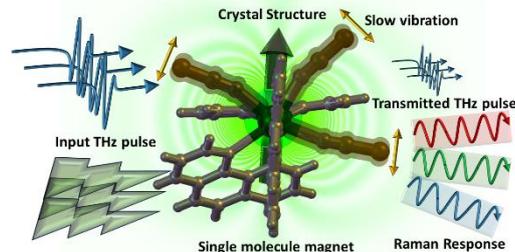


Figure 1. Crystal structure of representative Nd-S molecule with shown mechanistic influence of input light pulse for the infrared and Raman active vibrational modes.

[1] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, H. Tokoro, *Nature Photonics*, **8**, 65 (2014).

[2] K. Kumar, O. Stefanczyk, K. Nakabayashi, K. Imoto, Y. Oki, S. Ohkoshi, *Adv. Optical Mater.*, **10**, 2101721 (2022).

キャント反強磁性体 MnCO_3 のマイクロ波スペクトロスコピー

Microwave spectroscopy of canted antiferromagnet MnCO_3

工学系研究科物理工学専攻齊藤研究室

巻内崇彦、吉川貴史、シッチャヌギリッツ タナポーン、沼田淳希、高橋三郎、齊藤英治

炭酸マンガン MnCO_3 では、やや傾いて(キャントして)配向した反強磁性電子スピンの核スピンと超微細相互作用により強く結合しているため、核スピン偏向を磁場で制御できる。この性質を利用して、これまで電子系に限られていたスピントロニクス現象のうち核スピンのスピンポンピング[1]とスピンゼーベック効果 [2]が実証され注目を集めている。本研究では MnCO_3 の電子マグノンおよび核マグノンの外部磁場に対する分散関係[3]を低温マイクロ波スペクトロスコピーにより可視化することに成功した。反強磁性電子スピン歳差の同位相モードが数ギガヘルツ程度の小さなギャップを持つゼロ磁場付近において、核スピン歳差の周波数が強く引き下げられる効果(周波数プリング効果)を明瞭に観測した。磁場分散のスペクトロスコピーは各種磁気パラメータを決めるためにも有用であり、 MnCO_3 の内部磁場や超微細相互作用磁場(\propto 自発磁化)の温度依存性も求めることができた。さらにマイクロ波スペクトロスコピーによりとらえられた核スピンの非線形マイクロ波吸収についても紹介する。

[1] Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi, and E. Saitoh, *Nature Physics* **15**, 22 (2019).

[2] T. Kikkawa, D. Reitz, H. Ito, T. Makiuchi, T. Sugimoto, K. Tsunekawa, S. Daimon, K. Oyanagi, R. Ramos, S. Takahashi, Y. Shiomi, Y. Tserkovnyak, and E. Saitoh., *Nature Communications* **12**, 4356 (2021).

[3] H. Fink and D. Shaltiel, *Physical Review* **136**, A218 (1964).

s 波超伝導体 NbN におけるヒッグスモードの自己相互作用とテラヘルツ波増幅

Self-interaction of Higgs modes and terahertz wave amplification in s -wave superconductor NbN

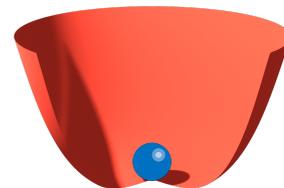
¹ 理物・島野研, ² 低セ・研究開発部門
磯山和基¹, 島野亮^{1,2}

「自発的対称性の破れ」は現代物理学の最も基本的な概念の一つである。系が相転移すると対称性の低下とともに秩序変数と呼ばれる新しい秩序を特徴づける量が現れる。ランダウはこのことを相転移温度 (T_c) においてポテンシャルの形状が変わると考えた (図)。一般に連続的対称性を破る相転移においては、秩序変数はその大きさ (振幅) と位相の2つの揺らぎを持つ。特に超伝導体における前者はヒッグスモードと呼ばれ、標準模型におけるヒッグスボゾンと密接な関わりを持つ。

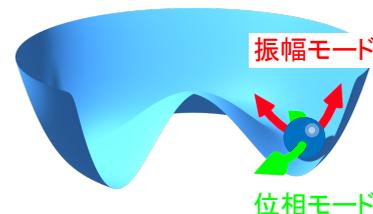
超伝導体のヒッグスモードは電磁場とは直接結合せず、高強度テラヘルツ (THz) 波を用いた非線形過程によって励起される。特に s 波超伝導体 NbN においてはヒッグスモードと電磁場の 2 次の結合に由来する THz 第 3 高調波発生 (THG) が確認されている[1]。我々は s 波超伝導体 NbN に THz 波と近赤外光を同時に入射させたときに THG が増強することを発見した。これは通常のヒッグスモード共鳴 THG より高次である 5 次の相互作用による過程であり、素粒子論におけるヒッグスボゾン同士の相互作用に対応する項を含むと考えられる。

[1] 最近のレビューとして、例えば R. Shimano & N. Tsuji, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11**, 103 (2020).

$T > T_c$



$T < T_c$



相転移温度前後でのポテンシャル形状と秩序変数(青丸)の2つの揺らぎ。

トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 /超伝導体 PdTe_2 薄膜ヘテロ接合における非相反電荷輸送

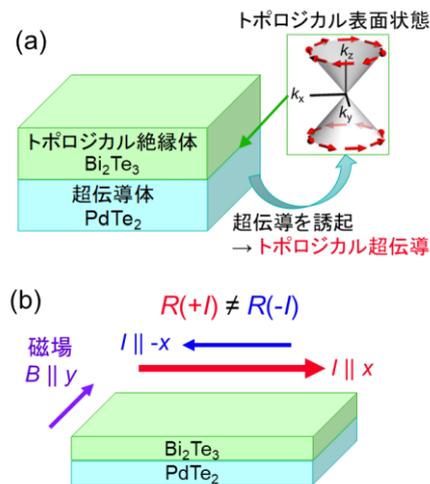
Nonreciprocal charge transport in a topological insulator Bi_2Te_3 / superconductor PdTe_2 thin film heterostructure

工学系研究科・物理工学専攻¹, 理研 CEMS², 東北大金研³, 東大東京カレッジ⁴

増子真¹, 川村稔², 吉見龍太郎², 池田侑哉¹, 渡邊竜太¹, James J. He², D. Marienko², 塚崎敦³, 高橋圭², 川崎雅司^{1,2}, 永長直人^{1,2}, 十倉好紀^{1,2,4}

トポロジカル絶縁体に超伝導体を接合すると、トポロジカル絶縁体の表面ディラック状態に近接効果による超伝導ギャップが誘起され、接合界面にトポロジカル超伝導が現れると期待される。本研究では、トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 と超伝導体 PdTe_2 から成る薄膜ヘテロ接合を分子線エピタキシー法により作製した(図(a))。

Bi_2Te_3 / PdTe_2 接合試料では接合界面の空間反転対称性が破れており($P \parallel z$)、電流 $I \parallel x$ に対し磁場 $B \parallel y$ を印加することで、抵抗 R が非相反性 $R(+I) \neq R(-I)$ を示すと期待される(図(b))。実際、超伝導転移の過程の中間温度域で電気抵抗測定を行ったところ、明瞭な非相反抵抗が観測された。この結果は、観測された超伝導状態が空間反転対称性の破れた状態であり、界面トポロジカル超伝導発現の必要条件を満たすことを示唆している。講演では、非相反応答の温度・磁場依存性を、理論的に予想される振る舞い[1]と比較しつつ議論する。



磁性ワイル半金属 EuCd_2Sb_2 薄膜における異常ホール角の最大化

Maximizing anomalous Hall angle in magnetic Weyl semimetal EuCd_2Sb_2 films

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室

大野瑞貴, 見波将, 中澤佑介, 佐藤慎, Markus Kriener, 有田亮太郎, 川崎雅司, 打田正輝

磁性ワイル半金属はディラックコーンと呼ばれる線形分散を持っており、その交点であるワイル点周りのベリー曲率に起因して、異常ホール伝導度がワイル点のエネルギー位置で最大値を持つことが理論計算で予測されている[1]。しかしながら、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ や Mn_3Sn などの従来の磁性ワイル半金属は、キャリア密度が高く、バンド構造が複雑なため、このようなエネルギー依存性は実験的に証明されていない。 EuCd_2Sb_2 は磁性ワイル半金属であり、ワイル点をもたらすバンドのみがフェルミレベルに存在するためワイル点に起因する輸送特性の研究に適している[2]。

本研究では、分子線エピタキシー成長により EuCd_2Sb_2 単結晶薄膜の作製に初めて成功し、Sb の圧力制御及びトランジスタ構造を用いた電界効果によってキャリア密度を変調することで、バルク単結晶と比較して異常ホール角が大きく増大することを見出した。第一原理計算に基づいた異常ホール伝導度もワイル点のエネルギー位置に鋭いピークを示すことから、図1のキャリア密度に依存した異常ホール角の増減はフェルミ準位のワイル点通過に伴うものであると考えられる。

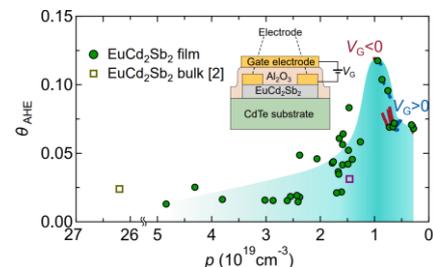


図1: 2Kにおける EuCd_2Sb_2 薄膜の異常ホール角のキャリア密度依存性。

電荷-スピン-格子自由度が強く結合した分子性物質における

トポロジカルな電荷・スピン励起

Topological charge and spin excitations in a strongly charge-spin-lattice coupled molecular material

工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室

須波圭史, 竹原陵介, 宮川和也, 堀内佐智雄, 加藤礼三, 宮本辰也, 岡本博, 鹿野田一司

一般に絶縁体に電気を流すには、あるエネルギー障壁を超える熱励起キャリアの生成が必要であり、バンド絶縁体ではバンドギャップが、電子相関の重要なモット絶縁体では電子間クーロン反発力がその障壁となる。これらの励起は個々の粒子の熱励起として記述されるが、最近我々は中性-イオン性(NI)転移系と呼ばれる一次元性の強い分子性物質において、一粒子描像で期待されるエネルギーよりはるかに(一桁程度)低いエネルギーで励起される伝導キャリアを電気抵抗測定により捉え、それが異なるドメインの境界に生じるトポロジカルな励起(図1)であることを明らかにした[1]。さらにはNMR実験により、スピン自由度を有する別種のトポロジカル励起も見出し[2]、NI転移系の伝導性・磁性がこれらの特異な励起に支配されていることを実証した。

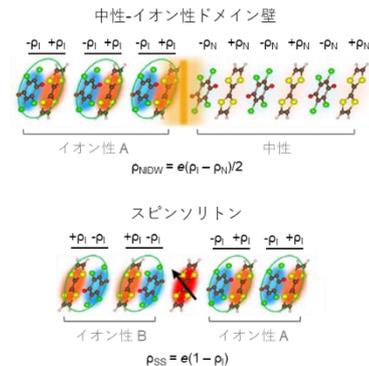


図 1. NI 転移系のトポロジカル励起.

[1] R. Takehara *et al.*, *Sci. Adv.* **5**, eaax8720 (2019).[2] K. Sunami *et al.*, *Sci. Adv.* **4**, eaau7725 (2018).

オールエピタキシャル単結晶 $\text{LaTiO}_{3+\delta}/\text{SrTiO}_3$ ラッシュバヘテロ構造における 巨大スピン流電流変換

Giant spin-to-charge conversion in an all-epitaxial single-crystal-oxide Rashba $\text{LaTiO}_{3+\delta}/\text{SrTiO}_3$ heterostructure

¹ 東大電気系, ² 高エネ研, ³ 東大総合研究機構, ⁴ JST PRESTO, ⁵ 東北大多元研, ⁶ 東大 CSRN

金田真悟¹, 北村未歩², 荒井勝真¹, 新居拓真¹, 岡野諒¹, Le Duc Anh^{1,3,4}, 遠藤達朗¹,
堀場弘司², 組頭広志^{2,5}, 小林正起^{1,6}, 関宗俊^{1,6}, 田畑仁^{1,6}, 田中雅明^{1,6}, 大矢忍^{1,3,6}

超低消費電力メモリや熱電材料の実現／応用に向けて、電子の流れである電流とスピンの流れであるスピン流を高効率で変換することは極めて重要である。高効率のスピン流-電流変換を行うには、スピン流を損失なく輸送し、大きなスピン軌道相互作用を用いてスピン流を高効率に電流に変換する必要がある。しかし、高効率のスピン流輸送／変換を兼ね合わせる材料系はなかった[1,2]。本研究では、オールエピタキシャル単結晶 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaTiO}_{3+\delta}/\text{SrTiO}_3$ ヘテロ構造を作製し、 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaTiO}_{3+\delta}$ での効率的なスピン流輸送と、 $\text{LaTiO}_{3+\delta}/\text{SrTiO}_3$ 界面での高効率のスピン流-電流変換に成功した(図 1)。本研究では、193.5 nm という世界最高効率のスピン流電流変換効率が得られた。本成果は、スピントロニクス応用に向けて $\text{LaTiO}_{3+\delta}/\text{SrTiO}_3$ が極めて有望であることを示している。

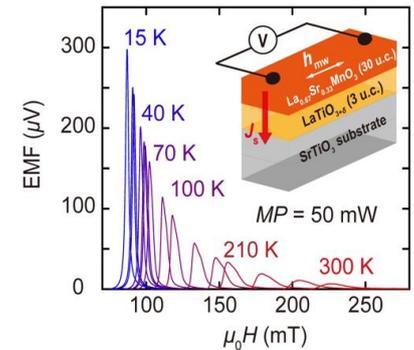


図 1: 15 から 300 K における起電力 (EMF) の磁場 ($\mu_0 H$) 依存性

Field-free spin-orbit torque magnetization switching in a perpendicularly magnetized (Ga,Mn)As single layer

Tanaka-Ohya Lab. Dept. of Electrical Engineering and Information Systems, UTokyo

(P) Miao Jiang, Chenda Wang, Shinobu Ohya and Masaaki Tanaka

Nowadays, magnetic random access memory (MRAM) is proposed as one of the most promising next-generation memory technologies. For further improving the writing performance, the integration density and the efficiency, current-induced spin-orbit torque (SOT) magnetization switching has been achieved in a ferromagnet single layer with a perpendicular magnetic anisotropy (PMA) [1,2]. Here, we report a successful

field-free SOT switching in a (Ga,Mn)As single layer by engineering a tilted anisotropy axis and a Mn distribution gradient along the growth direction (Fig. 1a). With the characterization of the anisotropic magnetoresistance (AMR) effect (Fig. 1b), the potential tilting of the easy axis can be confirmed, which contributes to the achievement of the field-free SOT switching in the (Ga,Mn)As single layer. Our findings will advance the development of highly-efficient MRAM with better scalability.

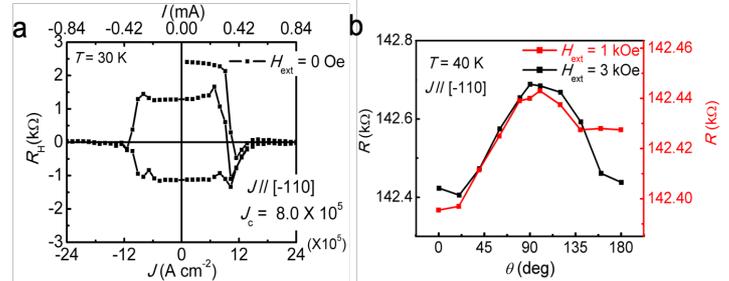


Fig. 1. Field-free SOT switching in a (Ga,Mn)As single layer.

[1] M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya, and M. Tanaka, *Nature Commun.* **10**, 2590 (2019).

[2] M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, S. Ohya, and M. Tanaka, *Nature Electron.* **3**, 751 (2020).

ミスフィット層状超伝導体の異方性の測定

Measurement of anisotropy in misfit layered superconductors

工学系研究科・物理工学専攻・為ヶ井研究室

松澤 創一郎、卞 舜生、為ヶ井 強

ミスフィット層状化合物とは、一般式 $(MX)_{1+x}(TX_2)_n$ ($M = \text{Sn, Pb, Sb, Bi, rare earth metals}$, $T = \text{Ti, V, Nb, Ta, Cr}$, $X = \text{S, Se}$; $n = 1, 2, 3$)と表記される層状カルコゲナイドであり、異なる空間群によって定義される2種類の副格子層(MX 層と TX_2 層)が交互に積層した構造をもつ[1]。この系ではこれまでに90種以上の化合物の存在が確認されており、その結晶構造の特異性や、電荷密度波や超伝導といった物性を示すことから注目されている。

我々は、超伝導を示すミスフィット層状化合物 $(\text{BiSe})_{1+\delta}\text{NbSe}_2$ に対し、上部臨界磁場の磁場角度依存性を面外および面内方向について測定した。面外角度依存性 ($H_{c2}(\theta)$) は、その異方性が非常に小さいにも関わらず、2次元超伝導体において見られる振る舞いを示すことが分かった。一方、面内方向の角度依存性 ($H_{c2}(\varphi)$) は結晶全体の対称性を反映した2回対称を示し、特に、面内の異方性は面外方向の異方性よりも大きい。また、この物質は、ネマティック超伝導状態を示すとされる $\text{Nb}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導性に関連していると考えられている[2, 3]。両者の $H_{c2}(\varphi)$ の振る舞いがよく似ていることから、 $\text{Nb}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導性は $(\text{BiSe})_{1+\delta}\text{NbSe}_2$ に起因するものと考えられる。

[1] G. A. Wieggers, Prog. Solid. Chem. **24**, 1 (1996).

[2] M. E. Kamminga *et al.*, Commun. Mater. **1**, 82 (2020).

[3] K. J. Dalgaard *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 184103 (2021).

電子ガラスの量子結晶成長の直接観測

Direct observation of quantum crystal growth of electron glass

工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室¹ 長谷川研究室²

村瀬 秀明¹, 荒井 俊人², 長谷川 達生², 宮川 和也¹, 鹿野田 一司¹

液体を冷却すると結晶化する。ところが、何らかの方法で結晶化を妨げると、転移温度以下でも過冷却状態として系は液体の性質を保つことができる。さらに系を冷却すると、無秩序なまま粒子の運動が凍結する。これをガラスという。従来、ガラスの研究は、原子・分子やコロイドなどの古典粒子系を対象に行われてきたが、近年、有機物質中の伝導電子のガラス(電子ガラス)が発見され、これが量子により構成されているガラスであることから、注目を集めた[1]。ガラス・過冷却液体は、比較的安定であるが、長時間待つと結晶化する。電子ガラス・過冷却電子液体も同様に、長時間待つと電子の結晶状態(電荷秩序)へと転移する[2,3]。ここで問題となるのは、電子ガラスという、量子性を示す粒子により構成されているガラスは、古典粒子と同様の機構で結晶化するのか、あるいは、未知の量子的な機構で結晶化するのかということである。

この問題に挑むため、本研究では、ラマン分光法による可視化手法を用いて、有機導体 θ -(ET)₂RbZn(SCN)₄ における電子ガラス・過冷却電子液体の結晶化の直接観測を試みた[4]。高温(195 K)では、100 μm スケールで不均一に結晶化する振舞が観測された。低温(155 K)では、サイズが分解能(6.5 μm)未満の結晶核が多数生成して全体が一様に結晶化する振舞が観測された。これらは、古典的な結晶化機構(核生成・核成長)から期待される振舞と一致する。さらに、成長速度の温度依存性を測定し、古典粒子系のガラスの結晶成長速度の理論モデル(Wilson-Frenkel モデル)と比較した。その結果、観測値は、Wilson-Frenkel モデルによる理論値より 3-5 桁ほど速いことがわかった。この差異は電子の量子性に由来すると考えられ、結晶成長に量子性が重要な役割を果たしている可能性がある。当日は以上をもとに詳しく議論する。

[1] F. Kagawa, *et al.*, *Nat. Phys.* **9**, 2642 (2013). [2] T. Sato, *et al.*, *Science* **357**, 1378–1381 (2017). [3] S. Sasaki, *et al.*, *Science* **357**, 1381-1385(2017). [4] H. Murase, *et al.*, arXiv:2201.04855.

電荷・スピン自由度がフラストレートした分子性物質における異常な磁場誘起スピン状態 Anomalously field-induced spin state in a charge-spin frustrated organic material

工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室¹, IPCP RAS², The John Hopkins University³

浦井瑞紀¹, 宮川和也¹, 渡部友太¹, Elena I. Zhilyaeva², Svetlana A. Torunova²,
Rimma N. Lyubovskaya², Natalia Drichko³, 鹿野田一司¹

一般に相互作用する多体系は低温で秩序化するが、強いフラストレーションを内包する系ではこれらの秩序が量子揺らぎによって融解することがある。分子性物質 κ -(BEDT-TTF)₂Hg(SCN)₂Br は、三角格子状に配列した BEDT-TTF 分子の二量体内部で、電荷の不均衡に由来する電気双極子自由度が低温まで揺らいでいる、量子電気双極子液体の候補物質である[1]。一方、この物質は二量体あたりスピン 1/2 を持ち、スピン間には反強磁性相互作用が働くため、幾何学的フラストレーションの強いスピン系とみなせる。

本研究では、この電荷・スピン自由度がフラストレートした系の磁性を明らかにするため、¹H NMR 及び磁化測定を行った。その結果、この物質では、磁気秩序しないにも関わらず、BEDT-TTF 二量体あたり最大 $\sim 1\mu_B$ と見積られる大きな不均一磁気モーメントが磁場によって誘起され、低温で MHz より遅い時間スケールで揺らいでいることがわかった。発表ではこの起源についても議論する。

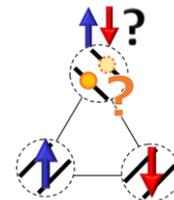


図 1: 二量体内の電荷と二量体間のスピンのフラストレーションの模式図。太線は BEDT-TTF 分子を表す。

[1] N. Hassan *et al.*, *Science* **360**, 1101 (2018).

デュアルゲート電界効果による量子異常ホール絶縁体-アクシオン絶縁体 トポロジカル相転移の制御

東京大学大学院¹, Tsinghua University², Frontier Science Center for Quantum Information³,

理研 CEMS⁴, 東北大金研⁵, 東京大東京カレッジ⁶

渡邊竜太¹, T. Liang^{2,3,4}, 吉見龍太郎⁴, 川村稔⁴, 塚崎敦⁵, 高橋圭⁴, 川崎雅司^{1,4}, 十倉好紀^{1,4,6}

トポロジカル絶縁体薄膜は上表面と下表面に2つの表面状態を有する。デュアルゲート電界効果トランジスタ(FET)素子を用いることで、上下表面のキャリア数を独立に制御できる。磁性/非磁性トポロジカル絶縁体の二層薄膜では、磁気ギャップやランダウ準位に対するフェルミ準位の位置に応じて量子異常ホール効果やアクシオン絶縁体、ホール伝導度の半整数量子化などの量子伝導が観測されてきた。デュアルゲート FET 素子により、単一試料による観測とそ状態間の制御が可能になり、表面量子伝導の統一的な理解に繋がると期待される。

本発表では、SrTiO₃ 基板上に成長した磁性トポロジカル絶縁体 Cr_x(Bi,Sb)_{2-x}Te₃/非磁性トポロジカル絶縁体 (Bi,Sb)₂Te₃ のデュアルゲート FET 素子(図 1)を用いた量子伝導制御について報告する。ゼロ磁場では磁気ギャップが開いた下表面の寄与により半整数に量子化したホール伝導度が観測された。強磁場下では、上表面がランダウ量子化することで、フェルミ準位位置に依存して量子異常ホール状態及びアクシオン絶縁体状態が観測された。講演ではこれらの量子状態間の遷移についても議論を行う。

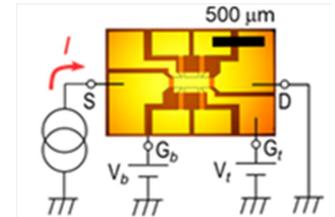


図 1: トポロジカル絶縁体デュアルゲート FET 素子

Pb(Bi,Sb)₂(Te,Se)₄ トポロジカル絶縁体マイクロサンプルのバルク伝導特性

Bulk transport in Pb(Bi,Sb)₂(Te,Se)₄ topological insulator micro-samples

生産技術研究所・マテリアル工学専攻・枝川・徳本研究室

徳本有紀, 杉本恭一, 枝川圭一

トポロジカル絶縁体(TI)は、特異な電子スピン構造を持ち、表面にスピン偏極したディラク粒子が存在している。中でも Pb(Bi,Sb)₂Te₄ は表面だけでなく内部の一次元欠陥(転位)に沿っても特殊な金属状態が発現し得る数少ない物質の一つである。当研究グループでは将来的に転位に沿った特殊な金属状態の実験研究に発展させることを念頭において、Pb(Bi,Sb)₂Te₄ TI のバルク絶縁性向上に取り組んできた[1,2]。さらに、Te サイトの一部を Se で置換することによりバンドギャップの増大が期待されるため、Pb(Bi,Sb)₂(Te,Se)₄ を対象とし、Sb 分率調節によるバルクキャリア抑制と Se 分率調節によるバルクバンドギャップ増大の 2 つの面からバルク絶縁性向上を目指した。昨年度の研究交流会で、ミリメートルスケールの試料では Pb(Bi,Sb)₂Te₄ を上回るバルク絶縁性は得られなかったものの、マイクロメートルスケールの試料で局所的にバルク絶縁性の高い試料が存在することを報告した。

2 K で高い電気抵抗率を示したマイクロメートルスケールの試料の磁気抵抗の温度依存性を測定した結果、いくつかの試料で 3 次元弱反局在/弱局在モデルとよく一致する振舞いが観測された。本発表では、3 次元弱反局在/弱局在の振舞いを解析した結果を報告する。

[1] Y. Hattori, Y. Tokumoto, and K. Edagawa, Phys. Rev. Mater. **1**, 074201 (2017).

[2] Y. Hattori, Y. Tokumoto, K. Kimoto, and K. Edagawa, Sci. Rep. **10**, 7957 (2020).

IgE とその受容体の結合阻害剤の探索に向けた FRET 法の確立

農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 食品生物構造学研究室

氏名 大小田 直史

花粉や食物などのアレルゲンが体内に侵入すると、免疫グロブリンの一種である IgE 抗体によって認識され、その受容体 (FcεRIα) を介したシグナル伝達により、アレルギー症状が誘発される。そのシグナル伝達の第一段階目の反応である IgE と FcεRIα の結合を阻害することは、アレルギー症状緩和へとつながる。そこで、本研究では IgE と FcεRIα の結合を阻害する分子の探索に向けて、これらの因子間相互作用を検出する FRET (Fluorescence Resonance Energy Transfer) 法の確立を目指した。FRET とは、二つの蛍光分子が近傍に存在する場合に、励起された片方の蛍光分子 (ドナー) からもう片方の蛍光分子 (アクセプター) にエネルギーが受け渡され、ドナーの蛍光が減少する代わりにアクセプターの蛍光が増加する現象である (図1)。緑色蛍光タンパク質 (mNG)、赤色蛍光タンパク質 (mSI)、mNG を付加した FcεRIα、mSI を付加した IgE をそれぞれ大腸菌で発現させて精製し、これらを各々組み合わせることで蛍光測定を行ったところ、mNG-FcεRIα と mSI-IgE を混合した試料では、mNG と mSI を混合した試料と比較して、アクセプターである mSI の蛍光の有意な増加が確認された。この結果から、IgE と FcεRIα の相互作用を検出可能な FRET 法が確立できたと考えられる。今後は、この検出法を用いて食品由来の低分子・中分子化合物から阻害剤の候補を探索していく予定である。

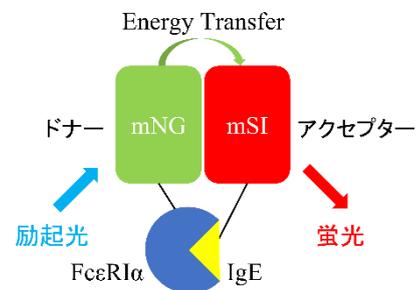


図 1 FRET の概念図

Design of Multifunctional Fe^{II}-NCE-Hg^{II} Frameworks

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, School of Science

Guanping LI, Olaf Stefanczyk, Kunal Kumar, Shin-ichi Ohkoshi

Research on coordination polymers exhibiting the spin-crossover (SCO) phenomenon is one of the fastest-growing fields in coordination chemistry due to their perspective application [1]. In this context, the goal of my work is to develop two- and three-dimensional hybrid inorganic-organic SCO networks.

Consequently, {[Fe(MeOH)₂][Fe(μ -pz)₂][Hg(μ -ECN)₃(ECN)₂]} · 2H₂O (E = S, **FeHgS**, and E = Se, **FeHgSe**) have been designed and studied using X-ray

crystallography, temperature-dependent electronic and vibrational spectroscopy, including the rarely performed Raman scattering spectroscopy, and magnetic measurements. Single-crystal X-ray diffraction (SXRD) analysis reveals that **FeHgS** crystallizes in the triclinic *P*-1 space group and a few percent reductions of the unit cell parameters between 90 K and 300 K. The isostructural nature of **FeHgS** and **FeHgSe** was confirmed by X-ray powder diffraction (PXRD) analysis. **FeHgS** and **FeHgSe** reveal incomplete spin-crossover with the same $T_{1/2} \approx 190$ K. In addition, the measurements were supplemented with extensive theoretical analysis, allowing for a detailed description of spectroscopic properties.

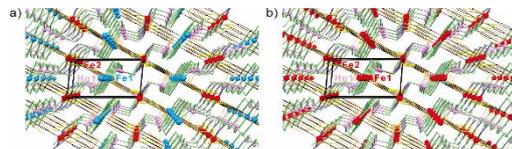


Figure 1. Packings along the crystallographic *b*-axis (**a** and **b**) measured at 90 K and 300 K

[1] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, H. Tokoro, *Nature Photonics* **2014**, *8*, 65.

衝突現象に伴う残留磁化の基礎的性質に関する研究 Basic properties of shock remanent magnetization

理学系研究科・地球惑星科学専攻

佐藤雅彦

Shock remanent magnetization (SRM) is acquired as a result of the shock wave propagation in a magnetic field. Knowledge of a three-dimensional distribution of the SRM intensity is crucial for interpreting the spatial change in magnetic anomalies observed over the crater and reconstructing the paleo-planetary field based on the anomaly data. However, the intensity distribution is an unexplained phenomena concerning SRM properties owing to the lack of subsample magnetization measurements for the experimental SRM-imparted samples. To investigate the SRM intensity and stability structures using a magnetically well-characterized basalt sample bearing fine-grained single-domain titanomagnetite, we conducted the newly designed SRM acquisition experiments and remanence measurements for cube-shaped subsamples cut from the SRM-imparted samples. The pressure and temperature changes during the shock wave propagation were estimated from the impact simulations. The SRM structures show the systematic changes in the different experimental settings such as projectile condition and applied field intensity. The pressure, temperature, and applied field dependence of shock remanence properties will be evaluated based on the experimental results.

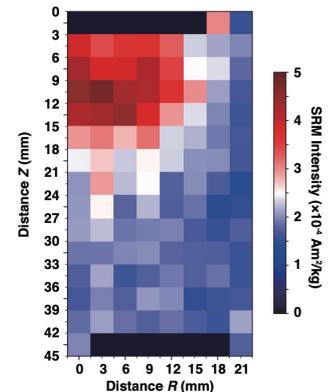


Fig.1. Two-dimensional maps for the shock remanence intensity.

擬二次元ハイゼンベルグ反強磁性体 YbCl_3 の磁場下ボーズアインシュタイン凝縮

Bose-Einstein condensation under magnetic fields in quasi-two-dimensional antiferromagnet YbCl_3

理学系研究科 物理学専攻 高木・北川研究室

今田絵理阿、松本洋介、Simon Schnierer、Jan Bruin、北川健太郎、高木英典

ボーズアインシュタイン凝縮(BEC)は磁性体で傾角反強磁性に対応し、外部磁場によってボゾンの数の制御することが可能である。これまで磁性体における BEC 研究は三次元物質が中心であったが、擬二次元物質では二次元 BEC、すなわち二次元のトポロジカル相転移である Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT)転移を現実の物質で観測できる可能性があり興味深い。擬スピン $1/2$ のハイゼンベルグ反強磁性体である YbCl_3 は面間相互作用が面内相互作用に比べてかなり弱いことがわかっており[1]、二次元 BEC 研究の良い舞台といえる。本研究では YbCl_3 の量子臨界点(QCP)付近のゆらぎと秩序の次元性に関して a 軸方向磁場下の NMR 測定を用いて調べた。

静的な磁気構造を捉える NMR スペクトルは転移温度以下で分裂しており(図 1)、三次元秩序であることが確認された。転移温度以下でのスペクトルの分裂幅から見積もられる内部磁場の臨界指数は、低次元ゆらぎを示唆している。本発表では量子臨界ゆらぎも含めた QCP 付近の詳しい次元性に関して議論する。

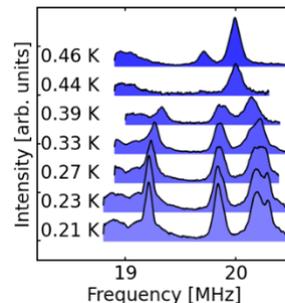


図 1: NMR スペクトルの分裂。

原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$ を含む ヘテロ構造における Sb/Bi 組成比による強磁性特性の変調

Sb/Bi content dependence of ferromagnetic properties in the heterostructure including the atomic-layer self-assembled ferromagnetic topological insulator $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$

理学系研究科 物理学専攻 長谷川研究室 高城拓也、秋山了太、長谷川修司

原子層自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体(FMTI) MnBi_2Te_4 は、磁性元素 Mn が規則的に配列した結晶構造を有し、量子異常ホール効果(QAHE)といった新奇量子物性の観測温度の向上が期待される。一方、この強磁性(FM)の発現機構は未解明な点が多く、特にトポロジカル絶縁体(TI)とのヘテロ構造 $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ではキュリー温度(T_C)が理論値(12 K)よりもはるかに低いと報告されている[1]。本研究ではBiをSbで置換することで E_F 調整が可能なヘテロ構造 $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ を作製し、その異常ホール効果等の観測によってFM機構解明の手がかりを探索した。Bi/Sb 組成比(x)を適切に調整すると($x \sim 0.75$)、 E_F がトポロジカル表面状態に位置するため磁性に対する表面電子の寄与が大きくなるが[2]、図1に示す T_C の x 依存性によると、 T_C は表面寄与の大小に依らず Sb を添加するに従って単調に上昇した。この振る舞いは表面状態を介した RKKY 相互作用のみでは説明できず、Sb 置換によって格子歪みが起こり、それが FM 相互作用に影響していることを示唆している。[1] T. Fukasawa *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 205405 (2021). [2] T. Takashiro *et al.*, Nano Lett. **22**, 881-887 (2022).

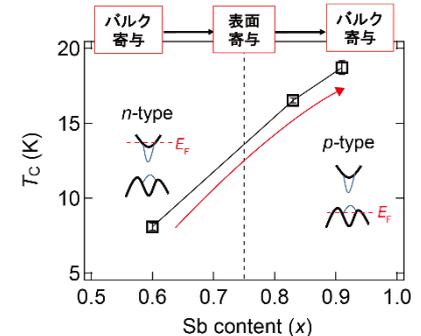


図1 T_C と Bi/Sb 組成比(x)の関係

2次元物質 $3R\text{-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$ の高強度テラヘルツ光励起による電荷密度波相融解ダイナミクス

Melting dynamics of charge density wave in two-dimensional $3R\text{-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$ induced by intense terahertz pulses

¹理学系研究科 物理学専攻 島野研究室、²工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室、
³理研 CEMS、⁴低温科学研究センター 研究開発部門

鳴坂潮¹, 吉川尚孝¹, 松岡秀樹², 田中勇貴², 武藏摩紀², 中野匡規^{2,3}, 岩佐義宏^{2,3}, 島野亮^{1,4}

近年、電荷密度波(CDW)相を光励起すると、平衡状態では出現しない隠れた秩序相への相転移が生じることが明らかとなり、活発な研究が進められている[1]。最近我々は、エピタキシャル成長した遷移金属ダイカルコゲナイド物質 $3R\text{-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$ 薄膜の CDW 振幅モードをテラヘルツ (THz) 光を用いて 2 光子共鳴励起することによって、絶縁体的な状態が発現することを示した[2]。そこで本研究では、絶縁体的な状態が発現する際に平衡状態の CDW 相が動的に抑制されていく過程を調べることを目的として、高強度 THz 波励起による非平衡状態のダイナミクスを調べた。その結果、弱励起では駆動力が過ぎ去った後も CDW 振幅モードの共鳴周波数と一致する 2.3 THz の自由振動が観測された一方で、励起強度を上げるに従って自由振動のソフトニングやダンピングの増加が顕著になっていき、最終的には振幅モードが消失する振る舞いが観測された。これは THz 波を用いて直接的に振幅モードを大振幅駆動することによって、平衡状態の CDW 相を抑制、融解したことを反映していると考えられる。また本講演では、Ginzburg-Landau(GL)モデルに基づき、実験結果を秩序変数の時間発展のシミュレーションで再現し、そこから理解できる平衡 CDW 相の抑制に関するより詳細なメカニズムについても議論する。

[1] 例えば A. Kogar et al., *Nat. Phys.* **16**, 159-163 (2020).

[2] N. Yoshikawa et al., *Nat. Phys.* **17**, 909-914 (2021).

超伝導体 3R-TaSe₂ のテラヘルツ第二高調波発生Terahertz second-harmonic generation in superconductor 3R-TaSe₂理学系研究科・物理学専攻・島野研究室^A, 低温科学研究センター・研究開発部門^B,工学系研究科・物理工学専攻・岩佐研究室^C, 理研 CEMS^D西澤邦雄^A, 中村祥子^B, 松岡秀樹^C, 武藏摩紀^C, 中野匡規^{C,D}, 岩佐義宏^{C,D}, 島野亮^{A,B}

非中心対称超伝導体ではスピン・シングレットとトリプレットの混合した超伝導秩序変数が許容される。実際に遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)系の超伝導体 MoS₂ では空間反転対称性の破れに由来する非相反電気伝導が観測されており [1]、空間反転対称性の破れた超伝導秩序変数の可能性が示唆されている。この超伝導秩序変数の空間反転対称性の破れは超伝導ギャップに相当するテラヘルツ (THz) 周波数領域の第二高調波発生(SHG)をもたらすことが理論的に示されており [2]、電気伝導測定が困難なゼロ抵抗領域について知見を得ることが期待される。本研究では結晶構造の空間反転対称性が破れた TMD 超伝導体である 3R-TaSe₂ に着目し [3]、エピタキシャル成長させた厚さ 41 nm (Se-Ta-Se 層数 65) の薄膜(超伝導転移温度 $T_c=2.6$ K) に狭帯域 THz 波パルスを照射してその THz-SHG を観測した。その結果、図 1 に示すように T_c 以下の温度で SHG が観測されたが、偏光依存性が等方的であり面内結晶方位に依存しないことが分かった。本発表ではこの結晶方位に依存しない SHG について考察する。

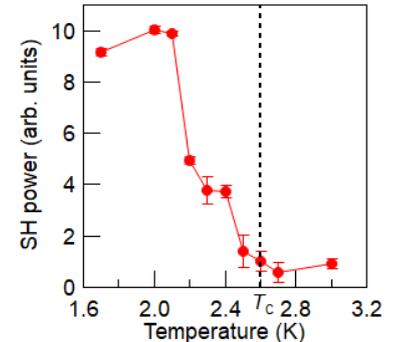


図 1: 3R-TaSe₂ 薄膜に中心周波数 0.3 THz の狭帯域 THz 波パルスを照射したときの SHG 強度の温度依存性。

[1] R. Wakatsuki et al., *Sci. Adv.* **3**, e1602390 (2017).

[2] T. Xu, T. Morimoto and J. Moore, *Phys. Rev. B* **100**, 220501 (2019).

[3] Y. Tanaka et al., *Nano Lett.* **20**, 1725 (2020).

超伝導転移端センサのノイズ分析

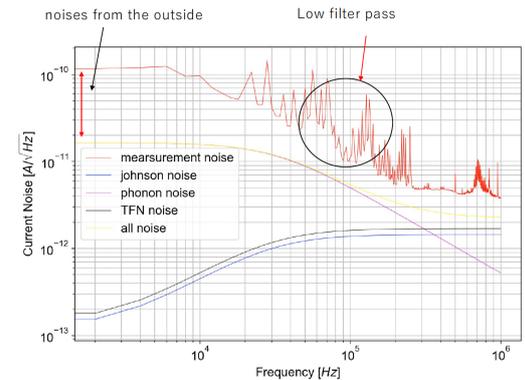
The noise analysis in superconducting transition edge sensor.

工学系研究科・原子力国際専攻・高橋研究室

氏名 上土井猛、桜剛、スミス ライアン、三津谷友貴、大野雅史、高橋浩之

量子暗号通信や光量子情報処理を実現するためには、近赤外領域において単一光子を検出し、光子数識別能力を有する検出器を開発することは必要不可欠である。

昨年、我々は優れたエネルギー分解能を有する超伝導転移端センサ(TES: Transition Edge Sensor)[1] を Au/Ir 近接二重層薄膜を用いて動作温度を低減することで単一光子検出器の能力向上を図った。結果として、850 nm において良好な光子数識別能力を保有することが実証されたが、エネルギー分解能は理論値である 0.093 eV(FWHM)から大きくかけ離れた 0.68 eV(FWHM)となった。そこで、超伝導転移端センサから得られた信号ノイズを分析することにより、その要因を追求した。[2] その結果、希釈冷凍機の外部つまり環境ノイズが非常に大きいことが判明した。



[1] Irwin et al., APL,69,1945 (1996)

[2] 入松川 知也, 博士論文, (2017), 東京大学

MnSi における準安定スキルミオン相の熱流下での崩壊過程の研究

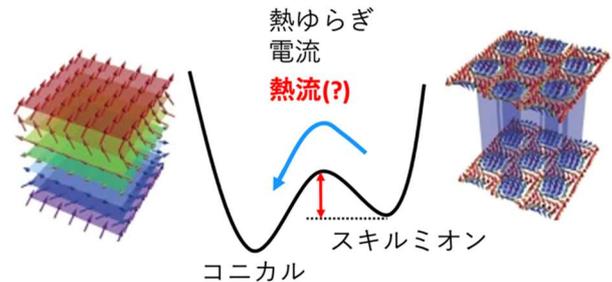
Heat-flow-induced decay of metastable skyrmion phase in a chiral magnet MnSi

東大工^A、理研 CEMS^B、東京カレッジ^C

門恭平^A、大池広志^A、吉川明子^B、田口康二郎^B、十倉好紀^{A,B,C}、賀川史敬^{A,B}

磁気スキルミオンは、非自明なトポロジーを有する渦状の磁気構造であり、多くの磁性体において磁気スキルミオンが格子状に配列した磁気秩序相として観測される。スキルミオン相は、トポジカルな性質に起因して準安定性を有するが [1]、電流の印加によってその構造は崩壊し最安定相へと緩和することが知られている [2]。

本研究では、電流とは異なる流れである熱流に対する準安定スキルミオン相の応答を調べるために、MnSi のホール抵抗率の測定を行った。結果、熱流パルスの印加によってホール抵抗率の大きさが減少すること、すなわち準安定スキルミオンが熱流によって崩壊することがわかった。また、1 回のパルス印加によって崩壊する準安定スキルミオンの割合は 500ms 以上のパルス幅に対してはパルスの幅に依らないという非自明な結果が得られた。本発表ではこれらの実験結果、及び LLG シミュレーションを用いた崩壊過程の微視的なシナリオについて議論する。



α -Sn/(In,Fe)Sb ヘテロ接合におけるトポロジカル電気伝導特性

Topological transport properties in α -Sn/(In,Fe)Sb heterostructures

工学部電気電子工学科 田中・大矢研究室

生方すばる、レ デウック アイン、堀田智貴、田中雅明

α -Sn はトポロジカル・ディラック半金属やトポロジカル絶縁体のような複数のトポロジカル相を示す唯一の単元素物質である。最近われわれは、ダイヤモンド型結晶構造をもつ α -Sn を InSb(001)基板の上にエピタキシャル成長することに成功し、面内に圧縮歪みがかかることで、 α -Sn 薄膜はトポロジカル・ディラック半金属になることを示した[1]。

本研究では、強磁性半導体(In,Fe)Sb 上に成長した α -Sn 薄膜の磁気輸送特性を調べた。強磁性半導体(In,Fe)Sb は低温で高抵抗であるが[2]、このヘテロ構造の磁気抵抗効果に明確な磁気ヒステリシスを観測した。これは、下層の(In,Fe)Sb からの磁気近接効果により α -Sn 層に磁気的なカップリングが生じたことを示すものである。面内で電流と平行に磁場をかけると、磁化した α -Sn 薄膜は磁場に対して奇関数の巨大な線形磁気抵抗効果を示した。さらに、磁場と電流の双方に対して奇関数となる非相反磁気抵抗効果も観測された。本発表ではこれらの磁気伝導特性と物理起源に関して議論する。

[1] L. D. Anh et al., *Adv. Mater.* **33**, 2104645 (2021). [2] N. T. Tu et al., *Appl. Phys. Express* **11** (6), 063005 (2018).

Growth of topological Dirac semimetal α -Sn / ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb heterostructures and observation of quantum oscillations

工学系研究科・電気系工学専攻・田中・大矢・中根研究室 M2

OTomoki Hotta, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka

Topological Dirac semimetal (TDS) has generated much attention for its robust and versatile topological nature. Recently our group has established epitaxial growth of a high-quality TDS α -Sn thin film on InSb and revealed its topological properties [1]. Our interest is now breaking the time-reversal symmetry in α -Sn by inducing ferromagnetism. Our group has developed ferromagnetic semiconductor (FMS) $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$, which shows room-temperature intrinsic ferromagnetism with the zinc-blende crystal structure [2]. By growing heterostructures consisting of TDS α -Sn and FMS $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$, we can expect to induce ferromagnetism in this system. In this study, we have grown TDS α -Sn / FMS $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ heterostructures by molecular beam epitaxy (MBE). Figure 1 shows a scanning transmission electron microscopy (STEM) lattice image, indicating that α -Sn with diamond-type crystal structure is epitaxially grown on $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$. Magnetic circular dichroism (MCD) hysteresis indicates the presence of room-temperature intrinsic ferromagnetism in the $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ layer. The derivative of Hall resistance about the magnetic field (dR_{xy}/dB) up to 14 T clearly shows Shubnikov-de Haas oscillation and we get non-zero Berry phase by the Fan plot analysis of the conductivity, indicating that the α -Sn layer is topologically non-trivial. These results indicate successful growth of the TDS α -Sn / FMS $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ heterostructure.

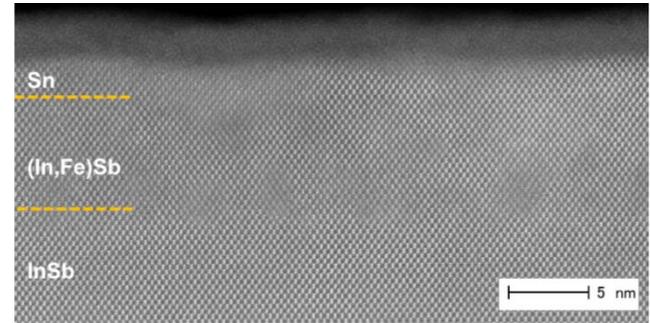


Fig 1 STEM lattice image of α -Sn/ $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ heterostructure studied in this work.

Figure 1 shows a scanning transmission electron microscopy (STEM) lattice image, indicating that α -Sn with diamond-type crystal structure is epitaxially grown on $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$. Magnetic circular dichroism (MCD) hysteresis indicates the presence of room-temperature intrinsic ferromagnetism in the $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ layer. The derivative of Hall resistance about the magnetic field (dR_{xy}/dB) up to 14 T clearly shows Shubnikov-de Haas oscillation and we get non-zero Berry phase by the Fan plot analysis of the conductivity, indicating that the α -Sn layer is topologically non-trivial. These results indicate successful growth of the TDS α -Sn / FMS $(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Sb}$ heterostructure.

エレクトロマグノンシフト電流の観測

Observation of electromagnon shift current

工学系研究科物理工学科高橋研究室

荻野槿子、岡村嘉大、金子良夫、十倉好紀、高橋陽太郎

シフト電流とは空間反転対称性の破れた物質における光励起による電子波動関数の移動に由来したバルク光起電力効果の一種であり、太陽電池や超高速光スイッチの新原理として注目を集めている。一般的にシフト電流を含めた光起電力効果は、バンド間遷移を介した電子励起に由来して生じる。一方、電場活性な磁気励起であるエレクトロマグノンを共鳴励起することにより、シフト電流メカニズムを介した光起電力が生じることが予想されている[1,2]。エレクトロマグノンはテラヘルツ帯に位置し、同機構によりバンドギャップよりはるかに小さな光子エネルギーで光起電力効果が可能となる。エレクトロマグノンは磁性由来強誘電性を持つマルチフェロイクス固有の素励起である。我々はマルチフェロイクスでありエレクトロマグノンを持つマンガン酸化物 $\text{Eu}_{0.55}\text{Y}_{0.45}\text{MnO}_3$ において、テラヘルツ光電流の測定を行った。テラヘルツパルスを試料に照射し、パルス光と同期した光電流をオシロスコープで測定した。その結果、強誘電相のみにおいて、バルク光起電力効果による光電流が観測された(図 1)。

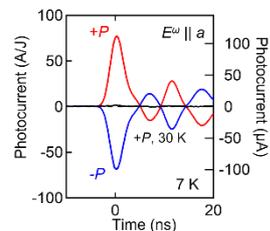


図 1 $\text{Eu}_{0.55}\text{Y}_{0.45}\text{MnO}_3$ における
テラヘルツパルス誘起光電流。

[1] T. Morimoto and N. Nagaosa, Phys. Rev. B. **100**, 235138 (2019).

[2] T. Morimoto, S. Kitamura, and S. Okumura, Phys. Rev. B. **104**, 075139 (2021).

中性-イオン性転移物質 TTF-CA における圧力下ゼーベック効果

Seebeck effect under pressure in the neutral-ionic transition material TTF-CA

工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室

馬場智大、須波圭史、竹原陵介、若松浩大、宮川和也、鈴木博貴、宮本辰也、岡本博、鹿野田一司

本研究の対象物質である TTF-CA は、ドナー分子である TTF とアクセプター分子である CA が交互に積層して構成される有機電荷移動型錯体であり、中性-イオン性(NI)転移を示す典型物質として知られている。この物質においては、NI ドメインウォール(NIDW)やソリトンといったトポロジカル励起と呼ばれる特殊な運動体が伝導性や磁性に寄与していることが実験的に示されてきた[1,2]。個々の電子ではなく特異な励起が電荷輸送を担う TTF-CA では、これまでにない新奇な熱電変換機構の発現が期待される。

そこで、我々は、広い温度・圧力範囲において TTF-CA のゼーベック係数を測定した(右図)。その結果、NIDW やソリトンが活発に励起される領域において、単純な半導体描像では説明できない特異な熱電効果が生じている可能性が示唆された。

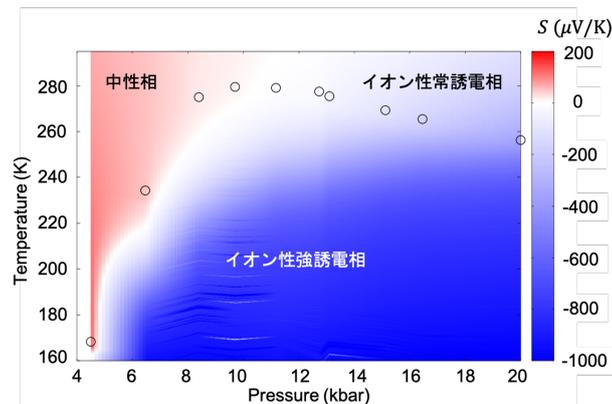


図: TTF-CA のゼーベック係数の温度・圧力依存性

[1] K. Sunami, *et al.*, *Sci. Adv.* **4**, eaau7725 (2018).

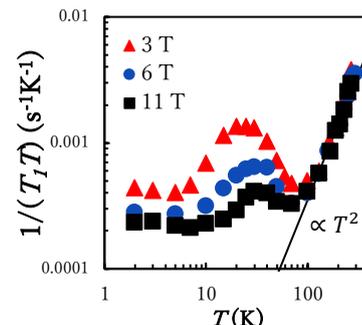
[2] R. Takehara, *et al.*, *Sci. Adv.* **5**, eaax8720 (2019).

Dirac nodal line 物質 $[\text{Ni}(\text{dmdt})_2]$ の ^{13}C NMR 研究 ^{13}C NMR study on Dirac nodal line material $[\text{Ni}(\text{dmdt})_2]$

工学系研究科 物理工学専攻 M1 鹿野田研究室

畠村 匠

Massless Dirac Fermions(MDF)系は電気・熱伝導度が非常に高いことから注目を集めている。MDF系である単一分子性有機導体 $[\text{Ni}(\text{dmdt})_2]$ では、Dirac 点が3次元ブリュアンゾーン内で線状に分布する Dirac nodal line が実現することが第一原理計算によって示されており[1]、従来の2次元MDF系には見られない性質が現れることが期待されている。しかし、磁化率や抵抗率といった巨視的なふるまいは、従来の2次元MDF的であることが報告されている[1]。そこで、本研究ではDirac nodal lineの物性を微視的に探索することを目的に、 $[\text{Ni}(\text{dmdt})_2]$ の ^{13}C 置換体多結晶試料を用いて ^{13}C NMR実験を行った。外部磁場の大きさを3 T、6 T、11 T

図1: $1/(T_1T)$ の温度依存性

として測定した核スピン-格子緩和率を温度で割った $1/(T_1T)$ の温度依存性を図1に示す。100 K以上では2次元MDF的なふるまい ($1/(T_1T) \propto T^2$)が観測されたが、30 K付近では $1/(T_1T)$ が低磁場ほど大きい極大構造を示した。この現象は2次元MDF系では観測されておらず、Dirac nodal lineに固有の特異現象であることが推測される。

[1] A. Kobayashi *et al.*, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **94**, 2540-2562 (2021)

ファイリング制御パイロクロア($\text{Tb}_{1-x}\text{Ca}_x$) $_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ における異方的幾何学的ホール効果

Field-anisotropic geometrical Hall effect via Kondo f - d coupling in doped pyrochlore molybdates

工学系研究科・物理工学専攻・十倉研究室

福田光、上田健太郎、金子良夫、軽部皓介、栗原綾佑、三宅厚志、徳永将史、田口康二郎、十倉好紀

近年、磁性と伝導電子の結合が創発するトポジカル量子物性に関心が集まっている。特に、伝導電子が非共面的な局在スピンと結合すると、隣接スピンの囲む立体角に比例した巨大な実効的磁場が働き、磁場や磁化に比例しない非従来のホール効果(幾何学的ホール効果)などの新規物性を発現する[1]。とりわけ、伝導電子系が RKKY 相互作用などにより磁性秩序を発現しない弱結合系での幾何学的ホール効果は、結晶試料の合成が困難なため研究がなされていない。

本研究では、レーザー光源を用いたフローティングゾーン装置を用いることでパイロクロア型 ($\text{Tb}_{1-x}\text{Ca}_x$) $_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ の作成に初めて成功した。ファイリング制御によって絶縁体から金属への相転移を観測した。Mott 転移後の $x=0.14$ の結晶では、ホール抵抗率に異方性が確認された。これは、磁気構造に由来した幾何学的ホール効果が発現していると考えられる。更に、強磁場実験により、異方的成分を抽出することができた(図 1)。これは、それぞれの磁気構造におけるスピカイラリティの符号とよく一致する。本発表では、($\text{Tb}_{1-x}\text{Ca}_x$) $_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ で実現した弱結合系における幾何学的ホール効果を詳細に議論する。

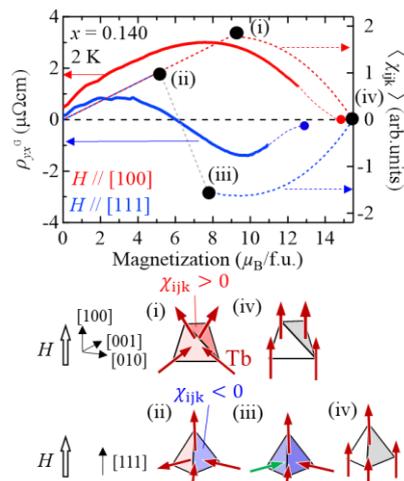


図 1. 異方的な幾何学的ホール効果と対応する磁気構造

空間反転対称性が破れた 3R-TaSe₂ 薄膜の超伝導輸送特性

Superconducting transport properties of non-centrosymmetric 3R-TaSe₂

工学系研究科・物理工学専攻・中野研究室

武藏摩紀、田中勇貴、松岡秀樹、岩佐義宏、中野匡規

グラフェンの発見以来、二次元層状物質が示す特異な物性が注目を集めている。層状物質の一つである遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は、金属元素とカルコゲンの組み合わせに依存して多様な物性を示す。中でも V 族の金属元素を有する NbSe₂ や TaS₂ の超薄膜は、スピン軌道相互作用により面直方向にスピンのロックした特異な超伝導状態(イジング超伝導)を示すことが知られている。一方、TMD は構造多型と呼ばれる局所構造の違いに応じて物性が大きく変わることが知られている。我々は最近、分子線エピタキシー法で作製した TaSe₂ が準安定の 3R 構造を取り、これが最安定の 2H-TaSe₂ とは異なる物性を示すことを発見した[1]。この 3R 構造はバルクにおいても面直・面内両方向の空間反転対称性が破れた結晶構造を有しており(Fig. 1)、特異な輸送現象の発現が期待される。本研究では特に超伝導状態に注目し、対称性の破れに起因した非相反伝導現象(Fig. 2)の観測を目指した。

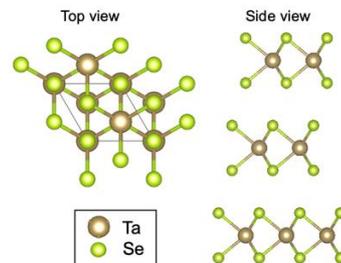


Fig.1: 3R-TaSe₂ の結晶構造

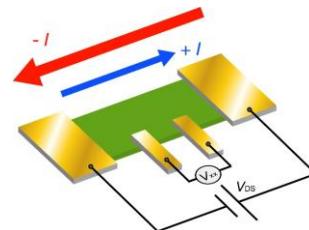


Fig.2: 非相反伝導現象の模式図

[1] Y. Tanaka *et al.*, Nano. Lett. **20**, 1725-1730 (2020).

四極子近藤格子系 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ における磁場中輸送特性

Transport properties under magnetic field in quadrupolar Kondo lattice system $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$

東大理^A、東大物性研^B、東大トランス量子^C、東北大金研^D、高エネルギー加速器研究機構^E

○磯前貴央^B、酒井明人^A、Mingxuan Fu^B、谷口貴紀^D、瀧川仁^E、中辻知^{A,B,C}

籠状物質である $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ は、 Pr^{3+} サイトが立方晶 T_d の対称性を持つため、非磁性かつ多極子自由度 (O_{20} 型と O_{22} 型の四極子と T_{xyz} 型の八極子) のみが活性な Γ_3 二重項の結晶場基底状態を持つ。この物質は、低温での強四極子秩序や、高温領域での磁氣的近藤効果など、伝導電子と f 電子の強い混成効果が様々な実験から明らかになっている [1,2,3]。また、非クラマース二重項である Γ_3 二重項は、不純物や欠陥によって容易に縮退が解けるため、高純度単結晶が合成可能な $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ は四極子近藤格子系の物理を研究するのに最適な系である。

磁気輸送は系の伝導機構を理解するのに重要である。通常の磁氣的近藤格子系ではコヒーレンスの形成によって2つの特徴的な輸送特性を示すことが知られている[4]。1つ目は、スキュー散乱によって生じる外因的異常ホール効果である。高温領域では不純物による散乱が起き、低温ではコヒーレンスの形成によるスキュー散乱が生じる。2つ目は、負の磁気抵抗効果である。局在 f 電子由来の磁気散乱が磁場によって抑制されるため、磁場印加によって負の磁気抵抗が生じる。一方、典型的な物質が少ないため、四極子近藤格子系における輸送特性の理解は不十分である。本研究では $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ のホール効果と横磁気抵抗測定を行い、磁氣的近藤格子系と四極子近藤格子系における輸送特性の相違について議論する。[1] A. Sakai and S. Nakatsuji, JPSJ. 80, 063701 (2011).[2]

A. Sakai et al., JPSJ. 81, 083702 (2012). [3] T. Taniguchi et al., JPSJ. 85, 113703 (2016).[4] A. Fert and P. M. Levy, PRB 36, 1907 (1987).

ラクトフェリンによる虫歯菌の歯面付着阻害の分子機構解析

Molecular mechanism analysis for the inhibition of tooth surface adhesion of *Streptococcus mutans* by lactoferrin

東京大学 大学院農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 食品生物構造学研究室

CHANGYU ZHANG

Salivary agglutinin (SAG) is a human salivary protein implicated in the oral clearance of microorganisms because of its bacteria-agglutinating properties. It contains 14 highly conserved scavenger receptor cysteine-rich domains (SRCRDs). *Streptococcus mutans* PAc (the cell surface protein antigen c) mediates the binding of this cariogenic bacteria to tooth surfaces via binding to the SRCRDs of SAG and induces dental caries [1]. Another protein, lactoferrin, as well as a lactoferrin-derived peptide (residues 480 to 492) can inhibit the saliva-induced aggregation of *S. mutans* by inhibiting the interaction of SAG and PAc [2]. The purpose of this study is to visualize the SAG-PAc interaction and its disruption by lactoferrin. As a part of this study, I am going to present the crystal structure analysis of an SRCRD in SAG and the interaction analysis of the SRCRD with PAc and lactoferrin.

[1] Oho T, Bikker FJ, Nieuw Amerongen AV, Groenink J. Infect Immun. 2004 Oct;72(10):6181-4.

[2] Purushotham S, Deivanayagam C. J Biol Chem. 2014 Aug 8;289(32):21877-87.

Three-dimensional Tb-Co(CN)₆ framework exhibiting hydration-hydration switchable magnetic anisotropy and luminescent thermometric properties

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, Graduate School of Science

Yue Xin, Junhao Wang, Szymon Chorazy, Koji Nakabayashi, and Shin-ichi Ohkoshi

Lanthanide-based cyanido-bridged metal assemblies have shown great potential of promoting multifunctionality such as proton conductivity, humidity-sensitive magnetism, and photoluminescent single-molecule magnet by taking the advantages of luminescence, magnetism, and porosity.^{1,2,3} In this work, our group presents the three-dimensional cyanido-bridged bimetallic network material, Tb^{III}[Co^{III}(CN)₆] \cdot 4H₂O (**1**), with its magnetically diluted species Tb^{III}_{0.026}Y^{III}_{0.974}[Co^{III}(CN)₆] \cdot 4H₂O (**1dl**). After modification of the coordination structure driven by dehydration in **1dl**, significantly enhanced magnetic anisotropy leads to a zero-field SMM behavior of the dehydrated phase. Strong characteristic Tb^{III}-centered emission is observed in both hydrated and dehydrated phases, which can be developed for promising thermometric performance based on its combination with Co^{III}-centered emission. In addition, the functioning temperature of SMM matches well with the optimal working temperature range of the luminescence thermometry.

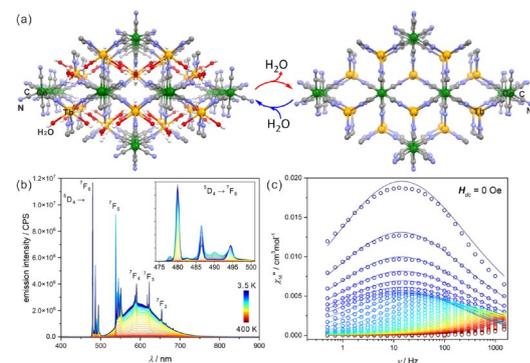


Figure. Crystal structures of **1** and its dehydrated phase (a); T-dependence of photoluminescent emission spectra of **1dl** after dehydration (b); Slow magnetic relaxation at 0 Oe dc field of **1dl** after dehydration (c).

- [1] T. Hiroko, and S. Ohkoshi, *Dalton Trans.*, 2011, 40, 6825-6833.
 [2] Y. Xin, and S. Ohkoshi et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, 141, 18211-18220.
 [3] J. Wang, and S. Ohkoshi et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 2020, 142, 3970-3979.

高磁場・サブケルビン・超高真空 4 探針電気伝導・トンネル分光同時測定装置の開発 Development of a simultaneous measurement system of four-point-probe electrical transport and tunneling spectroscopy under high magnetic field and down to sub-Kelvin temperature in ultrahigh vacuum

理学系研究科物理学専攻長谷川研究室

佐藤 瞬亮・保原 麗・秋山 了太・渡邊 和己・長谷川 修司

物質表面や薄膜の超伝導を調べるとき、電気伝導とトンネル分光を超高真空中で同タイミング・同一試料で測定できると、より本質的な物理現象の理解につながる。本研究ではそれを可能にする装置を開発した。ベース装置は *in situ* 4 端子電気伝導測定装置であり、それにトンネル分光測定機構を設計・追加した。動作検証は STM 探針で鉛薄膜試料の超伝導ギャップを観測して行った。結果、3.2 K において約 0.5 meV の分解能を実現できた。一般にトンネル分光の測定

時はトンネル電流のリターンパスのために高導電性基板を用いる必要があるが、それは同時に表面・薄膜の電気伝導測定が困難になることを意味する。そこで本研究では 4 端子プローブをトンネル分光測定にも使うことでこれを解決した。具体的には、トンネル接合を作る針とは別の針を直接試料に接触させて電気的な導通を確保することで、絶縁性の高い基板上的試料測定を可能にした(図1)。なお、4 端子プローブでのトンネル分光測定は ± 0.3 meV 程度のエネルギー範囲で問題なく行えることが確かめられた。これは超伝導ギャップを測定するに十分な大きさである。

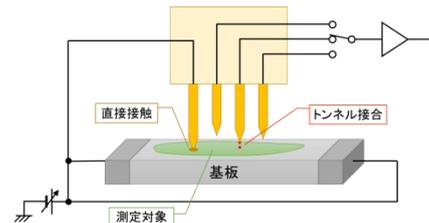


図 1: 4 端子プローブを用いたトンネル分光測定の様式図。

強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の常磁性相での円偏光照射によるテラヘルツ異常ホール効果の発現

Circularly-polarized-light-induced terahertz anomalous Hall effect in paramagnetic state of magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$

理学系研究科・物理学専攻・島野研究室

小川和馬、吉川尚孝、平井誉主在、藤原宏平、池田絢哉、塚崎敦、奥村駿、岡隆史、島野亮

トポロジカル物質の物性の制御は広く研究されている。中でも、物質の周期駆動による電子状態の動的制御法としてフロッケエンジニアリングが注目を集めており、トポロジーを超高速に変化させられることが実験的にも報告されている[1]。近年、円偏光照射下の3次元ディラック半金属では、ディラック点が時間反転対称性の破れによって2つのワイル点に分裂し、フロッケワイル半金属が形成されることが理論的に提唱され[2,3]、我々はその実証に臨んだ。強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜を対象に、室温でのディラック半金属相に中赤外円偏光を照射し、テラヘルツファラデー回転分光法を用いることによって、フロッケワイル半金属の形成を調べた。その結果、円偏光パルスの包絡線に追従した即時的な異常ホール効果を観測した。実験結果は、理論的にフロッケワイル半金属で期待される異常ホール伝導度の大きさの励起光強度依存性や波長依存性との比較から、フロッケワイル半金属の形成を示唆する結果であると考えられる。

[1] McIver, J. W. *et al.*, *Nat. Phys.* **16**, 38–41 (2020).

[2] Wang, R., Wang, B., Shen, R., Sheng, L. & Xing, D. Y., *EPL* **105**, 17004 (2014).

[3] Ebihara, S., Fukushima, K. & Oka, T., *Phys. Rev. B* **93**, 155107 (2016).

FeSe_{0.9}Te_{0.1} の超伝導相におけるテラヘルツ第3高調波発生

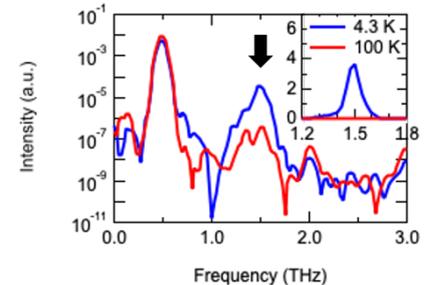
Terahertz third-harmonic generation in superconducting phase of FeSe_{0.9}Te_{0.1}

理学系研究科 物理学専攻 島野研究室^A, 総合文化研究科 広域科学専攻 前田研究室^B,

低温科学研究センター 研究開発部門^C

松本陽行^A, 吉川尚孝^A, 小林友輝^B, 色摩直樹^B, 小川浩生^B, 鍋島冬樹^B,
前田京剛^B, 島野亮^{A,C}

超伝導秩序変数の揺らぎに対応する集団励起モードはテラヘルツ周波数帯の非線形光学応答として観測できることが報告されているが[1], 集団励起モードが超伝導秩序変数の対称性を反映することから, 対応する非線形光学応答の性質を調べることによってペアリング相互作用の対称性に関する知見が得られることが理論的に指摘されている。[2,3]本研究ではペアリング相互作用について議論が続いている鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x[4]について, 薄膜試料を対象に高強度テラヘルツパルスを用いたテラヘルツ分光を行った。その結果, 入射パルスの偏光に依存したテラヘルツ第三高調波発生(THz-THG)を観測した。発表では観測された THz-THG の偏光依存性から超伝導ペアリング対称性について議論を行う。



図：中心周波数 0.5 THz の入射波に対する FeSe_{0.9}Te_{0.1} の透過波のスペクトル。矢印は THz-THG に対応するピークを示す。

- [1] R. Shimano and N. Tsuji, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11**, 103 (2020).
- [2] L. Schwarz and D. Manske, *Phys. Rev. B* **101**, 164519 (2020).
- [3] M. A. Müller and I. M. Eremin, *Phys. Rev. B* **104**, 144508 (2021).
- [4] T. Shibauchi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn. B* **89**, 102002 (2020).

p 型強磁性半導体 (Ga,Fe)Sb における強磁性発現機構の解明

Elucidation of the mechanism of ferromagnetism in p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb

東大工^A, 東大理^B, 東大 CSRN^C, Swiss Light Source^D, 東大工 QPEC^E, JAEA/SPring-8^F

武田 崇仁^A, 鈴木 雅弘^B L. D. Anh^{A,C}, 野中 洋亮^B, T. Schmitt^D, 吉田 訓^E, 坂野 昌人^E,
石坂 香子^E, 竹田 幸治^F, 藤森 伸一^F, 関 宗俊^{A,C}, 田畑 仁^{A,C}, 藤森 淳^B, 田中 雅明^{A,C},
V. N. Strocov^D, 小林 正起^{A,C}

強磁性半導体 (FMS) は磁性不純物をドーピングすることで強磁性を発現する半導体のことである。その強磁性はキャリア誘起強磁性と呼ばれ、スピントロニクスにおける材料として注目を集めている。20年以上にわたって室温以上の Curie 温度をもった III-V 族 FMS は実現していなかったが、近年、史上初の室温 p 型 FMS (Ga,Fe)Sb が作製された[1]。

(Ga,Fe)Sb における強磁性発現機構を調べるために、我々は軟 X 線角度分解光電子分光 (SX-ARPES) を用いて、(Ga_{0.95},Fe_{0.05})Sb 薄膜試料におけるバンド構造を調べた。Fe L_3 端での共鳴 ARPES により Fermi 準位 (E_F) は Fe 3d 由来の不純物バンド (IB) を切っていることがわかった。従って、二重交換相互作用によって強磁性が発現することが明らかとなった[2]。

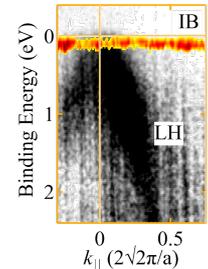


図 1. (Ga,Fe)Sb の ARPES 像

[1] N. T. Tu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 132402 (2014).

[2] T. Takeda *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 155142 (2020).

Ge ベースオールエピタキシャル単結晶横型短チャネルスピバルブ素子における大きな磁気抵抗効果の観測

Enhanced magnetoresistance in a Ge-based all-epitaxial single-crystalline spin-valve device with a short channel

工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢・中根研究室
鶴岡駿、但野由梨子、Le Duc Anh、田中雅明、大矢忍

スピントロニクスにおける次世代の実用デバイスの一つとしてスピン MOSFET [1–3]が挙げられる。スピン MOSFET の実用化に向けて高い磁気抵抗比(MR 比)が必要とされるが、横型素子での MR 比は最大でも 1 %を超える程度 [4]であり、実用化のために更なる MR 比の向上が望まれる。本研究では、スピン MOSFET の実現に向けて、Ge 基板上に作製したオールエピタキシャル横型スピンバルブ素子において短チャネル構造を作製することにより磁気抵抗比(MR 比)を向上させることを目的として研究を行った。Co/Fe/MgO/Ge:B/Ge(001) 基板からなるオールエピタキシャルヘテロ構造に対してチャネル長 68 nm のスピバルブ素子構造を作製した。3 K において、面内方向に外部磁場を印加した際の抵抗の変化を測定した。バイアス電圧 $V_{DS} = 50$ mV で Fig.1(b)のような明確な MR カーブが確認でき、 $V_{DS} = 2$ mV まで下げることで最大 0.55 %の MR 比が得られた。これは拡散伝導を仮定した理論 [5]から予測される値のおよそ 1000 倍の値となっており、チャネル長を 68 nm にまで微細化することにより、MR 比を大幅に向上させることができることが明らかになった。研究の一部は、科学研究費、科学技術振興機構 CREST 及びスピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点の支援により行われた。

-
- [1] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **84**, 2307 (2004).
 - [2] S. Sato, M. Tanaka, and R. Nakane, Phys. Rev. B **102**, 035305 (2020).
 - [3] M. Yamada *et al.*, NPG Asia Mater. **12**, 47 (2020).
 - [4] H. Koike *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 083002 (2020).
 - [5] A. Fert and H. Jaffrès, Phys. Rev. B **64**, 184420 (2001).

Electron spin polarization in a n^+ -Si channel: Analysis with the band diagram in ferromagnetic Fe/Mg/amorphous-MgO/SiO_x/ n^+ -Si(001) tunnel junctions

Tanaka-Ohya-Nakane Lab., Dept. of Electrical Eng. and Information Systems

Baisen Yu, Shoichi Sato, Masaaki Tanaka, and Ryosho Nakane

Si-based spin transport devices have attracted great interest since their spin-functional characteristics are promising for next-generation electronics with low-power consumption [1]. For practical applications, it is indispensable to achieve a high spin-valve signal that is proportional to the product $P_{inj}P_{det}$ of the spin polarizations in the injector P_{inj} and detector P_{det} . Nevertheless, what mechanism determines P_{inj} and P_{det} still remains an open question, because all of the past models assume a spin asymmetric tunneling factor γ without evidence of spin filtering [2, 3]. The purpose of this study is to develop a unified model that can well explain the physical origins of P_{inj} and P_{det} , based on the band diagram in a Fe-based ferromagnetic tunnel junction on n^+ -Si (001).

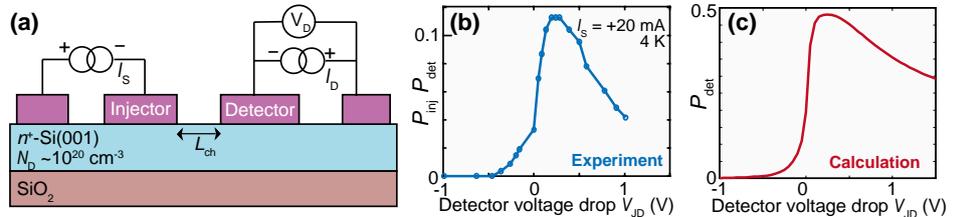


Fig. 1 (a) Schematic device structure and measurement setup at 4 K. (b) and (c) Experimentally and theoretically estimated $P_{inj}P_{det}$ plotted against the detector junction voltage drop V_{JD} .

- [1] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **84**, 2307 (2004). [2] A. Fert and H. Jaffres, Phys. Rev. B **64**, 184420 (2001). [3] R. Jansen, et al., Phys. Rev. Appl. **10**, 064050 (2018).

空間反転対称性を有する正方晶スキルミオン物質における 多彩なトポロジカル磁気相の発見

Discovery of versatile topological magnetic phases in centrosymmetric tetragonal skyrmion-hosting material

東大工^A, JST さきがけ^B, 東大物性研^C, KEK 物構研^D,
東大新領域^E, 理研 CEMS^F, 東大東京カレッジ^G

吉持遥人^A, 高木里奈^{A,B}, 周芝苑^C, 速水賢^A, Nguyen D. Khanh^F, 齋藤開^C,
佐賀山基^D, 中尾裕則^D, 有馬孝尚^{E,F}, 十倉好紀^{A,F,G}, 中島多朗^{C,F}, 関真一郎^{A,B}

スキルミオンはトポロジーに保護されたスピンの渦構造であり、超高密度・超省電力な次世代磁気メモリへの応用が期待されている。従来、スキルミオンの形成には空間反転対称性の破れた結晶構造が必須であると考えられてきたが、近年では空間反転対称性の保たれた希土類化合物において、遍歴電子が媒介する相互作用による新機構に基づくスキルミオンが報告されており[1,2]、大きな注目を集めている。

本研究では、新規正方晶スキルミオン物質 GdRu_2Ge_2 を対象として磁化・電気輸送測定及び散乱実験を行った。その結果、本物質では 2 種類の異なるスキルミオン相が発現し、さらに一連のトポロジカル磁気相転移過程が、半整数値のトポロジカル数を有するメロン/アンチメロン構造の多段階磁化反転によって説明できることを明らかにした。さらには、遍歴電子が媒介する相互作用モデルに基づく理論計算によって、本物質における磁気相を非常によく再現することに成功した。本発表では、以上の結果について詳細に議論する。

[1] T. Kurumaji *et al.*, *Science* **365**, 914 (2019).

[2] N. D. Khanh *et al.*, *Nature Nanotechnology* **15**, 224424 (2020).

カゴメ格子磁性体 TbMn_6Sn_6 における質量ディラック電子に由来した磁気光学応答

Magneto-optical responses of massive Dirac fermions derived from kagome magnet TbMn_6Sn_6

工学系研究科 物理工学専攻 高橋研究室

正力健太郎, 岡村嘉大, 藤代有絵子, 北折暁, 金澤直也, 十倉好紀, 高橋陽太郎

量子異常ホール効果の発見を契機に、ディラック電子と磁性が強く相互作用する物質系の探索が精力的に行われている[1]。最近ではカゴメ格子などの特殊な原子配列を活用するなど、様々な物質設計指針が提案されている。一方で、磁性ディラック電子系に由来した電磁気応答については異常ホール効果が研究されているのみで、その他の現象についてはほとんど確立されていない。

本研究では、2次元質量ディラック電子による異常ホール効果が観測されているカゴメ格子フェリ磁性体 TbMn_6Sn_6 において[2]、磁気光学応答の探索を行った。磁気光学応答は異常ホール効果の光学的拡張に対応し、質量ディラック電子との密接な関連が期待できる。ディラック電子の存在が示唆される中赤外から可視領域においてホール伝導度スペクトル $\sigma_{xy}(\omega)$ を測定したところ、230 meV 付近に顕著な共鳴構造が観測された。また、スペクトル形状は質量ディラック電子の理論モデル(図1)によってよく記述できた。

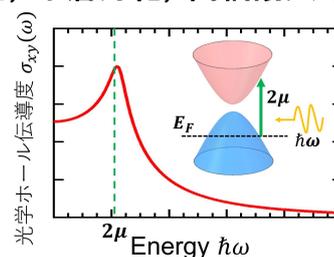


図1: 質量ディラック電子のホール伝導度スペクトル

[1] C-Z. Chang *et al.*, Science **340**, 167 (2013).

[2] J. X. Yin *et al.*, Nature **583**, 533 (2020).

有機物質におけるゼロ質量電子の特異な質量獲得の観測

Observation of anomalous mass acquisition of the massless electron in the organic material

工学系研究科 物理工学専攻 鹿野田研究室, 福島医大総合科学研究センター^A, 理研^B

関根孝彦, 岸田直也, 須波圭史, 宮川和也, 開 康一^A, 加藤礼三^B, 鹿野田一司

結晶中の電子は有効質量を持って周期的ポテンシャル上を運動するが、一部の物質中では有効質量がゼロであるようにバンドギャップが閉じた電子系が実現する。これをゼロ質量ディラック電子系という。高エネルギー物理の分野で議論されてきたゼロ質量の粒子が固体中で電荷・スピンといった種々の自由度と密接に結びつくことで、どのような物理現象が発現するのだろうか。研究の対象となる物質は様々提案されてきたが、中でも有機物質は不純物や格子欠損が少ないという特徴からゼロ質量ディラック電子系のモデル物質と考えられ、その代表が α -(BEDT-TTF)₂I₃ だった。強相関電子系としての側面を持つ α -(BEDT-TTF)₂I₃ は、低温で電子間反発によって空間反転対称性を破って自発的にバンドギャップを開ける、すなわち有効質量を獲得して絶縁化することが知られている。その Se 置換物質 α -(BETS)₂I₃ は同様の電子系であることが期待されてきたが、常圧の 50 K 以下での絶縁体状態の詳細が長らく不明であった [1]。本研究では ¹³C-NMR を利用して、低温絶縁体状態における α -(BETS)₂I₃ のスピン密度分布を微視的に調べた。その結果、絶縁体転移後も単位構造内の対称性が変わらず、 α -(BETS)₂I₃ が時間反転対称性や空間反転対称性を破らずにバンドギャップを開けていることが分かった。これは α -(BEDT-TTF)₂I₃ とはまるで異なる有効質量の獲得機構であると言える。

[1] M. Inokuchi *et al.*, Bull. Chem. Soc. Jpn., **68**, 547 (1995)

ドーピングされたスピン液体で発現する超伝導の NMR 研究

NMR study of superconductivity in doped spin liquid

工学系研究科物理工学専攻・鹿野田研究室

上野祥広, 若松浩大, 宮川和也, 谷口弘三, 鹿野田一司

κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ は ET 分子からなる伝導層と Hg_{2.89}Br₈ からなる絶縁層が交互に積層した物質である。絶縁相の Hg イオンが ET と不整合な副格子をつくるため、バンド充填率が通常の κ 型の場合(ハーフフィリング)からずれ、ホールが 11 % ドープされたモット絶縁体と見なすことができる。伝導層では分子平面を正対させた ET 分子からなるダイマーが異方的な三角格子構造をとって配列している。このダイマー間の移動積分の比は 1 に近く、スピンプラストレーションの強い系が実現していると考えられる。磁化率の挙動はスピン液体物質 κ -(ET)₂Cu₂(CN)₃ と一致し、ドーピングされたスピン液体物質であると考えられている[1]。この物質は、低温で超伝導が発現する。超伝導相は温度圧力相図上で 0.5 GPa 付近にピークを持つドーム構造を取り、この圧力を境に超伝導の性質が大きく変わることが知られている。特に 0.5 GPa より低圧側では超伝導相に平行に磁場を印加した際の H_{C2} がパウリ極限を超えていたり[2]、BEC 的な超伝導が実現している可能性があったり[3]と特異な性質が複数報告されている。

本研究では、この低圧側の超伝導に関して電子の対状態や揺らぎを調べることを目的に常圧下 ¹³C NMR 測定を行った。試料は磁化測定にてバルクで超伝導を示したものを用いた。層状構造を持つ二次元超伝導体では、磁場を超伝導層に平行に印加すると、磁束は絶縁層に選択的に入り、ジョセフソンボルテックスになる。この時、 $1/T_1$ への磁束の運動の寄与は無視でき、 H_{C2} が $H \parallel \text{layer}$ と $H \perp \text{layer}$ で大きく異なる。本研究ではこの性質を利用し、静磁場を伝導面垂直と平行の二方向にかけ、その違いから超伝導性に関する議論を行った。本発表ではこの測定で得られた結果を紹介する。

[1] H. Oike, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 756 (2017).

[2] E. Ohmichi *et al.*, Vol. **12**, No. 3, (1999).

[3] Y. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. X. **12**, 011016(2022).

高移動度磁性半導体 EuTiO_3 薄膜の La と Gd 置換による電子ドーピング効果

Physical properties of n -type EuTiO_3 thin films doped with La^{3+} ($S=0$) and Gd^{3+} ($S=7/2$)

工学系研究科物理工学専攻¹, 理研 CEMS²

高原規行¹, 高橋圭², 十倉好紀^{1,2}, 川崎雅司^{1,2}

EuTiO_3 (ETO)は $T_N \sim 5.5\text{K}$ で A サイト(Eu^{2+})の $7\mu_B$ の磁気モーメント($S=7/2$)が反強磁性転移する磁性半導体であり、 Eu^{2+} のドナー置換による電子ドーピングでキャリア密度制御と金属化が可能である。近年、有機金属ガスソース分子線エピタキシー法を用いて作製した高移動度 La ドープ ETO 薄膜において、磁化に比例しない異常ホール効果やスピン偏極電子の Shubunikov-de Haas 振動について報告されている[1,2]。ETO への電子ドーピングは多くが A サイト(Eu^{2+})の La^{3+} による化学置換によって行われているが、置換元素のイオン半径や磁気モーメント依存性を系統的に議論した例はない。特に非磁性元素の La^{3+} ドープの場合、 Eu^{2+} が作るスピンの規則格子へ導入されるスピン欠陥が物性に与える影響を評価することは重要である。そこで、 Eu^{2+} と同じ磁気モーメントを持つ Gd^{3+} ($S=7/2$)をドーピングした ETO 薄膜を作製し、La ドープ ETO 薄膜と比較することでスピン欠陥に着目した物性の議論を行うことを着想した。本発表では La ドープ ETO 薄膜と Gd ドープ ETO 薄膜それぞれの輸送特性と磁性について紹介する。

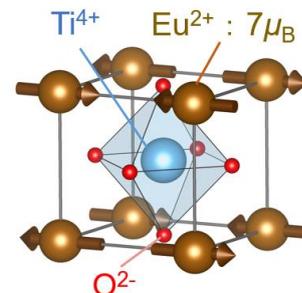


図1: EuTiO_3 の単位格子

[1] K. S. Takahashi, M. Kawasaki *et al.*, *Sci. Adv.* 4 (2018)

[2] K. Maruhashi, M. Kawasaki *et al.*, *Adv. Mater.* 32 (2020)

ワイル磁性体 Co_2MnGa 薄膜における横磁気熱電効果

Transverse thermoelectric effect in Weyl magnetic material Co_2MnGa thin film

新領域創成科学研究科・物質系専攻 中辻・酒井研究室 (理学系研究科・物理学専攻)

上杉 良太, 肥後友也, 中辻 知

異常ホール効果や異常ネルンスト効果の起源として、不純物散乱などによる外因性の効果と、ベリー曲率などによる内因性の効果が挙げられる。この内因性の効果は、異常ホール伝導度 $\sigma_{yx} = \rho_{yx}/(\rho_{xx}^2 + \rho_{yx}^2)$ についてはベリー曲率のフェルミ面までの積分 (ρ_{yx} :異常ホール抵抗率, ρ_{xx} :電気抵抗率)、横熱電伝導度 $\alpha_{yx} = \sigma_{xx}S_{yx} + \sigma_{yx}S_{xx}$ (についてはフェルミ面付近のベリー曲率によって増強されると考えられている (S_{yx} :異常ネルンスト効果, S_{xx} :ゼーベック係数) [1])。

運動量空間において大きなベリー曲率を発生させる代表的な要因として、時間反転対称性の破れた線形分散が交差する構造である、ワイルコーンが挙げられる[2,3]。特に、 Co_2MnGa においては、このワイルコーンがフェルミ面に沿うような水平なバンド分散を持つリフシツト転移状態にあることで、ベリー曲率の影響を受ける状態密度も同時に大きくなり、室温で最大の異常ネルンスト効果 $S_{yx} = -6 \mu\text{V/K}$ を発現する[4]。

本研究においては、 Co_2MnGa のエピタキシャル薄膜試料を作製し、その異常ホール効果と異常ネルンスト効果の測定を行い、内因性効果についての議論を行う。

[1] D. Xiao, *et. al.*, *Physical Review Letter*, **97**, 026603 (2006).

[2] M. Ikhlas, *et. al.*, *Nature Physics*, **13**, 1085 (2017).

[3] S. Nakatsuji, and R. Arita, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, **13**, 119 (2022).

[4] A. Sakai, *et. al.*, *Nature Physics*, **14**, 1119 (2018).

細胞毒性を有するスブチリシン由来新規ペプチドの同定

Identification of a novel subtilisin-derived peptide with cytotoxic activity

Department of Applied Biological Chemistry, Graduate School of Agriculture and Life Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

Wei Sibō, Li Li, Suzuki Michio, Lu Peng, Okuda Suguru, Ken Okamoto, Itoh Hideaki and Nagata Koji

Subtilisins are a family of serine proteases secreted by *Bacillus* family. It is reported that "natto peptide", a C-terminal peptide fragment of subtilisin NAT, the subtilisin molecule from *Bacillus subtilis* var. *natto*, can disrupt the cell membrane of *Streptococcus pneumoniae* and also shows cytotoxicity against tumor cell lines but not normal cell lines [1]. Meanwhile, subtilisin Carlsberg, the subtilisin from *Bacillus licheniformis* and is 83% sequence identical to subtilisin NAT, can digest itself to produce some short peptides [2]. The objective of this study is to identify novel peptide(s) generated by self-digestion of subtilisin Carlsberg with bacteriocidal and anti-cancer activities. Subtilisin Carlsberg (Sigma-Aldrich) was dialyzed and loaded to an ODS column. A 3-kDa peptide was purified by the column chromatography. Then, this peptide was subjected to Edman degradation and MALDI-TOF MS. These analyses revealed that this peptide is an N-terminal peptide fragment of subtilisin Carlsberg. This peptide displayed cytotoxic activity to Caco-2, HeLa and WI-38 cell lines and showed liposome disruption activity.

[1] Kitagawa, M. et al. (2017). *AMB Express* **7**, 127.

[2] Tang H. et al. (2019). *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **512**, 623-628.

Open-form-to-close-form structural change in a nanochannel molecule-based magnet

Solid State Chemistry Lab, Department of Chemistry, Graduate School of Science
 Ryota Shimoharai, Kunal Kumar, Koji Nakabayashi, Shin-ichi Ohkoshi

Molecule-based materials have advantages to design and construct various nanostructures [1]. Recently, our laboratory has successfully synthesized a nanochannelled molecule-based magnet of $\text{Co}_7[\text{W}(\text{CN})_8]_4\text{Cl}_2 \cdot 29\text{H}_2\text{O}$ [2]. Using a different synthetic method, an analogue compound with acetone molecules in the nanochannels, $\text{Co}^{\text{II}}_7[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]_4\text{Cl}_2 \cdot 21\text{H}_2\text{O} \cdot z(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ (**CoW**) can be obtained. Herein, we present a drastic structural change of **CoW** induced by evaporation of the acetone molecules and magnetic properties before and after the structural change. The open nanochannels of **CoW** are transformed into a close form after the evaporation of acetone. Magnetic measurements revealed that the open form showed a coercive field of 5 kOe at 2 K, while the close form exhibited a significantly small coercive field less than 200 Oe. The g -values at three equivalent cobalt sites in the crystal structure of **CoW** were calculated using the complete active space multiconfiguration self-consistent field method to examine the magnetic anisotropy. In addition, the magnetic structure calculation was performed using the molecular field theory.

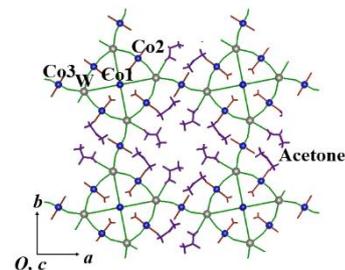


Fig. 1: crystal structure of open form **CoWCl**

[1] S. Ohkoshi, *et al.*, *Nature Chemistry*, **12**, 338 (2020)

[2] K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, *et al.*, *Cryst. Growth Des.* **17**, 9, 4511 (2017).

Tunable terahertz wave absorption property of charge-transfer phase transition materials including heavy alkali cations

Ohkoshi Laboratory, Department of Chemistry, School of Science

○Yuuki Mineo, Koji Nakabayashi, Kenta Imoto, Kosuke Nakagawa, Shin-ichi Ohkoshi

Terahertz wave is applied in various fields, such as medical, security, or semiconductor industry [1]. Recently, our laboratory reported that $\text{Cs}_x\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$ shows the THz wave absorption at 1.4 THz, which is contributed by phonon modes of a heavy Cs^+ ion confined in a three-dimensional cubic framework [2]. Such phonon modes can be modulated by a substitution of a heavy alkali cation or structural changes of framework, resulting in changes of THz wave absorption properties. Therefore we studied the THz wave absorption properties of $\text{Rb}_{0.97}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.99} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (**RbMnFe**) and the compounds substituted by Cs^+ ions which show structural changes accompanied with a charge-transfer phase transition.

Terahertz time-domain spectroscopy revealed that **RbMnFe** at room temperature showed the THz wave absorption at 1.15 THz, which is lower frequency than that of $\text{Cs}_x\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$. The difference can be caused by the smaller size of Rb^+ ions. Rb^+ ions confined in cubic lattice have larger space for oscillation than that of Cs^+ ions, resulting in lower frequency. Moreover, the compounds substituted by Cs^+ ions also showed the THz wave absorption around 1 THz contributed by the phonon modes of Rb^+ ions and Cs^+ ions in the cubic framework. There are differences in the absorption properties depending on the content rate of Cs^+ ions. The charge-transfer phase transition of **RbMnFe** with cooling makes the THz wave absorption frequency higher due to the shrinkage of the lattice.

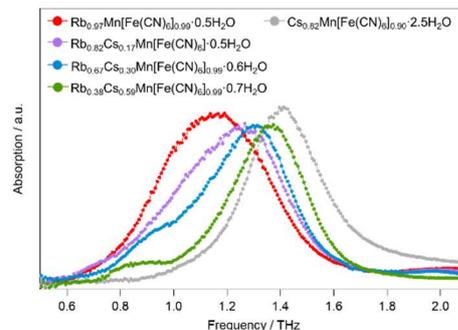


Fig.1. THz wave absorption spectra at room temperature

超流動ヘリウム 3 角度分解型量子 Andreev 反射観測装置の開発

Development of Angle Resolved Quantum Andreev Reflection Detector in Superfluid Helium 3

東京大学低温科学研究センター・村川研究室

吉田研介, 宮瀬知也, 村川智

物性物理学の世界において、量子力学的な効果が支配する超低温領域の研究は重要なテーマの一つである。寒剤として利用されることの多いヘリウムは、超流動現象の発見を皮切りに、それ自体が長年低温物理学研究の舞台となっており、理論・実験の両面から精緻な研究が進められてきた。その中でも核スピン $1/2$ を持つフェルミ粒子系である超流動ヘリウム 3 はトポロジカル超流体であると言われており、トポロジカル超伝導体と合わせてトポロジカル物性物理という新しい世界へと繋がっている。我々の研究では、特にバルクで等方的なエネルギーギャップを持つ B 相を研究対象とし、その表面状態(状態密度や分散関係)の解明を目的としている。

マヨラナ準粒子で記述されることが予測されている超流動ヘリウム 3 表面では、その分散関係が線形になるとされている。電子系においては、試料表面の分散関係を得る方法として角度分解光電子分光 (ARPES) が存在するが、同様の手法として、超流動ヘリウム 3 表面に励起したヘリウム 3 準粒子を様々な角度で入射させ、その反射過程を解析することにより超流動ヘリウム 3 の表面状態密度を調べるという方法が考えられる。この方法を用いて線形分散を直接観測することが本研究の具体的な目的である。我々は現在ビーム源が回転する角度分解型量子 Andreev 反射装置の開発を行っており、本発表ではその概要を説明する。

- T. Okuda, H. Ikegami, H. Akimoto, and H. Ishimoto, Phys. Rev. Lett. **80**, 2857(1998).

SiC 上エピタキシャルグラフェンへの Yb インターカレーションによる強磁性の発現 Emergence of ferromagnetism by Yb-intercalation in epitaxial graphene on SiC(0001)

理学系研究科・物理学専攻・長谷川修司研

鄭 帝洪, 秋山了太, 高城拓也, 遠山晴子, 保原 麗, 長谷川修司

近年、グラフェンへ原子をインターカレート(IC)することにより、超伝導などの物性変調が報告され俄に注目を集めている[1]。特に f 電子系などの重い元素を IC すると、スピン軌道相互作用の付加や強磁性の発現が期待される。実際、我々は常磁性元素 Yb のグラフェンへの IC によって最高で $T_C=109$ K の強磁性の誘起に成功した(図 1)[2]。強磁性はグラフェンの π 軌道電子との間の交換相互作用によって担われていると推測されるが、未だ詳細は明らかではない。本研究の試料はグラフェン/SiC(0001)に Yb を室温で蒸着し、その後アニールするというサイクルを複数回繰り返し行い Yb の IC を行った。Yb はグラフェンと SiC 基板の間に入り SiC を終端していることが予想される[3]。ホール測定によって図1に示すように、200 Oe ほどの保磁力を持つ異常ホール効果が観測された。続いて、上記サイクル数を変えた試料においては、 T_C とキャリア密度が変化し、興味深いことにキャリア密度が低いほど T_C が高い傾向が現れた。

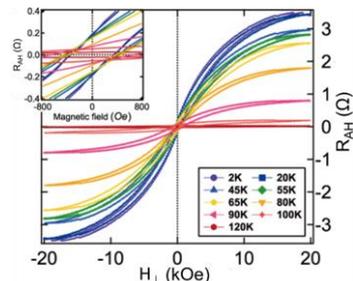


図 1: Yb インターカレートグラフェンの異常ホール効果

[1] H. Toyama *et al.*, ACS Nano DOI: 10.1021/acsnano.1c11161 (2022).

[2] 鄭帝洪ら、日本物理学会秋季大会, 10pPSB-50(2019)

[3] S.Watcharinyanon *et al.*, Graphene 2, 66 (2013)

ストライプ型銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光誘起超伝導の可能性
Possible Light-induced Superconductivity of Stripe-ordered Superconductor
 $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

^A 理学系研究科・物理学専攻・島野研究室, ^B 低温科学研究センター・研究開発部門,
^C 産総研・電子光技術研究部門

^AShimano Group, Department of Physics, ^BCryogenic Research Center, ^CAIST

西田 森彦 ^A, 勝見 恒太 ^{A,B}, Dongjoon Song ^C, 永崎 洋 ^C, 島野 亮 ^{A,B}

Morihiko Nishida ^A, Kota Katsumi ^{A,B}, Dongjoon Song ^C, Hiroshi Eisaki ^C, Ryo Shimano ^{A,B}

銅酸化物超伝導体は超伝導相の他に電荷・スピンの秩序相をもち、これらの秩序と超伝導との競合・共存関係を理解することが高温超伝導の原理究明のための重要な課題となっている。特に電荷・スピンの縞状に整列したストライプ秩序は超伝導と競合することが知られており、これを光励起によって破壊することで抑制されていた超伝導が瞬間的に回復するという光誘起超伝導の報告は大きな注目を集めた[1,2]。しかしストライプの破壊から超伝導を示すまでの機構の解明には至っておらず、さらなる検証が待たれている。本研究ではストライプ秩序を示す銅酸化物超伝導体の一種である $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ を対象に、ストライプ秩序を波長 800 nm の近赤外光で破壊した際の過渡反射率を測定した。発表ではその詳細を報告し、光誘起状態で現れる反射スペクトルの起源について議論する。

[1] D. Fausti *et al.*, Science **331**, 189-191 (2011)

[2] D. Nicoletti *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 100503(R) (2014)

Spin-split Fermi surface of InAs/(Ga,Fe)Sb nonmagnetic/ferromagnetic bilayer semiconductor heterostructures

¹ EEIS, The Univ. of Tokyo, ² IEI, The Univ. of Tokyo

³ PRESTO, JST, ⁴ CSRN, The Univ. of Tokyo

Harunori Shiratani¹, Kosuke Takiguchi¹, Le Duc Anh^{1,2,3} and Masaaki Tanaka^{1,4}

The magnetic proximity effect (MPE) in non-magnetic (NM)/ferromagnetic (FM) bilayers can introduce ferromagnetism into a high-mobility non-magnetic channel [1]. In metallic bilayer systems, MPE is usually limited within a few atomic layers from the NM/FM interface. On the other hand, in a semiconductor-based InAs quantum well (QW)/ FM semiconductor (Ga,Fe)Sb bilayer [2], high coherency of electron carriers enhances the magnetic coupling range (~ 100 nm) at the interface due to its small carrier concentration[3]. Also, the MPE can be modulated by a gate voltage to vary the penetration of the electron wavefunction in the InAs QW into the insulating (Ga,Fe)Sb FM layer .

In this work, we report the first observation of the spin-split Fermi surface in InAs/(Ga,Fe)Sb bilayers via gate-controlled Shubnikov-de Haas (SdH) oscillations. The Fourier transformed spectra of the SdH oscillations in the $\sigma_{xx} - V_g$ relation show a double-peak feature. Our analysis indicates that these two peaks correspond to the spin-split bands at the Fermi surface of the InAs QW, which is induced by the MPE from (Ga,Fe)Sb and strongly depends on V_g . The spin splitting energy Δ_{MPE} reaches 6.3 meV, which is the largest value induced by MPE ever reported, and can be effectively controlled by V_g . Our findings will pave a new way for the development of spintronic devices utilizing MPE.

[1] I. Žutić, et al, Mater. Today **22**, 85 (2018). [2] N. T. Tu et al., PRB **92**, 144403 (2015). [3] K. Takiguchi, L. D. Anh et al, Nat. Phys. **15**, 1134 (2019).

Influence of the multi-orbital hybridizations on the spin-to-charge conversion at the LaAlO₃ / SrTiO₃ interface

工学系研究科 電気系工学専攻 田中大矢研究室

荒井勝真、金田真吾、Le Duc Anh、田中雅明、大矢忍

The recently observed various phenomena of spin-to-charge-current conversion have attracted much attention. The LaAlO₃/SrTiO₃ (LAO/STO) interface is very promising for efficient spin-to-charge conversion due to the two-dimensional electron gas (2DEG) with a large Rashba spin-orbit interaction. In our previous study, we theoretically calculated the temperature dependence of the λ_{IEE} in the 2DEG at the LAO/STO interface and compared it with experimental results. We also calculated the Fermi-energy E_F dependence of $j_c^{2D}/\delta s$, where j_c^{2D} is a two-dimensional charge-current density and δs is spin accumulation, as shown in Fig. 1 [1]. However, the cause of peaks of $j_c^{2D}/\delta s$ (large peaks are seen at 90 meV, 130 meV, and 225 meV from the conduction band bottom) has not been clarified yet.

In this study, the analysis shows that the peak was derived from j_c^{2D} . A detailed analysis of j_c^{2D} , divided into each band component, revealed that the increase in Rashba splitting due to band hybridization is a major contributor to the increase in the value.

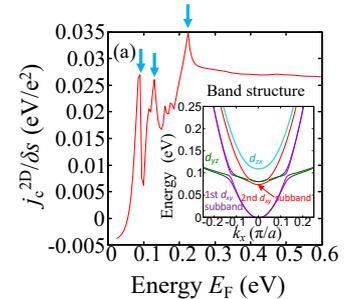


Fig. 1. E_F dependence of $j_c^{2D}/\delta s$ and the band structure.

[1] S. Arai, S. Kaneta-Takada, L. D. Anh, M. Tanaka, and S. Ohya, Appl. Phys. Express **15**, 013005 (2022).

異常ホール反強磁性体 CoM_3S_6 ($M=\text{Nb}, \text{Ta}$) の偏極中性子散乱実験による磁気構造解析
Magnetic structure analysis of anomalous Hall antiferromagnet CoM_3S_6 ($M=\text{Nb}, \text{Ta}$)
by polarized neutron scattering

東大工^A, 東大物性研^B, CROSS^C, J-PARC, JAEA^D, 東大理^E, 東北大金研^F, 理 CEMS^G, 東京カレッジ^H
高木寛貴^A, 高木里奈^A, 齋藤開^B, Nguyen Duy Khanh^G, 大石一城^G, 鬼柳亮嗣^D,
野本拓也^A, 見波将^E, 鈴木通人^F, 柳有起^F, 平山元昭^{A,G}, 軽部皓介^G, 橋爪大輔^G,
十倉好紀^{A,G,H}, 有田亮太郎^A, 中島多朗^{B,G}, 関真一郎^A

従来、マクロな磁化を有する物質(ex.強磁性体)においてのみ発現すると考えられていた異常ホール効果が、反強磁性体においても発現することが報告され、その応用性から注目を集めている。その中で、キラルな結晶構造を有する反強磁性体 CoNb_3S_6 が巨大な異常ホール効果を有することが報告されており[1]、さらに我々は Nb を Ta に置換した反強磁性体 CoTa_3S_6 も巨大な異常ホール効果を有することを発見している[2]。しかし、これらの異常ホール反強磁性体 CoM_3S_6 ($M=\text{Nb}, \text{Ta}$) の磁気構造の具体的な特定には至っておらず、議論が続いている[3]。

本研究では、偏極中性子散乱実験を行い、いずれの物質においても non-coplanar 磁気構造が実現していることを発見した。また、DFT 計算を用いてエネルギー的な安定性の検証も行った。

[1] N. J. Ghimire et al., Nature Comm. 9, 3280 (2018).

[2] 高木寛貴 他, 日本物理学会 2021 年年次大会 12aC1-2.

[3] S S P Parkin et al., J. Phys. C: Solid State Phys. 16 2765 (1983).

反強磁性体 CoNb_3S_6 における磁気光学効果Magneto-optical effect on antiferromagnet CoNb_3S_6

理工学専攻・高橋研究室

林悠大、岡村嘉大、関真一郎、有田亮太郎、カーン・ヌイエン、十倉好紀、高橋陽太郎

近年、物質の幾何学的性質により引き起こされる物性現象が大きな注目を集めている。強磁性金属で観測されることが知られてきた異常ホール効果もそのような現象の1つである。電子構造がトポロジカルに非自明な構造をとることで異常ホール効果は反強磁性体といったマクロな磁化がほとんどない系でも引き起こされることがわかってきた[1]。しかし反強磁性体の示す異常ホール効果では、どのような電子構造が異常ホール効果に寄与しているのか直接観測した研究はなかった。

本研究では、異常ホール効果を示す反強磁性体である CoNb_3S_6 [2]を用いて遠赤外から可視領域にかけての磁気光学分光測定を行うことで異常ホール効果を引き起こす電子構造を明らかにすることを目指した。我々は、測定により磁化に比例しない、従来の磁気光学効果とは異なる振る舞いを示すスペクトルを観測したほか、ホール伝導度スペクトルが ~ 40 meVという低エネルギーにおいて、異常ホール効果に大きな寄与をされるとされる共鳴構造を示すことを明らかにした。

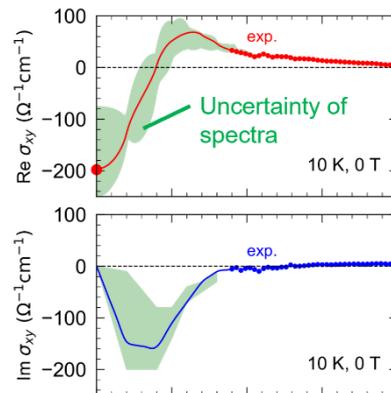


図 1 ホール伝導度スペクトル

[1] S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).[2] N. J. Ghimire *et al.*, Nat. Commun. **9**, 3280 (2018).

Quantum critical phase in a doped spin liquid candidate

東大物理工学専攻鹿野田研究室、東大低温センター^A、埼玉大理学部^B
若松浩大、鈴木悠司、藤井武則^A、宮川和也、谷口弘三^B、鹿野田一司

伝導層と絶縁層の格子の周期が不整合である擬 2 次元三角格子有機伝導体 κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ は、有機伝導体では例外的なキャリアドーピング系である[1]。スピン磁化率はスピン液体的である一方、金属的な電気抵抗を示し、ドーピングされたスピン液体の候補物質となっている[2]。有機伝導体は格子が柔らかいため、加圧によって電子相関を比較的容易に変化させることが可能であり、この特徴を活かした研究が行われてきた。 κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ では、圧力印加によって、常伝導相/超伝導相で non-Fermi liquid - Fermi liquid および BEC - BCS クロスオーバーが起きることが指摘されている[3]。近年、フラストレーションの強い系では quantum critical point ではなく、quantum critical phase となることが示唆される結果が報告された[4]。 κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ は等方的な三角格子による強い幾何学的フラストレーションを有しており、NFL-FL クロスオーバーと quantum critical phase の関連性について議論が期待されている。本研究では、 κ -(ET)₄Hg_{2.89}Br₈ で発現が期待される quantum critical phase に関連した振る舞いを捉えることを目的として、加圧による電子相関制御下で熱電効果を測定した。電子相関の大きな低圧領域では、ゼーベック係数を温度で割った S/T が低温で $\ln T$ に比例する臨界的な挙動を示すことが明らかとなった。また、圧力による $-S/T$ の振る舞いの変化が超伝導の性質の変化とも関連していることを示唆する結果を得た。本講演では以上の結果の詳細を紹介する予定である。

[1] H. Oike *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 067002 (2015). [2] H. Oike, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 756 (2017). [3] Y. Suzuki, *et al.*, Phys. Rev. X **12**, 011016 (2022). [4] H. Zhao, *et al.*, Nat. Phys. **15**, 1261 (2019).

$ReRuO_3$ ($Re = La, Nd$) の単結晶薄膜化と磁気輸送特性

Fabrication and magnetotransport properties of $ReRuO_3$ ($Re = La, Nd$) single crystalline thin films

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室

張 灵飛、藤田 貴啓、川崎 雅司

ペロブスカイト型ルテニウム酸化物 $ARuO_3$ は典型的な遍歴強磁性体である $SrRuO_3$ を中心に長年研究されており、その強磁性の起源を探索するために A サイト置換も盛んに研究されてきた[1]。これらの従来の研究は Ru が 4 価であるものが対象とされてきたが、 A サイトに希土類元素 Re を選択することで、3 価の Ru を含む $Re^{3+}Ru^{3+}O_3$ が実現できる。 $ReRuO_3$ では、 Re^{3+} が磁気モーメントを持ち、 Re の $4f$ 軌道と Ru の $4d$ 軌道の相互作用により、従来の $ARuO_3$ では見られない新奇な磁気輸送特性の発現が期待できる。しかしながら $ReRuO_3$ の先行研究は、 $LaRuO_3$ が常圧、その他の組成が高圧でのバルク多結晶の合成報告があるが、その磁気輸送特性がまだ測定されていない[2]。本研究ではペロブスカイト酸化物基板のエピタキシャル応力を利用し、 $SrTiO_3(001)$ 基板上に高品質な $LaRuO_3$ と $NdRuO_3$ 単結晶薄膜の作製に初めて成功した(図 1)。さらに磁気輸送特性を評価した結果、 $LaRuO_3$ は常磁性金属であり、 $NdRuO_3$ は低温において磁化由来と思われる異常ホール効果を示すことが分かった。

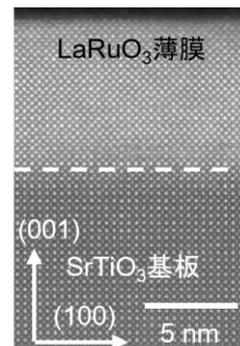


図 1 $SrTiO_3(001)$ 基板上に作製した $LaRuO_3$ 薄膜の STEM 像。

脂質がアデノシン A_{2A} 受容体の活性を制御する機構の解明

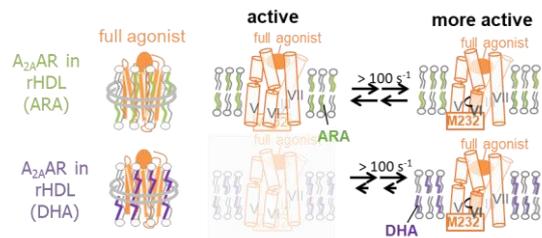
Activation of adenosine A_{2A} receptor by lipids revealed by NMR

薬学系研究科・薬科学専攻・生命物理化学教室

上田卓見、水村拓也、近藤啓太、栗田政稔、幸福裕、夏目芽衣、今井俊輔、白石勇太郎、嶋田一夫

現在市販されている医薬品の 30%以上は G 蛋白質共役型受容体 (G protein-coupled receptor, GPCR)を標的とする。細胞内では、GPCR は脂質二重膜中で機能するため、脂質が GPCR の活性や構造に与える影響は、GPCR の生理機能の解明および創薬の上で重要である。本研究では、代表的な GPCR であるアデノシン A_{2A} 受容体には、シグナルを流さない不活性型構造と、異なる

程度でシグナルを流す複数の活性型構造の多型があることを明らかにした [1]。そして、薬物は不活性型構造と活性型構造の存在比を変えることで、また脂質は複数の活性型構造の存在比を変化させることで、シグナル伝達活性を制御することも明らかにした。本研究により、生理的リガンドや従来の薬物が結合した GPCR に作用できる、新規の作用点および薬理作用を持つ薬物を設計する道が開け、医薬品の開発が加速することが期待される。



[1] T. Mizumura *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eaay8544 (2020).

Construction of Redox-active Tetrahedral Chiral-at-Metal Complexes with Only Achiral Ligands

Graduate School of Science, Department of Chemistry
Yuanfei LIU, Hitoshi Ube, Mitsuhiro SHIONOYA

Chiral metal complexes usually consist of a chiral ligand that coordinates with the central metal. On the other hand, “Chiral-at-Metal Complexes”, in which the chirality is derived only from the central metal, have recently attracted attention [1]. Changing the origin of chirality eliminates the need for chiral ligands, improves the efficiency of chiral

transfer, and reduces the effort and cost of synthesis. However, unlike the stereochemically stable carbon-centered chirality, the substitutionally active metal-center lacks configurational stability and is prone to fast racemization. There is only one example of a particularly stable tetrahedral "Chiral-at-Metal Complex" in our group [2].

Our group has previously reported a stereochemically stable tetrahedral chiral-at-zinc complex with high catalytic function [2]. In this study, redox-active central metals were used. We have succeeded in complexing with achiral ligands without changing the valence of the central metals, and are currently analyzing the results. There has also been progress in the separation of optically pure complexes using chiral auxiliaries and by spontaneous resolution.

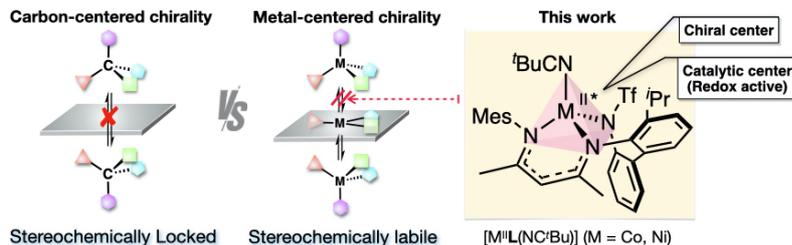


Fig1. Construction of redox-active tetrahedral chiral-at-metal complexes.

Non-linear optical properties of photoswitchable polar Ln-[Fe(CN)₅NO] crystals

Graduate School of Science, The University of Tokyo

Taiki Sakaguchi, Kenta Imoto, Koji Nakabayashi, Shin-ichi Ohkoshi

Second harmonic generation (SHG), one of the non-linear optical properties, draw attention for the application of optical devices [1]. Recently, our laboratory has reported photoswitchable SHG property of [Dy(phen)₂(NO₃)(H₂O)][Fe(CN)₅(NO)]·3H₂O (**DyFe**) [2]. In this study, we report SHG properties of [Ln(phen)₂(NO₃)(H₂O)][Fe(CN)₅NO]·nH₂O (**LnFe**) (Ln = Tb, Gd, Ho).

The results of single crystal X-ray diffractions indicate that these complexes have one dimensional structures in *Pna2*₁ space group which are isostructural to **DyFe**. SH signals of powder samples are monochromatic and proportional to the squared incident laser power. In the measurement of crystal SHG, the polarization angles of SH signals correspond with the space group of the complexes. At 100 K, the intensities of SH signals increased by irradiating 473 nm light and returned to the initial intensities by irradiation of 804 nm light.

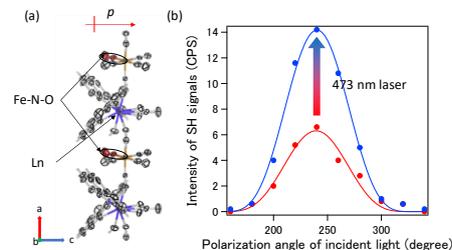


Figure (a) Crystal structure of **LnFe** viewed from b-axis. (b) The polarization angle dependence of SH signals of **LnFe** (Ln = Ho) at 100 K. The red and blue plot indicate the measurement before and after irradiation of 473 nm light, respectively.

[1] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, H. Tokoro, *Nature Photonics* **8**, 65 (2014).

[2] M. Komine, K. Imoto, A. Namai, M. Yoshikiyo, S. Ohkoshi, *Inorg. Chem.* **60**, 2097 (2021).

Thermal phase transition near room temperature in cyanide-bridged Co-W assembly

Ohkoshi Chemistry Laboratory, Department of Chemistry, Graduate School of Science
Kazuki Nakamura, Koji Nakabayashi, Kenta Imoto, Shin-ichi Ohkoshi

Phase transitions in solids have been studied extensively, such as metal-semiconductor, ferroelectric, and ferromagnetic transition. Cyanido-bridged metal assemblies exhibit various types of phase transition, spin crossover, ferromagnetic, and charge transfer transition.[1] Especially, cyanido-bridged Co-W assemblies exhibit not only photo-induced magnetization, but also thermal phase transition between $\text{Co}^{\text{II}}\text{-W}^{\text{V}}$ and $\text{Co}^{\text{III}}\text{-W}^{\text{IV}}$ electronic states. Herein, we present a Co-W assembly showing thermal phase transition near room temperature, $\text{Cs}^{+}_{0.1}(\text{H}_5\text{O}_2^{+})_{0.9}[\text{Co}(\text{4-bromopyridine})_{2.3}\{\text{W}(\text{CN})_8\}]$ (**CsCoW**), which is a partial Cs-substituted compound of $(\text{H}_5\text{O}_2^{+})[\text{Co}(\text{4-bromopyridine})_2\{\text{W}(\text{CN})_8\}]$ with a stable $\text{Co}^{\text{III}}\text{-W}^{\text{IV}}$ phase over room temperature.[2]

The crystal structure of **CsCoW** has two-dimensional cyanido-bridged Co-W layers with oxonium cations and Cs^{+} ions between the layers. Figure 1 shows the product of the molar magnetic susceptibility (χ_M) and temperature (T) vs T plot of **CsCoW**, the phase transition temperatures are 276 K on cooling, and 329 K on heating, and the thermal hysteresis loop indicates bistable phases at room temperature. The variable-temperature UV-vis and IR spectroscopies revealed the electronic states of the $\text{Co}^{\text{II}}\text{-W}^{\text{V}}$ and $\text{Co}^{\text{III}}\text{-W}^{\text{IV}}$ phases.

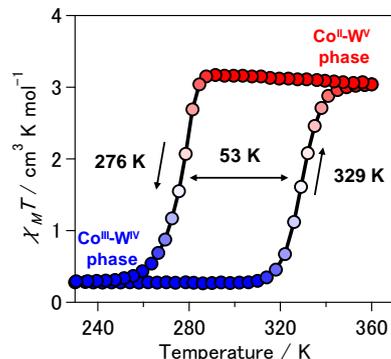


Fig.1. $\chi_M T$ vs T plot of **CsCoW**

[1] S. Ohkoshi, *et al.*, Nature Photonics, **8**, 65 (2014).

[2] Y. Miyamoto, S. Ohkoshi, *et al.*, Dalton. Trans., **45**, 19289 (2016).

2層HDプレコートグラファイト上ヘリウム3のパルスNMR測定に向けた装置開発 Equipment Development for Pulsed NMR Measurement of Quantum Phases in Helium 3 on Graphite Covered with Bilayer HD

理学系研究科物理学専攻村川研究室, 低温科学研究センター
宮瀬知也, 吉田研介, 村川智

極低温におけるグラファイト上のヘリウム3は理想的な2次元系とみなせる吸着層を形成する. このような吸着層については, 吸着量をパラメーターとして構造的および磁氣的に豊富かつユニークな量子相を示すことが明らかになってきた. 最近では, HDを2層プレコートしたグラファイト上のヘリウム3吸着層における詳細な磁気比熱測定が行われ, 下地のポテンシャル周期に整合する固相(C3相)および並進秩序が失われている一方で結合配向秩序が準長距離的に保たれているようなヘキサティック構造を有する量子液晶相(C2-like相)の存在が示唆された[1]. これらの磁性については, 頻繁なリング交換および幾何学的配置によって強い磁気フラストレーションが発生していると考えられている. 実際, C3相における磁気比熱については, 温度の $2/3$ 乗に比例する特異なふるまいを約 $100\ \mu\text{K}$ まで示している[1]. また, C3相とC2-like相の共存領域における磁化率については, 温度の $1/3$ 乗に比例する特異なふるまいを約 $10\ \mu\text{K}$ まで示している[2]. これらの結果は, C3相およびC2-like相の基底状態が量子スピン液体であることを示唆している. 本発表では, C3相およびC2-like相に対する横緩和時間測定の意義およびその測定に向けたパルスNMR測定装置開発について述べる.

[1] M. Kamada, Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo (2018).

[2] H. Ikegami *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5146 (2000).

カイラル反強磁性体 Mn_3Sn の磁気抵抗効果に対する Mn 置換効果

The effect of Mn doping on the in-plane magneto-transport properties in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn

理学系研究科物理学専攻・中辻酒井研究室

黒沢駿一郎・富田崇弘・Muhammad Ikhlas・Mingxuan Fu・酒井明人・中辻知

カイラル反強磁性体 Mn_3Sn はワイル磁性体として初めて実験的に発見された物質である。反強磁性体にも関わらず、フェルミ面付近に存在するワイル点に起因して強磁性体に匹敵するほどの異常ホール効果を示し[1]、基礎応用両面から注目を集めている。一方でワイル半金属の示す他の重要な性質の一つにカイラル異常がある。カイラル異常とは電場と磁場が平行に印加されるとカイラリティの異なるワイルペアの間で電荷ポンピングが生じる現象であり、負の縦磁気抵抗効果および Planar Hall 効果(PHE)として観測される。 Mn_3Sn でも負の縦磁気抵抗効果[2]や PHE[3]が観測されたが、これらには磁性に由来する機構も存在するためより詳細な議論が必要である。

そこで本研究では Mn_3Sn における面内での磁気抵抗効果および PHE を、温度や Mn 置換量などの条件を変えて測定した。発表では得られた測定結果に基づいて面内磁気輸送特性に対するカイラル異常や磁性効果の影響を議論する。

[1] Nakatsuji, S., Kiyohara, N. & Higo, T. *Nature* **527**, 212–215 (2015).

[2] K. Kuroda, T. Tomita et al., *Nat. Mater.* **16**, 1090 (2017).

[3] Chen, T., Tomita, T., Minami, S. et al., *Nat Commun* **12**, 572 (2021).

Si 基板上巨大ラシュバ表面超構造における円偏光ヘリシティ依存光電流 Helicity-of-the-circular-polarized-light dependent photocurrent in surface superstructures on Si(111) with huge Rashba-splittings

理学系研究科 物理学専攻

谷内息吹、秋山了太、保原麗、長谷川修司

円偏光を用いると物質中の電子をスピン選択的に励起できるため、スピン注入法としてスピントロニクス応用に大きな期待が寄せられている[1]。中でも、スピン軌道相互作用が強くスピン縮退が解け、スピナー運動量ロッキングが起きた系に円偏光を斜め照射すると、円偏光の右/左回りに応じて電流の向きが反転する円偏光フォトガルバニック効果(CPGE)が生じることがトポロジカル絶縁体[2]やラシュバ物質系[3]で報告されている。本研究では巨大ラシュバ効果をもつ単原子層表面超構造物質(Tl,Pb)/Si(111) において初めてCPGEを観測したので報告する。本系はPbの蒸着量でラシュバ分裂の大きさが変化し、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面構造では $\Delta E = 250$ meVにも及ぶラシュバ効果が報告されている[4]。我々は超高真空チャンバー内で表面構造を変化させ in situ 光学電気測定を行った結果、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の表面周期を示すときに最大のCPGEが観測された。講演ではバンド構造と関連付け、原子層上での光と電子の相互作用についても議論していく。

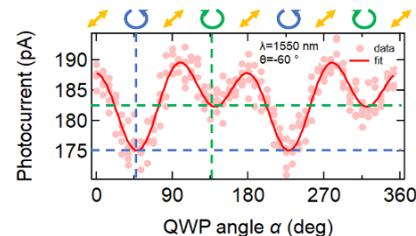


図1 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb) における光電流の偏光($\lambda/4$ 板回転角)依存性。

[1] D. Fan *et al.*, Phys. Rev. R **2**, 023055 (2020)

[3] H. Hirose *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 222404 (2018).

[2] K. N. Okada *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 081403(R) (2016).

[4] A. V. Matetskiy *et al.* Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (2015).

円偏光励起した Dirac 電子系ビスマスにおけるテラヘルツ異常 Hall 効果 Terahertz anomalous Hall effect in the Dirac electron system Bismuth under circularly polarized light

理学系研究科物理学専攻^A, 物性研^B, 低温科学研究センター^C

平井誉主在^A, 吉川尚孝^A, 河口真志^A, 林将光^A, 奥村駿^B, 岡隆史^B, 島野亮^{A,C}

ビスマスのフェルミ面近傍の電子は Dirac 方程式から導かれる特殊な分散関係に従うことが知られており、そのため Dirac 電子と呼ばれている。このような Dirac 電子をもつ物質を円偏光によって周期的に駆動した状態を Floquet 理論に基づいて解析すると、光によって変調されたバンド分散が実現し、それに付随して有限の Berry 曲率を持つようになることが知られている[1]。光によって高速かつ自在に物質の性質を変調・制御できる可能性から Dirac 電子系での Floquet 状態は盛んに研究されてきている[2]。

そこで我々はビスマスを中赤外の円偏光パルスで励起し、発現する有限の Berry 曲率をテラヘルツ帯の異常 Hall 効果を通して観測することを目指した。その結果、励起パルスの包絡線に追従する即時的な異常 Hall 効果を観測することに成功した。講演では観測された異常 Hall 効果のデータを紹介し、それらと Floquet 理論とのつながりについて議論する。

[1] Takashi Oka and Hideo Aoki, Phys. Rev. B 79, 081406(R) (2009)

[2] J. W. McIver *et al.*, Nat. Phys. 16, 38 – 41 (2020)