

News Letter Vol.7

2022年7月発行

目次

1. 公募研究の紹介

A A 1

AUI
空を飛んだ有機物質とリアルタイムリモート国際共同実験
スピン軌道相互作用に由来するスピン液晶相の解明と物質開発
Emergent magnetic field from thermal fluctuations: Kagome and triangular lattices
HIRSCHBERGER, Max 3
分子線エピタキシー成長による人エネマティック構造の創製
光磁気効果測定による液晶中のスピン拡散の機構解明
界面に誘起されるトポロジカル磁気構造の微視的機構解明
軌道自由度による超構造を用いた量子液晶状態の探索
B01
カゴメ遍歴磁性体における強磁場誘起量子液晶相の微視的研究
スピン流でプローブする鉄系超伝導体の電子ネマティック秩序のののののですののののののののののです。
空間変調することで強磁場でも生き残る超伝導状態
強い磁場と単結晶で解明する量子スピンの液晶
光を使って量子液晶物質の対称性の破れを観測しよう
量子スピン液体における回転対称性の破れとトポロジカル相転移
3 色超格子における超伝導ダイオード効果の探索
電子ネマティック状態におけるドメイン構造の可視化と制御ロールののののののののののののののののののののです。
磁場による電子対液晶状態の制御 及び物性の精密測定ロークション () 2000 000 000 000 000 000 000 000 000
希土類化合物における量子液晶の発現と「悪魔の階段」へ導く機能性の解明
伝導面内の異方性を見るのに、伝導面に垂直な電気抵抗を測る
C01
時間・空間反転およびゲージ対称性の破れを伴う電子液晶相の研究
磁性体・冷却原子系におけるスピン液晶スキルミオンの開拓
キラル古典異方粒子系におけるトポロジカル相の制御
超伝導ダイオード効果とヘリカル超伝導
超伝導液晶秩序がもたらす新奇な非平衡現象
D01
非相反応答の逆効果による磁気ドメイン制御
トポロジカルスピン液晶の機能的光学応答の探索
スピン流を用いたスピン液晶の磁化制御 新見康洋 26





2. 令和3年度領域研究会報告
3. 第3回 QLC 若手研究奨励賞 Quadrupole excitations in <i>S</i> =1 Kitaev spin liquidsPOHLE, Rico 30 トポロジカル磁気構造の起源解明に向けたファンデルワールス金属の物質探索
4. QLC チャンネルより 超伝導体においてスピン配列の制御を実現
マヨラナ粒子の粒子数を磁場方向により制御することに成功
反強磁性が引き起こす光の三色性を観測
超短パルス光を用いた超伝導のポンププローブ分光
Photo-induced antiferromagnetic-ferromagnetic and spin-state transition
ZHANG, Yujun and WADATI, Hiroki 38 レーザー光で引き起こされるの超高速な磁気秩序の変化を観測
~ペロブスカイト型酸化物の反強磁性秩序構時間分解共鳴軟 X 線散乱による観察~山本航平、和達大樹 39
5. 若手研究者の紹介 Randomized 特異値分解による 2 次元 Mott 絶縁体における光励起状態の解析
6. その他
く こうご 人事異動・受賞報告・アウトリーチ・メディア報道・プレスリリース
開催報告
支援プログラムの紹介
今後の予定
編集後記

空を飛んだ有機物質とリアルタイムリモート国際共同実験

A01 公募班 佐々木孝彦

分子が集積して構成される有機物質は、一般的には電気 を流さない絶縁体として知られています。また、構造的に 「やわらかい」ことも特徴です。このような電気的絶縁性 や機械的柔軟性のミクロな起源は、有機物質に特徴的な分 子の集積とその電子状態が関わっています。私たちは、こ のような有機物質の基礎的電子物性の解明を目指していま す。特に、ナノサイズの分子の集積からミリサイズのバル ク材料に至る構造的な階層性の中に現れる「優柔不断なパ イ電子」の集団的な振る舞いに着目しています。本稿では、 有機物質の分子集積構造に特徴的な格子状態(フォノン) とパイ電子の結合についての研究について紹介します。



図 1: BEDT-TTF 分子ダイマーの呼吸 (breathing)フォノンモード(左図赤矢印)と結合 する分子ダイマー上のパイ電子ゆらぎ(右図) の概念図。

分子性有機物質 κ-(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃は、BEDT-TTF と呼ばれる分子がダイマー(二量体)を組み, このダイマーが三角格子状に規則正しく配列して2次元的な電気伝導層を形成しています。このBEDT-TTF 分子層をCu₂(CN)₃層が上下から挟み込み交互に積層して3次元結晶となっています。この物質は、 BEDT-TTF 分子ダイマー上のパイ電子間に働く斥力の相互作用によって局在化してモット絶縁体と呼 ばれる状態になっています。このような電子状態は強相関電子状態と呼ばれ,遷移金属酸化物や重い 電子系物質などで研究が活発に行われていますが,有機物質系もその一つです.さらにこの物質は,極 低温でもパイ電子のスピンが秩序化せず量子スピン液体状態が実現しているのではないかと考えられ ています. 私たちはこのような分子ダイマー上のパイ電子(電荷・スピン)とダイマー分子構造に特 徴的なフォノン(breathing mode)の結合状態(Fig. 1)を非弾性中性子散乱の手法を使って調べています [1,2].

コロナ禍のため中性子実験を行うフランスグルノ ーブルの実験施設(Institut Laue-Langevin)に出かけ て現地で実験を行うことができません. そのため, 準 備した有機物質試料をフランスに空輸し、現地の担 当者とオンラインでの打ち合わせをしながら実験準 備を行いました.実験当日も、日本から分光器をリモ ートオペレーションしながら,日本-ドイツ-フラ ンスの共同研究者間でリアルタイムに相談しながら の実験実施です(Fig. 2). 詳細は, 紙面の関係で紹介で きませんが、小さな有機物質でもパイ電子と結合し たフォノンの観測から「優柔不断なパイ電子」を知る ことができるという興味深いものです.実験終了後 にフランス・ドイツでおいしいワインやビールを共 同研究者と楽しむことができることを期待しながら 次の研究に向けた構想,準備を進めています. 参考文献



図2:日本ードイツーフランスを結んだオンラインリモー ト実験。フランスの中性子散乱実験施設に日本から有 機物質を空輸し、日本,ドイツ,フランスの複数研究場 所をリアルタイムにオンラインで結び、リモートオペレ ーション。

- M. Matsuura, <u>T. Sasaki</u>, S. Iguchi, E. Gati, J. Mueller, O. Stockert, A. Piovano, M. Bohm, J. T. Park, S. Biswas, S. M. Winter, R. Valenti, A. Nakao and M. Lang, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 027601-1-6 (2019). [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.027601]
- [2] Masato Matsuura, <u>Takahiko Sasaki</u>, Makoto Naka, Jens Mueller, Oliver Stockert, Andrea Piovano, Naoki Yoneyama, and Michael Lang, *in preparation*.

研究室 HP: http://cond-phys.imr.tohoku.ac.jp/

佐々木孝彦(東北大学・金属材料研究所・教授)

スピン軌道相互作用に由来するスピン液晶相の解明と物質開発

A01 班 平井 大悟郎

電子はスピン角運動量と軌道角運動量という 2 つの角運動量をもっており、それらはちょうど自転 と公転運動のようなものとイメージできます(図 1a)。物質中では、周りのイオンからの影響で軌道運 動が阻害されるため、遷移金属元素を含む化合物の多くは、ほとんどスピン角運動量によって磁気的 性質が決まります。スピンはあたかも小さな磁石のように振る舞い、その磁石がどう並ぶかで様々な パターンのスピンの秩序が形成されます。一方、原子番号の大きい、つまり周期表の下の方にある重遷 移金属元素ではスピンと軌道を結び付けようとする相互作用が強くなり、2 つが混ぜ合わさります。ス

ピンと軌道が結合すると、磁気的な秩序であるスピンの秩序だ けでなく電荷の分布が偏る秩序など様々な秩序状態が形成され ます[1]。電荷の分布が偏る秩序は、磁気的な秩序はないのに元 の結晶の対称性が破れる(方向性が現れる)液晶のような状態な ので、スピンネマティック相とも呼ばれています(図 1b)。

私はこの不思議なスピンの液晶状態に興味を持って、実際に そのような状態を示す物質を探しています。最近、5d 遷移金属 元素のレニウム(Re)を含む Ba₂MgReO₆という物質の結晶を作 り、放射光を用いた回折実験によってスピンの液晶状態が実際 にできているということを見つけました[2,3]。実験で観測され たスピン液晶の秩序は、図1のように電荷がクローバー型に偏 って整列したものでした。この液晶状態はまだ見つかったばか りなので、これからスピン液晶の性質をより詳しく調べたいと 思っています。また、この物質の元素の一部を違う元素で置き 換えることで、違うパターンのスピン液晶が出てこないか、ス ピン液晶を安定化させたり逆に抑制したりという制御ができな いかを調べていきたいと思っています。

スピンの液晶状態は、私が興味を持っている重い遷移金属以 外にも、様々な種類があります。例えば軽い遷移金属でも、スピ ンとスピンが結合することで液晶状態となりますし、希土類元 素を含む物質では重遷移金属化合物と同様なスピンの液晶状態 が出来ることが古くから調べられています。スピン液晶という



スピンネマティック秩序

図1:(a) スピンと軌道角運動量のイメージ図。(b) 重遷移金属化合物において スピンと軌道が結合したときに現れるス ピンの液晶状態。スピンネマティック秩 序と呼ばれる。

切り口で異なる性質をもつ物質を比較することで、共通する物理とそれぞれの物質の個性を明らかに していきたいと思います。

参考文献

[1] Gang Chen, Rodrigo Pereira, and Leon Balents, **2**, 174440 (2010) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.174440].

[2] <u>Daigorou Hirai</u> and Zenji Hiroi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 064712 (2019) [https://doi.org//10.7566/JPSJ.88.064712].

[3] <u>Daigorou Hirai</u>, Hajime Sagayama, Shang Gao, Hiroyuki Ohsumi, Gang Chen, Taka-hisa Arima, and Zenji Hiroi, *Phys. Rev. Research* **2**, 022063(R) (2020) [https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.022063].

研究室 HP: http://mag.nuap.nagoya-u.ac.jp/index.html

平井大悟郎(名古屋大学・工学研究科・准教授)

Emergent magnetic field from thermal fluctuations: Kagome and triangular lattices

A01: HIRSCHBERGER, Max

In nature, the distinction between left- and right-handed objects or processes, described by the concept of chirality or 'handedness', is a recurring theme. Magnetic solids provide us with an example of chirality physics through the spin chirality of atomic spin patterns: these are noncoplanar (NCP) patterns where the spins are not all lying in the same plane, but are twisting in all directions of space. NCP spin patterns are famed for strongly affecting the motion of conduction electrons, through a mechanism often termed 'emergent electromagnetism'. The emergent magnetic field, specifically, is directly proportional to the spin chirality of atomic spin clusters, and causes a gigantic sideways deflection of moving electrons. It is believed to be the key to unlock advanced technological functions related to the control of spin and charge currents in Quantum Materials.

Our research group is interested in anorganic magnetic solids: their synthesis as high-quality single crystals using solid state chemistry, their characterization via neutron beams and synchrotron x-rays, as well as their heat and charge transport properties. In collaboration with members of RIKEN Center for Emergent Matter Science (Wakoshi, Japan), we have pioneered a family of model materials for the study of spin chirality in magnets: $R_3 Ru_4 Al_{12}$ (*R*: magnetic rare earth ion). In this crystal structure, the rare earth ions have a large atomic spin and are arranged in two dimensional sheets that realize a distorted Kagome lattice, or network of triangles and hexagons (Fig. 1, left). Here, we found that thermal fluctuations of magnetic spins have a net chiral habit: despite their nearly random thermal movement, the short-range correlations of the spins are subject to a left- or right-handed twist, which can be controlled by an external magnetic field [1]. This spin chirality of thermal fluctuations causes an emergent magnetic field (sideways force on moving electrons). However, it is absent in a related material with a triangular lattice, due to the cancellation of contributions from neighboring triangles: Ref. [2] and Fig. 1, right.



Fig. 1: Moving electron (blue) and thermally agitated localized magnetic moments (red arrows) close to the transition temperature $T_{\rm C}$ to long-range magnetic order. The distorted Kagome lattice of R_3 Ru₄Al₁₂ (R = rare earth) is shown on the left, while the triangular lattice of R_2 PdSi₃ is shown on the right. Adapted from Ref. [2].

Following this recent work, the present strategy of our research is twofold: (1) We aim to understand the effect of thermal fluctuations not only on the motion of electrons, but on other quasiparticle excitations such as phonons and spin waves. (2) We use electric currents to control the twisting of magnetic spins when thermal fluctuations are absent, striving to store information in a spiral magnet.

References

K. Kolincio, M. Hirschberger *et al.*, Procl. Natl. Acad. Sci. USA **118** (33), e2023588118 (2021)
 K. Kolincio, M. Hirschberger *et al.*, arXiv:2206.05756 (2022), submitted

Group HP: https://www.qpec.t.u-tokyo.ac.jp/hirschberger

分子線エピタキシー成長による人エネマティック構造の創製

A01 班 打田 正輝

分子線エピタキシー成長法は、高真空中で原料となる各原子・分子を精度よく供給することで、非常 に高品質な薄膜を作製する手法です。元は半導体の結晶成長法として大きな技術的進展を遂げました が、近年では様々な物質群の高品質薄膜を作製するために用いられるようになってきています。強い 電子相関と多自由度のために多彩な秩序相を示す遷移金属酸化物も例外ではありません。

図1に示すように、Ruddlesden-Popper ルテニウム酸化物(Sr_{n+1}Ru_nO_{3n+1})はRuO₂層数にあたる n の 違いにより様々な量子秩序相を示し、またそれらが非常にクリーンな試料で現れる点に特徴がありま す。私は、これまで電子ビーム加熱を利用した酸化物分子線エピタキシー成長の技術蓄積に取り組み、 n=1にあたる層状ルテニウム酸化物 Sr₂RuO₄について超伝導を示す薄膜の安定作製に初めて成功しま した[1]。その後の進展により得られた超伝導転移温度($T_{c,mid}=1.2$ K)は現在でも世界最高の値となって おり、これにより、上部臨界磁場をはじめとする Sr₂RuO₄ 薄膜の基礎的な超伝導特性の解明[2]や、 Sr₂RuO₄同士のジョセフソン接合の評価[3]等、薄膜ならではの研究を発展させてきました。

一方、n=2 にあたる二層ルテニウム酸化物 Sr₃Ru₂O₇ は磁場誘起の量子臨界点を示し、臨界点近傍に おいて四回回転対称性の破れを伴う電子ネマティック相が現れることが電気抵抗率の異方性等により 確認されています。この発見以降、高品質なバルク単結晶を用いた実験が続けられていますが、Sr₃Ru₂O₇ は他に類似した系も存在せず、ネマティック秩序の起源やドメインの形成機構等、多くの点が明らか になっていません。本公募研究では、この電子ビーム加熱を利用した酸化物分子線エピタキシー成長 により高品質な Sr₃Ru₂O₇ 薄膜やヘテロ構造を実現し、ネマティック相の起源解明とともに強相関遷移 金属酸化物を対象とした薄膜研究の新展開を目指したいと思います。



図 1: Ruddlesden-Popper ルテニウム酸化物 (Srn+1RunO3n+1=[SrO]n+1[RuO2]n)の結晶構造と量子相。

参考文献

[1] <u>M. Uchida</u>, M. Ide, H. Watanabe, K. S. Takahashi, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *APL Materials* **5**, 106108 (2017) [https://doi.org/10.1063/1.5007342].

[2] <u>M. Uchida</u>, M. Ide, M. Kawamura, K. S. Takahashi, Y. Kozuka, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *Physical Review B* **99**, 161111(R) (2019) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.161111].

[3] <u>M. Uchida</u>, I. Sakuraba, M. Kawamura, M. Ide, K. S. Takahashi, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *Physical Review B* **101**, 035107 (2020) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.035107].

研究室 HP: <u>http://uchida.phys.titech.ac.jp</u>

光磁気効果測定による液晶中のスピン拡散の機構解明

A01 班 内田幸明

第一期から引き続き、「分子の凝縮相の方の液晶相」における磁気特性に関する研究を進めて参りま す。そのため、本原稿では、本新学術領域で主に語られる量子的な「液晶」ではなく、分子の凝縮相や その材料としての元祖「液晶」の意味で用います。

筆者は、常磁性液晶に特徴的な磁気特性(磁気液晶効果)のメカニズムについて研究を展開していま す。2008年に結晶相から液晶相への転移における常磁性液晶の磁化率の増加を報告したのが、一連の 研究の最初の一報です[1]。その後、磁気相互作用の不均一性と、分子の並進・回転運動がこの現象の 起源であることを実験的に明らかにしました[2,3]。詳しい経緯はニュースレター第4号を御覧くださ い。

第一期では、常磁性液晶へのスピン注入について研究を行いました。まず、電子常磁性共鳴(EPR) 分光法と分子動力学シミュレーション、密度汎関数理論計算を組み合わせて、磁気液晶効果のメカニ ズムを説明することに成功しました [4]。特に、分子運動と分子間磁気相互作用の不均一性の相乗効果 によって、分子間相互作用がネットワークを形成しており、スピン注入に適した液晶であることが明 らかになりました。次に、PEEMを用いて、鉄薄膜から常磁性液晶へのスピン注入を検出することがで きました。

これらに加えて、第一期には、イオン部位をもつ NR 液晶(NR イオン液晶)の合成についても報告 しました [5]。以前、筆者はイオン液晶の配向制御による伝導度変化を見出しており [6]、NR イオン液 晶への局所的なスピン注入とスピン拡散が起これば、イオン伝導が誘起されると予測しました。これ を確かめるには、局所的なスピン注入の制御、測定に適した NR イオン液晶の合成、測定系の構築等が 必要です。

第二期の二年間では、NR イオン液晶に対して光照 射による局所的なスピン注入を行い、一方向へのス ピン拡散が起こる際に生じる起電力スペクトルを観 測することで、実験的に NR 液晶中にスピン拡散が 起こることを確かめ、その機構を明らかにします。 室温付近において液晶相を示す NR イオン液晶の設 計・合成から始めて、光によるスピン注入が可能な 材料系を設計・実現し、磁場中の光照射下で電圧を 測定する実験系の構築することで、スピン拡散の検 出を目指します(図 1)。



図 1: NR イオン液晶における光誘起スピン注入によって生じる起電力の測定

[1] <u>Y. Uchida</u>, N. Ikuma, R. Tamura, S. Shimono, Y. Noda, J. Yamauchi, Y. Aoki and H. Nohira, *Journal of Materials Chemistry* **18**, 2950 (2008) [https://doi.org/10.1039/B801704B]

[2] <u>Y. Uchida</u>, K. Suzuki, R. Tamura, N. Ikuma, S. Shimono, Y. Noda and J. Yamauchi, *Journal of the American Chemical Society* **132**, 9746 (2010) [https://doi.org/10.1021/ja101930d]

[3] S. Nakagami, T. Akita, D. Kiyohara, <u>Y. Uchida</u>, R. Tamura and N. Nishiyama, *The Journal of Physical Chemistry B* **122**, 7409 (2018) [https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.8b03839]

[4] <u>Y. Uchida</u>, G. Watanabe, T. Akita and N. Nishiyama, *The Journal of Physical Chemistry B* **124**, 6175 (2020) [https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.0c05408]

[5] <u>Y. Uchida</u>, T. Sakaguchi, S. Oki, S. Shimono, J. Y. Park, M. Sugiyama, S. Sato, E. Zaytseva, D. G. Mazhukin, R. Tamura, *ChemPlusChem* 87, e202100352 (2022). [https://doi.org/10.1002/cplu.202100352]

[6] <u>Y. Uchida</u>, T. Matsumoto, T. Akita, N. Nishiyama, *Journal of Materials Chemistry C* **3**, 6144-6147 (2015). [https://doi.org/10.1039/C5TC00314H]

http://www.cheng.es.osaka-u.ac.jp/nishiyamalabo/research/325.html

内田幸明(大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授)

界面に誘起されるトポロジカル磁気構造の微視的機構解明

A01 班 松野 丈夫

我々の研究室では遷移金属酸化物の薄膜合成を通して物質の対称性・次元性を制御し、新物質開発・ 新規物性開拓を行っています。二種類の薄膜が接する界面は多様な物性の舞台であり、単一の物質か らは期待できないような新しい物性が生じる可能性があります。本領域で私が担当するのはナノスケ ールのトポロジカル磁気構造である「スキルミオン」を構成単位とした量子液晶の探究です。磁性体中 のトポロジカル欠陥であるこのスキルミオンは、微小な電流で駆動できることから省電力デバイスの 構成要素として期待されています。

スキルミオンを生成する機構の中で最も有力視 されているのがジャロシンスキー-守谷 (DM) 相互 作用で、これが強磁性体のスピンをひねることでス キルミオンが安定化されます。界面では空間反転対 称性が必ず破れますので、強磁性体にスピン-軌道 相互作用の強い物質を組み合わせた界面では界面 由来の DM 相互作用が期待できます。我々は強い スピン-軌道相互作用を持つ物質としてイリジウム 酸化物を用い、トポロジカルホール効果という新し いホール効果を観測することで界面 DM 相互作用 とスキルミオンの存在を提唱しています [1,2]。本 研究領域ではこの構造に面内異方性を導入するこ とによる液晶状態の実現と、そこでのスキルミオン のダイナミクスと DM 相互作用を明らかにするこ とを目標としています。

スピン-軌道相互作用の強い物質と強磁性体との 界面がスキルミオン以外にも広くスピントロニク スの舞台となっていることは良く知られています。 最近の我々の研究として、イリジウム酸化物 IrO₂と 強磁性体金属との界面を舞台として、IrO₂が電流を 効率よくスピン流に変換する物質であることを示 しました(図 2) [3,4]。これらの研究は薄膜作成、 微細加工を通して本研究テーマとも密接に結びつ いております。



図1:界面ジャロシンスキー-守谷(DM)相互作用。



図 2:IrO2のスピン軌道トルクの膜厚依存性。IrO2のス ピンホール角が 0.09 と Pt と同程度に大きいことを示 す。

参考文献

- J. Matsuno, N. Ogawa, K. Yasuda, F. Kagawa, W. Koshibae, N. Nagaosa, Y. Tokura, and M. Kawasaki, Science Advances 2, e1600304 (2016) [https://doi.org/10.1126/sciadv.1600304].
- [2] Y. Ohuchi, <u>J. Matsuno</u>, N. Ogawa, Y. Kozuka, M. Uchida, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *Nature*. *Communications* 9, 213 (2018) [https://doi.org/10.1038/s41467-017-02629-3].
- K. Ueda, N. Moriuchi, K. Fukushima, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, Physical Review B 102, 134432 (2020) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.134432].
- [4] K. Ueda, N. Moriuchi, K. Fukushima, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, Physical Review Applied 16, 034039 (2021) [https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.034039].

研究室 HP: http://interface.phys.sci.osaka-u.ac.jp

松野 丈夫 (大阪大学・理学研究科・教授)

軌道自由度による超構造を用いた量子液晶状態の探索

A01 班 勝藤 拓郎

d電子やf電子のように局在した電子の場合、エネルギーが同じになる軌道のどれを占有するかという自由度があり、軌道の自由度と呼ばれます。これは、軌道に電子があるかないかの自由度(電荷の自由度)、電子のスピンの方向の自由度(スピンの自由度)に加えて第3の自由度と考えることができます。このような自由度は低温では秩序化することが知られています。例えば低温で電子のスピンの方向が揃うのが磁気秩序であり、電子のスピン間に同じ方向に向いた方がエネルギーが低くなるといった磁気的相互作用に由来します。同様に軌道の自由度も低温で秩序化、すなわち隣り合う原子で異なる軌道が占有されたりする状態となることがあり、軌道秩序と呼ばれます。これも、軌道間の相互作用に由来しますが、スピン間の相互作用と同じく、ある原子の電子を隣の原子に移した際の電子どうしのクーロン反発とパウリの排他律が元となっています。結果として軌道秩序と磁気秩序の間にはカップリングがあり、様々な物性を生み出すことができます。

1つの例として、最近我々は、Vのd電子が軌道秩序を示す BaV10O15という物質において、軌道秩序への相転移がスローダイ ナミクスを示すことを見出しました[1]。これは核生成-核成長プロ セスとよばれるものであり、気体から液体への相転移、液体から固 体への相転移においてしばしば観測されているものです。しかし、 軌道秩序のような固体中の相転移でこれが観測される例はほとん どありません。核生成-核成長プロセスは、2つの相(高温相と低 温相)の間の界面エネルギー(表面張力)によって支配されますが、 固体中で高温相(無秩序相)と低温相(秩序相)の間のエネルギー が他より高くなる理由があまりないからです。しかし、軌道秩序の 場合は、磁気的な相互作用が軌道秩序の状態によって変化するこ とに由来して、「軌道秩序-軌道秩序」や「軌道無秩序-軌道無秩序」 の間ではスピンが磁気的相互作用に沿って配列するが「軌道秩序-軌道無秩序」の間ではスピンが磁気的相互作用に沿って配列でき ないことが起こり得て、これが界面エネルギーを引き起こすと考 えられます。

これ以外に *d* 電子の軌道秩序がエキゾチックな物性を示す例として、La₅Mo₄O₁₆ があります。この物質では、軌道秩序に伴って、隣り合うスピンが互いに反対を向く反強磁性から同じ方向を向く強磁性



図 1:(上) 縮退した d 軌道の 様子 (下) BaV10O15 系におけ る歪の時間依存性

に磁性が変化をします。強磁性において「同じ方向」は上でも下でもよいため、「全て上向き」「全て 下向き」の部分ができて、磁気ドメインと呼ばれます。この磁気ドメインの間(=ドメイン壁)に電気 が流れやすいことを、磁場中での電気抵抗率の変化から実験的に見出し、また理論的にもこのような ドメイン壁伝導が起こることを確認しました[2]。このように軌道自由度は様々な超構造をつくること ができ、これによって「軌道液晶」の創成も可能ではないかと考えます。

参考文献

[1] <u>T. Katsufuji</u>, T. Kajita, S. Yano, Y. Katayama, K. Ueno, *Nature Communications* **11**, 2324 (2020).
[<u>https://doi.org/10.1038/s41467-020-16004-2</u>]
[2] T. Katsufuji *et al.*, *Phys. Rev. Research* **3**, 013105 (2021).

[22] <u>1. Kalsuluj</u> et al., 1 hys. Rev. Research **3**, 015105 (2021). [https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013105]

研究室 HP: http://www.f.waseda.jp/katsuf/lab/index.htm

氏名 勝藤 拓郎(早稲田大学・理工学術院・教授)

カゴメ遍歴磁性体における強磁場誘起量子液晶相の微視的研究

B01 班 井原慶彦

「量子液晶の物性科学」解明を目指す新学術研究に第2期から参加することになりました。今後さらに加速していくこの研究分野に関わることができて大変うれしく思います。私たちのグループでは電子物性を「微視的」な視点から観測することができる核磁気共鳴分光法を主な研究手段とした研究を行っています。核磁気共鳴分光法とは、その名の通り物質を構成する原子核を測定プローブとして利用し、原子核を取り巻く電子の性質を観測する測定手段です。原子核が持つ核磁気モーメントと電子の磁気モーメントが弱く結合しているという性質を使うことで、本研究で注目する量子液晶状態など奇妙な電子状態をミクロな視点から観測することができるのです。

さて、本研究で測定対象とする物質は Kagome ネットワークという独特な原子の配列を持っていま す。Kagome とは「籠目」であり、竹細工の籠によくみられる網目の構造が名前の起源になっています。 規則正しく作られた幾何学的な籠の模様は確かに周期性を持っているので、結晶構造の一つとして実 現したとしても不思議はありませんが、古来から日本に伝わる竹細工の模様が磁性体中で実現してい て、その構造に最先端の物理が隠されていたという事実は驚きです。Kagome ネットワークは3角形を 基本とした構造を持っています。このような3角形の上に磁気モーメントを配置すると、人間関係に 時々見られる三角関係と同様に、あちらを立てればこちらが立たず、という葛藤(フラストレーショ ン)が生まれます。そして、フラストレーションがたまった磁気モーメントは唯一の最適なエネルギー 状態を見つけることが出来ず、極低温においてもふらふらと揺らぎ続けることになります。このよう な「ふらふら」とした電子状態は量子効果が顕著に現れる可能性を秘めており、最適な研究舞台となる のです。本研究では、さらに電子が自由に移動(遍歴)できるようにし、よりふらふらとした状態が実 現しやすい状況を作り出します。

フラストレーションがたまった 電子状態を実現することで、よう やく本研究の第一段階が達成され ました。しかし本研究の本当の狙 いは、このような不安定な電子状 態を外から意図的に操作して、未 知の量子状態を安定化させるとこ ろにあります。特に、非常に強い磁 場を使うことで連続的に電子状態 を操作し、最終的な安定状態に行 きつくまでの過程で次々と現れる 量子状態を微視的に調べていきま



図1:Kagomeネットワークにおいて、遍歴性を導入することで電子状態を不 安定化させ、磁場をかけることで再び安定化させる。強磁場中で特異な量 子状態を実現させ、それを微視的な測定手段で観測することを目指す。

す。このために必要となるのが、「パルス強磁場中核磁気共鳴」測定です。[1]パルス強磁場とは、30 分の1秒程度のほんの一瞬だけ非常に強力な磁場を発生させる技術のことです。このような短時間の 間に核磁気共鳴測定を行うことは一般的には困難ですが、私たちの研究室では最新のパルス磁場発生 技術[2]と核磁気共鳴測定技術を融合させることで、このような特殊な測定が可能となっています。私 たちの持つ先進測定技術で奇妙な量子状態の観測に挑んでいきます。

参考文献

[1] <u>Y. Ihara</u>, K. Hayashi, T. Kanda, K. Matsui, K. Kindo, and Y. Kohama, *Review of Scientific Instruments* **92**, 114709 (2021) [https://doi.org/10.1063/5.0067821].

[2] Y. Kohama, and K. Kindo, Review of Scientific Instruments 86, 104701 (2015) [https://doi.org/10.1063/1.4931689]

スピン流でプローブする鉄系超伝導体の電子ネマティック秩序

B01 班 塩見雄毅

この新学術領域には前期の公募研究から参加させて頂いております。これまではコロナ禍でオンラ インの会議ばかりでしたが、逆に言えば身体を移動させることなく色んな会議に参加することができ、 量子液晶に関する最先端の研究成果についてたくさん学ぶことができました。色んな話を聞く中で、 量子液晶の舞台として最も典型的な物質の一つが鉄系超伝導体であることを知りました。非自明な回 転対称性の破れが、高い超伝導転移温度をもつ超伝導物質で見られることは大変興味深いと感じまし た。私のもともとの公募研究課題は鉄系超伝導体に絡んだものではありませんでしたが、多くのプロ ーブで鉄系伝導体の実験・理論研究がなされるのを目の当たりにするなかで、私もこの分野に自分の 得意技術を用いて貢献してみたいと思うようになりました。

私が得意とする実験技術であるスピン流注入は、物質のスピンゆらぎに敏感であるという性質をも っことが知られています[1]。スピン流とは簡単には磁気の流れであり、電荷を伴わないスピン角運動 量の流れを指します。電流と異なりスピン流は保存せず、(回転するコマが止まるように角運動量は緩 和して)スピン流はすぐに消失してしまいます。注入されたスピンの向きは物質中のスピンゆらぎに より乱されることから、スピン流注入の効率を計測することで、鉄系超伝導体のスピンゆらぎに対し て知見が得られると考えました。電荷/軌道ゆらぎとスピンゆらぎのどちらがネマティック秩序の形成 に主要な役割を果たすかについては双方を支持する実験・理論があるようです。既に中性子や NMR を 用いた測定により鉄系超伝導体におけるスピンゆらぎの影響が研究されていますが、スピンゆらぎに 敏感な新たなプローブとしてスピン流技術を用いることで、これまでの結果を補完して新たな知見が 得られると期待しています。

幸運なことに、私の研究室の隣には前田京剛先生の研究 室があり、鉄系超伝導体の良質な薄膜試料が作製されてい ます。前田研では FeSe に S や Te をドープした薄膜試料も 系統的に研究されており、超伝導転移温度やネマティック 転移温度の変化のみならず、共同研究も含めて様々な物性 が計測されています[2,3,4]。スピン流は保存せずすぐに拡散 してしまうことから、スピン流注入の研究にはナノスケー ルの厚さをもつ薄膜試料が欠かせません。スピン流注入の スピン流源となる強磁性体との接合を作るには試料表面の



図 1:研究のコンセプト

劣化を抑える必要もあり、良質な試料をすぐに私の研究室に移送できる環境にあることは私の研究計 画の立案を後押ししてくれました。

少し調べてみると、FeSe に S や Te をドープした試料においてはネマティック秩序だけでなく、他 にも様々な面白い物性が見られます。例えば、S をドープした試料では低温で磁性が発現することが知 られています[3]。また、Te をドープした試料はトポロジカル物質になるという話もあります[4]。これ らの性質も本研究で計画するスピン流注入に対して何らかの影響を与えることが期待されます。この ように鉄カルコゲナイド超伝導体はスピン流物性の観点からも興味深い物性の宝庫であると考えられ、 どのような研究展開が見られるか、とてもわくわくしています。

[1] S. Maekawa et al. J. Phys. Soc. Jpn. 82, 102002 (2013) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.102002].

- [2] S. Kouno et al. Sci. Rep. 8, 14731 (2018). [https://doi.org/10.1038/s41598-018-33121-7]
- [3] F. Nabeshima et al. Phys. Rev. B 103, 184504 (2021). [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.184504]

[4] P. Zhang et al. Science 360, 182-186 (2018) [DOI: 10.1126/science.aan4596]

研究室 HP: https://yukishiomi.com/

塩見雄毅(東京大学·総合文化研究科·准教授)

空間変調することで強磁場でも生き残る超伝導状態

B01 班 今城周作

1911年の超伝導発見以来のこの約100年間、数多の研究者が超伝導の根源的理解に挑戦してきました。数え切れないほどの実験・理論の研究が為され、理論的提案の実証や新しい超伝導体の発見などの ブレイクスルーによって理解が着実に進んできました。大きなマイルストーンとしては、超伝導の基礎的理解を与えた BCS 理論(1957年)、BCS 理論の枠組みから逸脱した銅酸化物高温超伝導(1986年)、 また最近では超高圧下水素化物で室温に迫る高温超伝導の実現(2015年)、等が例として挙げられます。 しかし、超伝導状態の根源的な理解には未だ遠く及ばず、謎は多く残っています。

本課題では、1964年にFulde & Ferrell と Larkin & Ovchinnikov が独立で同年に理論的提案をした奇妙 な超伝導状態に関して研究を行う予定です。この状態は FFLO 超伝導と呼ばれ、BCS 理論で示された 同じ運動量をもった電子同士の対形成とは違い、図 1(a)のように異なった運動量をもった電子間で対 形成します。そうすると電子のペアがもつ合計の重心運動量はゼロにならず、面白いことに実空間で は図 1(b)のように超伝導と常伝導が周期変調した状態となります。BCS 超伝導は強磁場を印加すると 電子対が引き千切られ壊れますが、一方 FFLO 状態では、この有限の重心運動量の助けによって磁場 による破壊を免れ、強磁場でも超伝導状態として生き残ることができます。FFLO 状態に関して多くの 理論研究が行われ、様々な提案がされてきましたが、しかしながら、実験では技術的に実証が難しく、 50 年以上経った今でも空間変調状態を直接観測するような核心的な実験結果は得られていません。

私はこれまで有機分子のπ電子が作る超伝導の研究を行なってきました。特異な分子形状をもつ有機 物は不純物の混入が少なく、また、分子形状に起因した層状結晶構造は FFLO 状態の安定化に有利と 考えられており、実際に私もこれまで FFLO 状態と考えられる超伝導相を示す有機超伝導体の研究を 行ってきました[1-4]。本研究ではこれら候補物質で FFLO 状態の空間変調性を検出することを目標に、 低温強磁場中で精密に磁場角度を制御しながら複数の方向から超音波を流し、音波応答の方向依存性 からどのように空間変調しているかを議論しようと考えています。空間的に均一な BCS 超伝導は電子

対の流体として捉えられますの で、空間変調のある FFLO 超伝 導は電子対の液晶の枠組みで考 えることができます。流体、液 晶、固体中で音速に違いがある ように、音波が FFLO 状態を進 む際、実空間で変調するパター ンに対して音波の変位方向が平 行か垂直かで音速は異なると判 袴できます。このように電子対 液晶の関点から FFLO 状態の空 間変福の理構築へと繋げてい きたいと思っています。



図1: FFLO 超伝導状態の模式図。(a) 波数空間上での電子対を示し、k+q/2 と-k+q/2 の電子対形成により有限の重心運動量 q をもつ。(b) 実空間上での FFLO 状態を示し、有限の q により秩序変数 Δ が空間変調し、超伝導と常伝導 が周期的に現れる。

参考文献

- [1] <u>S. Imajo</u> et al., J. Phys. Soc. Jpn, 87, 123704 (2018). [https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.123704]
- [2] S. Imajo et al., Phys. Rev. B 103, L220501 (2021). [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.L220501].
- [3] <u>S. Imajo</u> and K. Kindo, *Crystals* **11**, 1358 (2021). [https://doi.org/10.3390/cryst1111358]
- [4] <u>S. Imajo</u> et al., arXiv:2110.12774 [https://arxiv.org/abs/2110.12774].

研究室 HP: https://kindo.issp.u-tokyo.ac.jp/

今城周作(東京大学・物性研究所・特任助教)

強い磁場と単結晶で解明する量子スピンの液晶

B01 班 石川孟

東京大学物性研究所国際超強磁場科学施設の金道研究室で助教をしています石川孟です。公募研究 では、量子スピンの液晶とよばれる"スピンネマティック状態"におけるスピン相関の検証に取り組み ます。私は無機化合物の試料合成とパルス強磁場中での物性測定を研究の軸にしています。

パルス強磁場は、ミリ秒オーダーの非常に短い時間に 60 テスラ程度の強い磁場を発生させる手法 で、一般的な超伝導磁石では到達できない磁場領域に隠された電子状態を研究するのに非常に役立ち ます。研究対象とするスピンネマティック状態はその典型的な例で、フラストレート磁性体に磁場を かけてスピンが完全にそろう直前に現れると考えられています。スピンネマティック状態に由来する 磁化の変化や格子の歪みを、ピックアップコイルを用いた磁化測定と最近開発された光ファイバーを 用いた磁歪測定技術によって検出することが研究の第一目的です。さらに、この手法を用いて新しい 量子スピン液体候補物質の研究も展開したいと考えています。

研究対象とする物質は、30 テスラ程度の磁場中でスピンネマティック状態を示すと考えられている ボルボサイト(写真左)や、ハニカム格子系スピン液体候補物質ヨウ化サマリウム(写真中央)を予定して います。特に、ボルボサイトでは異なる軸方向に伸びた結晶が得られています。これは光ファイバー を使った磁歪測定と相性が良く、様々な軸方向の磁歪を測定することが出来ると期待しています。



(左) 水熱法により合成したボルボサイト単結晶。色や形が異なるがすべて同じ物質である。 (中央) 昇華法で作製したヨウ化サマリウムの単結晶。(右) 物性研究所金道研究室の集合写真。

私が所属する研究室(写真右)は、日本で唯一パルスマグネットを作っている研究室です。私(右から 4番目)は磁性体を中心にパルス強磁場を使って無機化合物の物性を開拓しています。もう一人の助教 の今城さん(左から2番目)もB01班のメンバーで、有機超伝導体を中心に強磁場物性の研究をしてい ます。スタッフが多彩なバックグラウンドをもっているため、何かしら自分の興味のある研究に取り 組むことが出来るという点で実験が好きであれば楽しめるはずです。この他にも物性研究所の強磁場 施設には3つの研究室があり、素晴らしい研究環境が整っていますので、大学院の進学先としておす すめです。

研究室 HP: https://mgsl.issp.u-tokyo.ac.jp/

石川孟(東京大学・物性研究所国際超強磁場科学施設・助教)

光を使って量子液晶物質の対称性の破れを観測しよう

B01 班 米澤進吾

京都大学理学研究科の米澤と申します。私はこれまで、比 熱・磁化率・電気抵抗などの測定に力を入れてきましたが、 最近は光技術を使った測定手法の導入にもチャレンジして います。本稿ではそれらの光技術研究手法を紹介したいと思 います。

我々が取り組んでいる一つ目の手法は Fiber Bragg grating (FBG)を使ってひずみを測定するという手法です。FBGと は、光ファイバーのコア部分に作られた、屈折率 n の周期変 調のことです(図1)。周期的な変調があると、そこではブ ラッグ反射が起こり、周期変調の周期 d に対応した波長の光 (より正確にはブラッグ波長 $\lambda_{\rm B}=2nd$ の波長の光)が反射さ れることになります。さて、この FBG を試料に貼り付けた らどうなるでしょうか。この場合、試料のわずかな伸び縮み に引きずられて FBG も伸び縮みし、変調周期 d が変化する ので AB も変わります。したがって、FBG から反射される光 の波長の変化を調べることで、試料の伸び縮み(ひずみ)を 調べることができるのです[1]。この手法の大きな特徴の一つ は、一本のファイバーに複数のFBG センサーを作れる点で、 これによって複数の方向のひずみを同時に測定することが 可能です。すると、量子液晶系で重要な「回転対称性の破れ」 を格子ひずみを通じて検出することができます。我々は超伝 導体や磁性体など、興味深いひずみ現象を示す量子液晶物質 の研究を進めています。







もう一つの手法は、磁気光学カー効果を用いた時間反転対称性(Time-reversal symmetry; TRS)破れ の研究です。TRS とは、「時間を逆回しにしたときに同じ状態とみなせるかどうか」ということです。 強磁性体が「TRS の破れた状態」の典型ですが、一部の超伝導や電荷秩序などでもTRS が破れる場合 があります。このような非自明なTRS 破れに我々は興味を持っていますが、これを測定するのは簡単 ではありません。当研究室では、反射の際に偏光方向の変化が生じるという磁気光学カー効果(図 2) を用いてTRS の破れを高感度検出する装置を立ち上げています。Loop-less Sagnac 干渉計[2]という特 別なセットアップを用いることで、10⁶ ラジアン(~6×10⁵ 度)を超えるような分解能でカー回転角 を測定することができます。我々の研究室で立ち上げた装置で、CsV₃Sb₅という物質の電荷秩序相にお いて自発的なカー回転が起きることを最近明らかにしています[3]。今後この装置を用いて量子液晶物 質の示す非自明なTRS 破れを検出し、研究展開の重要な一翼を担うことを目指します。

参考文献

[1] Review として、M. Jaime et al., Sensors 17, 02572 (2017). [DOI:<u>10.3390/s17112572</u>]

[2] J. Xia et al., Phys. Rev. Lett. 97, 167002 (2006). [DOI:10.1103/PhysRevLett.97.167002]

[3] Y. Hu, <u>SY et al.</u>, submitted (2022); [https://www.researchsquare.com/article/rs-1794207/v1].

研究室 HP: <u>https://ss.scphys.kyoto-u.ac.jp</u>

米澤進吾(京都大学・理学研究科・准教授)

量子スピン液体における回転対称性の破れとトポロジカル相転移

B01 班 末次祥大

物質中の局在スピンは絶対零度において通常は強磁性や反強磁性などの秩序状態を示します。しか し、強い量子ゆらぎやフラストレーションが存在する系では局在スピンが絶対零度においても液体の ように相関しながら揺らいでいるといった、スピンの"液体"状態を実現することがあります。このよう

な量子スピン液体では本来のスピンが持つ自由度があたかも分裂 したかのように振る舞い(分数化)、風変わりな性質を持った低エ ネルギー励起(準粒子)が現れます。

その中でもハニカム格子上のスピンがボンド方向に依存したイ ジング型の相互作用をするキタエフ模型[1]は厳密な基底状態と して量子スピン液体を実現するため大きな注目を集めています。 キタエフスピン液体では局在スピンの自由度がマヨラナ粒子とい った、自らが自身の反粒子として振る舞う風変わりな粒子に分数 化するといった非常に興味深い性質を持ちます(図 1)。

このキタエフスピン液体はスピン軌道モット絶縁体で実現でき ると提案[2]されており、有力な候補物質としてα-RuCl₃が知られ ています。この物質は J_{eff} = 1/2 のモーメントを持った Ru³⁺イオン によって形成された二次元ハニカム格子が積層した結晶構造を取 ります。最近、このα-RuCl₃のスピン液体状態において熱ホール 伝導度が半整数量子化を示すことが報告されました[3]。これはマ ヨラナ粒子のエネルギーバンドが非自明なチャーン数を持ったト ポロジカルな状態を実現し、マヨラナ粒子のカイラルエッ ジ流が存在していること示しています。さらに、最近の比熱

の面内角度依存性測定[4]では高磁場下で結晶の対称性を破るネマティック相が現れることも示唆されています。

以上のように α -RuCl₃はトポロジーとネマティックの関係性を探索する格好の舞台であり、この公募研究ではそれらがどのように関係しているのかを明らかにすることを目的に研究を進めています。最近我々は熱伝導・比熱測定の磁場依存性を精密測定することで磁場誘起の一次相転移が存在することを見出しました(図 2)[5]。さらに、この一次相転移が生じる磁場は、同一試料で測定された熱ホール伝導度が半整数量子化値からズレ始める磁場と非常に近いため、一次相転移がトポロジーに影響を与えていることを示唆しています。今回観測された相転移は上述したネマティック相と関係している可能性もありますが、その性質はいまだはっきりしていません。現在は磁場角度依存性の測定から α -RuCl₃におけるトポロジーとネマティックを明らかにすることを目的に引き続き研究を進めています。

- [1] A. Kitaev, Annals of Physics **321**, 2 (2006).
- [2] G. Jackeli and G. Khaliullin, Phys. Rev. Lett. 102, 017205 (2009).
- [3] Y. Kasahara et al., Nature 559, 227 (2018).
- [4] O. Tanaka et al., Nat. Phys. 18, 429–435 (2022).
- [5] <u>S. Suetsugu</u> et al., arXiv:2203.00275 (2022).



図 1:キタエフ模型におけるマヨラナ 粒子の分数化



図 2:一次相転移と熱ホール伝導度[5]

末次祥大(京都大学・理学研究科・助教)

3色超格子における超伝導ダイオード効果の探索

B01 班 浅場 智也

我々の身近にある、金属や絶縁体といった物質を研究する分野を物性物理学といい、その内容は多 岐にわたります。その中でも、一番ドラマティックな現象の一つが超伝導であることは間違いないで しょう。超伝導とは物質の抵抗値がゼロになる現象であり、1911年にカメリン・オンネスによって発 見されました。超伝導状態にともなって、磁気浮上に使えるマイスナー効果や、電圧の基準を規定する ジョセフソン効果など、基礎的にも応用的にも重要なさまざまな現象が発現します。この超伝導体の 研究における現代の最重要課題として、高温超伝導体の超伝導機構解明やトポロジカル超伝導の実現

といったものが挙げられますが、それらと並んで重要な 課題となっているのが「BCS 理論を超える有限運動量超 伝導状態の実現」です。

超伝導状態の基礎的な理解は、1957年、バーディン、 クーパー、シュリーファーの3名によってなされました (BCS 理論)。この理論では、超伝導状態は、運動量と スピンが正反対である2つの電子がペアを組み(クーパ ーペア)、ひとつの粒子であるかのように振る舞うこと で実現します。しかし、この理論の枠組みを超える超伝 導状態として、2つの電子の運動量の和がゼロではない (すなわち有限の)超伝導状態も理論的に提案されてい ます。本研究ではその一つ、「ヘリカル超伝導」につい て着目します。



図1:CeCoIn5超格子の模式図

これまでの研究で、ヘリカル超伝導状態は CeCoIn₅、

YbCoIn₅、YbRhIn₅を交互に積層させた超格子において実現しているのではないか、と考えられてきま したが[1]、実験手法が限られることから、その決定的な証拠を掴むことは困難でした。しかし最近、 この系では「超伝導ダイオード効果」が発現していて[2]、それを測定することでヘリカル超伝導状態 を判別することができる、ということが理論的に提唱されました。超伝導ダイオード効果とは、超伝導 体において電流方向を変化させると超伝導臨界電流もそれにともなって変化し、ある方向に電流を流 すと超伝導状態なのに逆方向だと超伝導状態が破壊され、常伝導状態になる現象のことです。

本研究では、CeCoIns/YbCoIns/YbRhInsの三色超格子を作製し、その超伝導ダイオード効果を観測することで、ヘリカル超伝導状態の決定的な証拠を掴むことを最終的な目的とします。また、この測定手法は超伝導状態における他の量子液晶状態への応用も期待されており、新たな量子液晶検出技術として確立できることを目指しています。

参考文献

[1] M. Naritsuka et al., Phys. Rev. B 96, 174512 (2017)

[2] Akito Daido, Yuhei Ikeda, and Youichi Yanase Phys. Rev. Lett. 128, 037001 (2022)

研究室 HP: https://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php/

浅場 智也(京都大学・理学研究科・特定准教授)

電子ネマティック状態におけるドメイン構造の可視化と制御

B01 班 中島 正道

固体中の電子の集団が結晶構造にはない方向性を獲 得した状態は「電子ネマティック状態」と呼ばれていま す。この状態の背景にある電子状態の解明や、外部刺激 による制御可能性の追求は、物性物理学の重要な課題に なっています。電子ネマティック状態の主要な研究対象 である鉄系超伝導体の結晶構造は正方晶で、物理現象の 舞台となる FeAs 層や FeSe 層には四回回転対称性が存在 しています。電子ネマティック状態では、電子系が結晶 軸から 45 度傾いた方向を向きたがり、二回回転対称性 が現れます(図 1)。鉄系超伝導体では、ほとんどの場 合、電子系が結晶格子を引きずり、正方晶から直方晶へ の構造相転移が起こります。その一方で、構造相転移を 伴わない純粋な電子ネマティック状態の存在も、 BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂という物質で報告されています[1,2]。

結晶格子や電子系の回転対称性の低下により、場所に よって方向性が異なるドメイン構造が形成されます(図 1)。私は以前、鉄系超伝導体の直方晶相における電子状 態の異方性を研究していました[3,4]。異方性を調べるた めにはドメインを揃える必要があったため、当時は、一



図 1:構造相転移やネマティック転移に伴う、四 回回転対称性の破れ。回転対称性の低下によ り、ドメイン構造が生じる。電子ネマティック状態 では、結晶格子の四回回転対称性を保ったま ま、電子系に異方性が現れる(灰色の楕円)。

方向に力を加えながら試料を冷却していました。大きな単一ドメインの試料を得ることができるので、 広く用いられている方法です。しかし、力をかけること自体が結晶格子の回転対称性を破ってしまう ため、この方法では純粋な電子ネマティック状態を調べることはできません。別の方法によるアプロ ーチを考えなければなりません。

純粋な電子ネマティック状態を見るためには、電子の集団の持つ方向性が、試料内でどのように分 布しているかを知る必要があります。電子系の方向性の空間分布が調べられる測定を行って、写真を 撮るかのようにして、ドメイン構造を可視化するわけです。私は、精密な反射率測定によって、鉄系超 伝導体における電子ネマティック状態のドメイン構造の可視化に挑戦しようと思っています。これま でにやられていない、新しい測定手法です。ドメイン構造が可視化できれば、ドメインを揃えたり反転 させたりするやり方を調べることができます。また、歪みを組み合わせた実験で、電子ネマティック状 態の揺らぎについても情報が得られると期待しています。電子ネマティック状態の研究が行われてい る興味深い物質は鉄系超伝導体以外にもありますので、将来的には物質の幅を広げて、研究を展開し ていきたいと考えています。

参考文献

S. Kasahara, H. J. Shi, K. Hashimoto, S. Tonegawa, Y. Mizukami, <u>T. Shibauchi</u>, K. Sugimoto, T. Fukuda, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, and Y. Matsuda, *Nature* 486, 382–385 (2012). [https://doi.org/10.1038/nature11178]
 T. Shimojima, Y. Motoyui, T. Taniuchi, C. Bareille, S. Onari, <u>H. Kontani, M. Nakajima, S. Kasahara, T. Shibauchi</u>, Y. Matsuda, and S. Shin, *Science* 373, 1122–1125 (2021). [https://doi.org/10.1126/science.abd6701]
 <u>M. Nakajima</u>, T. Liang, S. Ishida, Y. Tomioka, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, <u>H. Eisaki</u>, T. Kakeshita, T. Ito, and S. Uchida, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108, 12238–12242 (2011). [https://doi.org/10.1073/pnas.1100102108]
 <u>M. Nakajima</u>, S. Ishida, Y. Tomioka, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, T. Ito, T. Kakeshita, <u>H. Eisaki</u>, and S. Uchida, *Phys. Rev. Lett.* 109, 217003 (2012). [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.217003]

磁場による電子対液晶状態の制御 及び物性の精密測定

B01 班 鄭国慶

筆者のグループではスピン三重項超伝導の探索やその物理の開拓を行っている。古くから強い電子間相互作用をもつ系がスピン三重項超伝導の舞台として期待され、ウランを含む f 電子系が今も大きな話題を集めているが、最近我々は 3d 電子の Cr を含む K₂Cr₃As₃ が超流動 ³He の 3 次元固体版とも言うべきスピン三重項超伝導体であることを明らかにした[1]。Cr は元素周期律表で高温超伝導体のかな

めである Cu や Fe と同じ行に位置することからも興味深い。 一方、近年ではスピン軌道相互作用の重要性が明らかにな りつつある。Li₂Pt₃B や Cu_xBi₂Se₃は弱相関系であるが、スピ ン三重項状態が実現している[2,3,4]。

スピン三重項超伝導状態は一重項状態と違って、ベクト ル秩序変数(dベクトル)によって記述される。dベクトル のピン止めが起こると、超伝導状態の物性が異方的になり、 電子液晶的な様相を呈する[5]。また、内部自由度に起因し て多重秩序相が現れる。これらの詳細を明らかにしようと するのが本応募研究課題の主目的である。さらに、電子の

フェルミ統計性の要請から、スピン三重項超伝導の軌道関

数は奇パリティを有する。また、時間反転対称性を破ることがある。そのため、波動関数がトポロジカ ル的に非自明になり[5]、量子計算にとって有用である。

図1にトポロジカル絶縁体に電子をドープした Cu_xBi₂Se₃の電子 対液晶の性質を示す。dベクトルが本来なら3回対称の面内である 特定方向にピン止めされているため、スピン磁化率が2回対称性 を示す[3]。また、電子ドープ量が増えると、dベクトルの向きが変 わる[4]。

図2に強磁性的なスピンゆらぎが強い電子系 K₂Cr₃As₃の超伝導 相図を示す。低磁場では d ベクトルが結晶の c 軸方向に向いてい るが、高磁場では面内に向く。この系の超伝導転移温度が 6.5K で、 "高温"スピン三重項超伝導体と言える。また、時間反転対称性が 破れる証拠があり、ワイル超伝導体とも呼べる。

参考文献

 [1] J. Yang, J. Luo, C.J. Yi, Y.G. Shi, Y. Zhou and <u>G.-q. Zheng</u>, Sci. Adv. 7, eabl4432 (2021).
 [https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4432]



- [3] K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando and <u>G.-q. Zheng</u>, Nat. Phys. **12**, 852 (2016). [https://doi.org/10.1038/NPHYS3781]
- [4] T. Kawai, C.G. Wang, Y. Kandori, Y. Honoki, K. Matano, T. Kambe, <u>G.-q. Zheng</u>, Nat. Commun. 11, 235 (2020). [<u>https://doi.org/10.1038/s41467-019-14126-w</u>]
- [5] <u>鄭国慶</u>, 固体物理, 57 巻, 6 号, 357 (2022).

研究室 HP: http://www.physics.okayama-u.ac.jp/zheng homepage/

鄭国慶(岡山大学・自然科学研究科・教授)



図 1:Cu0.3Bi2Se3 における電子対液晶的な性質



図 2:K₂Cr₃As₃の超伝導相図[5]。磁場の大きさに よって d ベクトルの向きが変わる。

希土類化合物における量子液晶の発現と「悪魔の階段」へ導く機能性の解明

B01 班 黒田健太

我々の生活を支える現代テクノロジーの根源は,多様 な機能物性の発現を伴う相転移現象にあります。そして その多様性は,材料を構成する元素の組み合わせ数が無 限であること以上に,多体効果に依っていることが重要 であり,物理系を構成する複数要素の絶妙なバランスで 成り立っているといえます。相転移の背後に潜むこの絶 妙なバランスを解き明かして,機能物性の制御を実現さ せることは,物質科学の醍醐味の一つです。

私の研究室では、「悪魔の階段」と呼ばれる希土類化 合物 CeSb が示す相転移現象に注目した研究を行って います。この物質は、単純な NaCl 型の結晶構造で構成 され、小さな電子・ホールポケットを持つ少数キャリア 半金属です。単純な結晶・電子構造を土台として、各 Ce サイトに局在した 4f 軌道へ電子が1つ加えられた"だ け"の物理系であるにも関わらず,異常な相転移現象「悪 魔の階段」が現れ、多体効果の威力を体現します。この 転移現象の特徴として、長周期の反強磁性秩序が微小な 温度変化で逐次的に変化するだけでなく [1] (図 1), Ce 4f 結晶場軌道の形状が立方晶から正方晶へ変化する軌 道秩序を示すため [2], これまで Ce 4f 軌道が中心に調べ られてきました。そこで我々は、角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて, 局在した 4f 軌道と対極にある遍歴 的な伝導電子を詳細に調べたところ、4f磁気・軌道秩序 の周期性および異方性が,電子・正孔キャリアの半金属電 子構造 [3] に浮かび上がる量子液晶状態 [4] や結晶場



図1: 「悪魔の階段」と磁気構造(外部磁場 無し)。T_N~17Kから8Kの狭い温度領域で 7回もの逐次転移を示す。矢印は磁気モーメ ントが揃った強磁性層で、○は常磁性層。



図 2: CeX (X: P, As, Sb, Bi) の磁気相図と常 磁性相における結晶場分裂 (*d*) 。CeSb だけ が異常な振る舞いを示す。

励起をまとい伝導する新しいタイプの準粒子(多極子ポーラロン)[5] など, Ce 4f 軌道と伝導電子が相関する「悪魔の階段」の新たな姿が明らかとなりました。

そこで本公募研究では、次の実験的アプローチとして、CeX (P, As, Sb, Bi)の系統変化に注目します。 CeX は全て低温で反強磁性秩序を示しますが、周期表上で中途半端な位置にある Sb を含む CeSb だけで「悪魔の階段」が発現します (図 2)。また、CeSb/CeBi の結晶場は T_N 以下で正方晶を示しますが、CeP/CeAs においては立方晶のまま転移する。つまり CeAs/CeSb では、異なる対称性を有する二つの結晶場軌道が拮抗する境界近傍にあり、この絶妙なバランスが「悪魔の階段」を発現させていると考えられます。なぜ CeSb だけで「悪魔の階段」が起こるのか?この問いに対する解を系統観察で見出すことで、40 年以上も長く未解決の問題である「悪魔の階段」発現機構の本質に迫りたいと思います。

参考文献

[1] J. Rossat-Mignod et al., Phys. Rev. B 16, 440 [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.49.15096].

- [2] K. Iwasa et al., Phys. Rev. Lett. 88, 207201 (2002) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.207201].
- [3] K. Kuroda et al., Phys. Rev. Lett. 120, 086402 (2018) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.086402].
- [4] K. Kuroda et al., Nature Communications 11, 2888 (2020) [https://doi.org/10.1038/s41467-020-16707-6].
- [5] Y. Arai, K. Kuroda et al., Nature Materials 21, 410 (2022) [https://doi.org/10.1038/s41563-021-01188-9].

研究室 HP: <u>https://srphys.hiroshima-u.ac.jp/</u>

伝導面内の異方性を見るのに、伝導面に垂直な電気抵抗を測る

B01 班 寺嶋太一

鉄系超伝導体では、鉄原子が砒素原子にサンドイッチされた層が電気伝導を担います。この鉄砒素 層が電気を流しにくい層と交互に*c*軸方向に積み重なって全体の構造ができます(下図(左)にCaFeAsF の結晶構造を示します)。従って、この層の方向には電気がよく流れますが、それと垂直な層間方向に は流れにくいです(電気抵抗率にして10--100倍以上違う)。室温付近では鉄砒素層は等方的です。つ まり、層内のどの方向でも電気抵抗率は同じです。ところが温度を下げると、鉄砒素層が一つの方向に ごく僅かに伸びる構造相転移が起きて、それより低温では伸びた方向とそれに直交する方向で電気抵 抗率が違ってきます。ごく僅かな結晶格子の変形に比べて電気抵抗率に表れる異方性が顕著なため、 実はこの相転移の主役は電子系で結晶格子はそれに引きずられているだけだと考えられています。こ のような転移を電子ネマチック転移と呼びます。ネマチックとは液晶の用語で、長細い液晶分子が長 さ方向を揃えて並んだ状態を示します。今の場合、電子が特定の方向に整列したような状態が生じた という意味で電子ネマチックと呼びます。もっとも、電子の長さ方向というのは考えにくいですが。

私の研究提案は、この電子の整列具合を、層内ではなく、あえて層間方向の電気抵抗を測ることによって、見ようというのものです。そのために磁場を使います。磁場があると、電子はローレンツ力のため磁場に垂直な方向については円運動をします。このため、たとえ層間方向の電気抵抗測定であっても、伝導層に平行な磁場をかければ、電子はまっすぐ層間方向に走ることはできず、磁場に垂直な層内の電子状態も電子の運動に影響し、それが層間方向の電気抵抗にも反映されるはずです。従って、伝導層内の様々な方位に磁場をかけて層間抵抗を測れば、伝導層内の電子状態の異方性がわかるはずです。

下図(中)は、実際に鉄系超伝導体母物質(注)の CaFeAsF の層間方向の電気抵抗を、温度 4 K で 磁場 14 T を様々な方位にかけて測った結果です。下図(右)に示すように、角度 θ は磁場方位を層間 方向(c 軸)から測った極角、角度 ϕ は磁場の回転面を表す方位角で、例えば ϕ =0 ならば磁場は θ =0 の c 軸方向から θ =90°で層内の a 軸方向となります。下図(中)には、角度 ϕ を固定し、角度 θ を-120°から120°まで変化させて電気抵抗の θ 依存性を測る測定を、 ϕ を2°から182°まで2°刻みで 変えて行った結果を、縦方向に少しずつずらして示してあります。 θ =±90°付近(着目すると、角度 ϕ が90°付近(B // b 近傍)で抵抗が顕著なピークを示すのに対し、0 または180°付近(B // a 近傍) ではピークはほとんど見えません。このような測定結果と理論的な計算とを照らし合わせることで、 鉄系超伝導体の電子状態の異方性を明らかにすることを目指しています。

(注)母物質という意味は、CaFeAsF 自体は超伝導にならないが、例えば Fe を Co で置換すると超 伝導が出現することに基づいています。



研究室 HP: https://www.nims.go.jp/research/group/quantum-material-properties/



図: (左) 鉄系超伝導体母物質 CaFeAsFの結晶構造(TT et al., PRX 8,011014 (2018))。(中) CaFeAsFの層間電気抵抗の磁 場方位依存性(未発表)。(右) 磁場方位の極角 θ、方位角 φの 定義。

寺嶋太一(物質・材料研究機構 WPI-MANA・グループリーダー)

時間・空間反転およびゲージ対称性の破れを伴う電子液晶相の研究

C01 班 速水賢

本新学術領域研究の主題である"電子液晶相"は、電子の内部自由度である電荷やスピンあるいはク ーパー対などの様々な要素から成り立っており、系の自発的な回転対称性の破れやゲージ対称性の破 れと密接に関係しています。こうした従来の電子液晶相に対して、さらに空間反転対称性や時間反転 対称性の破れが生じた際に、どのような機能性が現れるのか、またこれらの機能性を制御するミクロ な電子自由度は何であるのか、といった点を"多極子"をキーワードとして明らかにすることが本研究 課題の主な目的です。

多極子は、古典電磁気学における電磁場ポテンシャルの空間異方性を記述する際に用いられますが、 ミクロな電子が示す空間異方性を記述する際にも適用できます。固体物性においては、結晶場やスピ ン軌道相互作用などを通じて電子の波動関数に空間異方性が強く現れる f 電子系を中心に研究が進展 してきました。こうした多極子の概念は、f 電子系のような電子が一原子上に強く局在している状況だ けではなく、複数原子スピンの空間的な秩序により形成される反強磁性体のような状況に対しても、 単位胞内に含まれるスピン構造を一塊の多極子(クラスター多極子)として取り扱うことで適用できま す。さらには反強磁性秩序だけではなく、カレント秩序や軌道混成秩序といった様々な風変わりな秩 序状態に対しても、4 つの多極子(電気、磁気、電気トロイダル、磁気トロイダル多極子)を用いること で系統的に表現できます[1-3]。

多極子の観点からは、従来の電子液晶相は、時間反転対称性の破れを伴わない、ランク2の極性テンソルと同等であることから、電気四極子に分類されます。この電子状態に対して、さらに空間(時間)

反転対称性の破れが生じると、電気(磁気)トロイダル 四極子が新たに活性になります(図1)。その結果、電 気(磁気)トロイダル四極子が活性な電子状態では、弾 性-電気(磁気)応答のような交差相関応答(マルチフェ ロイクス)現象が現れます。同様に、時間反転対称性と 空間反転対称性が同時に破れた状態では、磁気トロイ ダル双極子あるいは磁気四極子が活性になり、電気-磁 気応答現象のミクロな起源になります。

本課題では、上記のトロイダル自由度をもつ液晶相 のもとで現れる交差相関応答現象を開拓すること、そ の微視的機構を理解することを目指していきます。さ らには、電子対液晶にまで対象を広げることで、時間・ 空間反転対称性が破れた際に現れる液晶相の普遍性・ 特異性を明らかにしていきます。興味がありました ら、議論・共同研究して頂けると嬉しいです。

最後になりましたが、この度6月1日より東京大学

空間反転対称性:有 空間反転対称性:無 電気トロイダル四極子 電気四極子 (xy 型) 有 スピン・電荷液晶のミクロな表現 空間反転対称性を破る電荷分布 反転対称性 時間 → 弾性応答現象 → 弾性 - 電気応答現象 磁気トロイダル四極子 磁気トロイダル双極子 軝 磁荷 (スピン)が四極子状に分布 磁荷(スピン)が渦状に分布 反転対称性 時間 弾性 - 磁気応答現象 → 電気 - 磁気応答現象

図 1:空間反転対称性および時間反転対称性の有 無に応じて分類された4つの電子液晶相。

大学院工学系研究科から北海道大学大学院理学研究院に異動しました。札幌にお越しの際はぜひお声 掛けください。

参考文献

[1] S. Hayami and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 033709 (2018)

[2] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi, and H. Kusunose, Phys. Rev. B 98, 165110 (2018)

[3] M. Yatsushiro, H. Kusunose, and S. Hayami, Phys. Rev. B 104, 054412 (2021)

研究室 HP: http://phys.sci.hokudai.ac.jp/~hayami/index.html

速水賢(北海道大学・理学研究院・准教授)

磁性体・冷却原子系におけるスピン液晶スキルミオンの開拓

C01 班 赤城裕

2009年に磁気(CP¹)スキルミオンがカイラル磁性体におい て観測され、それを契機に磁気スキルミオンの研究が実験 と理論の両面から精力的に行われています。トポロジカル ホール効果などの新規物性を示すだけではなく、磁気スキ ルミオンはトポロジカルな性質に由来して擾乱に強く、強 磁性磁壁の駆動に必要な電流密度の1000分の1程度で駆動で きるため、高密度・低消費電力デバイス/レーストラック・ メモリへの応用につながると期待されています。



図 1:スピン液晶(CP²)スキルミオン結晶

本新学術の共通/統一概念である量子液晶の代表格の一つがスピン液晶(スピンネマティック)相で す。スピン液晶相は磁気双極子の長距離秩序は存在せず観測が困難であることが知られていますが、 磁気四重極子(磁気多極子)の長距離秩序により特徴づけられる非自明な磁気秩序であるため長年に渡 って注目されています。私達は、この相が実現する最も基本的な模型である三角格子上のS=1の bilinear biquadratic(BBQ)模型を詳細に調べることで、新規なスピン液晶スキルミオンを見出しました [1]。古典液晶との最大の違いは、液晶の構成要素である棒(円盤)状分子は基本的に形を変えません が、スピン液晶相の構成要素であるS=1のスピンは磁気双極子ご磁気四重極子と大きく形を変える点 であり、実際スピン液晶スキルミオンの中心近傍には磁気双極子が誘起されます。

本新学術を通じ、甘利氏を中心に、澤渡氏、新田氏、Gudnason氏、Shnir氏らの素粒子物理学者と共 同研究を行い、スピン液晶スキルミオンの開拓を行っています。これまでの研究は純粋なBBQ模型を 対象としていましたが、この模型に一般化容易面異方性等を導入することで、スピン液晶分数スキル ミオンを数値的に構成しました[2]。これは物性でよく知られた磁気スキルミオンの半分であるメロン の一般化であり、各々のスピン液晶分数スキルミオンはトポロジカルチャージ1/3を持ちます。また、 BBQ模型に一般化Dzyaloshinskii-守谷(DM)相互作用項等を導入することで、安定な孤立スピン液晶ス キルミオンを見出しました[3]。さらに、冷却原子系で実現可能な一般化DM相互作用の下で、スピン 液晶スキルミオンが周期的に配列した、スピン液晶(CP²)スキルミオン結晶を数値的に構成しました [4]。この相は磁気双極子の構造因子が磁気(CP¹)スキルミオンと同様にtriple-qの構造を持つため、従来 の磁気構造プローブで観測が可能だと期待されます。一方、磁気(CP¹)スキルミオンとの最大の違い は、磁気四重極子の構造因子もtriple-qの構造を持つことです。本公募研究では、こうしたスピン液晶 における新規スキルミオンの開拓と創発物性の探求を行います。

[2] Y. Akagi, Y. Amari, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, JHEP 2021, 194 (2021).

- [3] Y. Akagi, Y. Amari, N. Sawado, and Y. Shnir, Phys. Rev. D 103, 065008 (2021).
- [4] Y. Amari, <u>Y. Akagi</u>, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, Preprint arXiv:2204.01476

研究室 HP: https://park.itc.u-tokyo.ac.jp/hkatsura-lab/

^[1] H. T. Ueda, <u>Y. Akagi</u>, and N. Shannon, Phys. Rev. A 93, 021606(R) (2016).

キラル古典異方粒子系におけるトポロジカル相の制御

C01 班 川崎猛史

キラリティとは、1方向に捻れた物体の性質を表し、磁性体、電子スピン系、液晶系など、様々凝縮 系物質において重要な役割を担っています。キラリティを有する物質は内部のスピンや分子が、らせ ん状や渦巻き状の構造、すなわちトポロジカルな構造が、熱平衡な「相」として安定である「トポロジ カル相」がしばしば観測されます。

分子にねじれのある古典液晶系において、(コレステリック)ブルー相とよばれる極めて複雑なトポ ロジカル相が得られます[1]. ブルー相とは、分子が2軸方向にねじれたダブルツイストシリンダーと 呼ばれる構造が様々な超格子を形成していることが知られています.近年の研究によると、このブル ー相を擬二次元空間に拘束すると、(半)スキルミオンを呼ばれる多数の渦が分散した構造が得られる ことが示されました[2]. この様なスキルミオン構造は、ハドロン系、量子ホール素子、スピノルボー ズ凝縮系、キラル磁性体系など、様々な量子系において見出されておりますが、古典系においては、上 述のコレステリック液晶系を除いて報告されておりません.一方、これらの系の連続体模型における エネルギー表式は、極めて類似性が高いことが知られています.この様な普遍的性質に注目しますと、 古典系であっても分子などの自由度の間にキラルな相互作用さえありさえすれば、液晶に限らず、キ ラルな分子結晶やコロイド結晶など幅広い系において、スキルミオンなどの特異なトポロジカル相が 見られて然るべきであると考えられます.しかし、先ほど述べた通り、古典系においては開拓の余地が あると言えます.

そこで第1期公募研究において、我々は、コレステ リック液晶の連続体的なフランク弾性エネルギーか ら、キラルな高分子やコロイド分子を表す新規モデル を還元的に構築し、このモデルを用いた分子動力学計 算を行いました.その結果、連続体モデルに比べて、 幅広いパラメータ空間に対して、物性を調べることが できるようになり、高密度の分子結晶状態において、 半スキルミオンをはじめとする様々なトポロジカル相 を発見するに至りました(図1).さらに、分子の立 体異方性と分子間に生じる捻れとの競合から、弾性場 が創発することがトポロジカル相を制御する鍵である ことも明らかにしました.このことは、キラルな分子・ コロイド結晶を用いてトポロジカル相を制御すること が極めて重要であることを示唆しています[3].



図1:古典分子動力学シミュレーションによって得ら れた半スキルミオン構造.紙面垂直方向に配向傾 向のある粒子は白色,紙面平行方向に配向傾向 のある粒子は配向角に応じて色付けを施しまし た.色付けの閾値は適当に定めたものです,

今後の,第2期本公募研究においては,第1期公募研究を発展させ,スキルミオン「粒子」の緩和ダ イナミクスやそれらの力学応答について詳しく調べていきたいと考えております.これにより,ソフ トマター系におけるトポロジカル物質の新たな地平を切り開いていきたい所存です.(本研究は,東京 大学生産技術研究所の高江恭平氏との共同研究です.)

参考文献

[1] D. C. Wright and N. D. Mermin, Rev. Mod. Phys. 61, 385 (1989).

[2] J. Fukuda and S. Žumer, Nat. Commn. 2, 1 (2011).

[3] K. Takae and T. Kawasaki, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 119, e2118492119 (2022).

研究室 HP: <u>https://www.r.phys.nagoya-u.ac.jp/</u> 個人 HP: <u>https://www.kawasaki-nagoya.jp/results/</u>

川崎猛史(名古屋大学・理学研究科・講師)

超伝導ダイオード効果とヘリカル超伝導

C01 班 大同暁人

超伝導は金属を冷やしていくと低温で電気抵抗がゼロになる現象ですが,最近になって<u>左から電流</u> <u>を流した時は超伝導なのに,右から電流を流した時は普通の金属になってしまう</u>不思議な現象が発見 されました.超伝導体では電子が2つずつ対になっており(クーパー対),これによって電気抵抗がゼ ロになります.一方,「超伝導ダイオード」と名付けられたこの系では,左からある大きさの電流を流 した時には電子はクーパー対として流れ,右から同じ大きさの電流を流したときにはバラバラの電子 がジュール熱を伴いながら流れる,という奇妙なことが生じるのです[図 1].

このような超伝導ダイオード効果は、2020年に 京大化研の小野教授の研究グループで発見されま した[1]. Nb,V,Taを交互に積層して得られた系に、 電流と垂直な面内磁場をかけると超伝導ダイオー ド効果が実現します.ここで、ダイオードの方向性 は磁場の向きを反転させることで制御できます.電 子機器に使われているダイオード素子では一方向 の電気抵抗が逆方向に比べて小さくなっています が、超伝導ダイオードではその極限とも言えるゼロ 抵抗が実現します.このため、省エネルギーの電子 回路等への応用を視野に入れて世界中で精力的に 研究が行われています.



図1:超伝導ダイオード効果の概念図[2].

超伝導ダイオード効果が生じる仕組みはよくわ

かっていませんでしたが、私たちの研究室ではその一つの可能性としてクーパー対が乖離する機構に よるダイオード効果を理論的に提案しました[2]. 同時期に複数のグループから関連する内容が発表さ れましたが、超伝導体のミクロな理論に基づいた理解を提示したのは私たちのグループが初めてです. 対称性の観点からは空間反転対称性と時間反転対称性の両方を破ることがダイオード効果を実現する 鍵になりますが、これらの対称性が破れた超伝導体では「ヘリカル超伝導」と呼ばれるエキゾチック超 伝導状態が実現することが知られていました[3]. 通常の Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 超伝導に近い 状態と、このヘリカル超伝導の間の連続的な変化、あるいは相転移によって大きな超伝導ダイオード 効果が得られることを、平均場理論による計算で明らかにすることができました.

超伝導ダイオード効果は新しく発見された物理現象ですので、この研究を進めることで従来の実験 手法では得られなかった情報にアクセスできるようになる可能性があります.実際、私たちはヘリカ ル超伝導の状態が変化するに伴ってダイオード効果の方向性が反転することを発見しました[2].これ までの実験で得られたヘリカル超伝導の証拠は間接的なものに限られており、検証はあまり進んでい ない状況でしたが、超伝導ダイオード効果をプローブとして用いることでヘリカル超伝導、あるいは より広くエキゾチック超伝導について理解が進展すると期待されます.私たちの研究室では引き続き 超伝導ダイオード効果やヘリカル超伝導、クーパー対の重心運動や超伝導電流の効果に注目した研究 を行い、興味深い現象を明らかにしていきたいと考えています.

参考文献

[1] F. Ando et al., Nature 584, 373 (2020).

[2] A. Daido, Y. Ikeda, and Y. Yanase, Phys. Rev. Lett. 128, 037001 (2022).

[3] E. Bauer and M. Sigrist, "Non-Centrosymmetric Superconductors: Introduction and Overview" (Springer Science & Business Media, (2012).

研究室 HP: http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html

大同暁人(京都大学・理学研究科・助教)

超伝導液晶秩序がもたらす新奇な非平衡現象

C01 班 水島健

これまで、様々な系において、液晶的な秩序を持つ超流動・超伝導状態や、特異な輸送現象の研究を してきました。具体的には、超流動³He における対液晶状態、トポロジカル超伝導やネマティック超 伝導におけるスピンネルンスト効果[1]、キタエフ磁性体における磁場誘起のトポロジカル・ネマティ ック相転移の存在[2]などです。さらに、物性理論、原子核理論や素粒子理論の研究者と協力して、中 性子星内部においてネマティック超流動が存在することや、そこに現れる新奇なトポロジカル励起(非 可換群で表されるトポロジカルチャージを持つ半整数量子渦)などを明らかにしてきました[3]。本研 究課題では、超伝導液晶秩序に関する知見をさらに深化・発展させていくために、その秩序に固有な非 平衡現象を探究していきます。

2年ほど前に、薄膜³Heにおいて新しい超流動相の存在を示唆する実験結果が報告されました。2022 年は、液体³Heでの超流動相転移が発見されてから 50周年の記念すべき年ですが、いまだに新しい超 流動相が発見されることに大変驚いています。我々は平均場計算を実施することで、この新奇な超流 動相が Pair density wave (PDW)状態であることを突き止めました。これは、有限の運動量を持つ Cooper 対へ凝縮した状態であり、1 次元的な縞模様や 2 次元的な格子パターンなど様々な PDW 状態が現れま す。ただし、平均場計算で最もエネルギー的に安定な状態は縞模様パターンを持つ PDW 状態であり、 これは、格子状の PDW 状態を示唆する実験結果と矛盾しています。PDW が現れるのが擬 2 次元的な 薄膜状ということと高温領域ということを考えると、Cooper 対の揺らぎの効果が PDW の安定性に影 響している可能性も考えられます。今後は、熱揺らぎの効果を考えていくことで、スピン 3 重項超流 動に現れる PDW 状態の安定性や実験結果の定量的理解を目指していきます。

このほかにも、超伝導における非平衡現象の研究を進めます。近年、U(1)対称性に加えて、結晶の回転対称性を自発的に破ったネマティック超伝導体が発見されています。この超伝導体では、いわゆる ヒッグスモード以外にも、配向子(director)の振動モードや、有限の軌道角運動量を持つ Cooper 対励 起(カイラル・ヒッグスモード)など、様々な Cooper 対の集団励起モードが存在します[4]。本研究課



題では、テラヘルツ帯での光渦 を用いたネマティック超伝導 体の集団励起モードの研究や、 さらに、可視光領域での光渦に よる「クエンチ」後の準粒子や 超伝導液晶秩序のダイナミク スの研究を進めていきます。

図 1:超流動 ³He に現れる様々な PDW 状態: 縞模様(左)、2回回転対称な格子(中央)と4回回転対称な格子状態(右)

参考文献

[1] T. Matsushita, J. Ando, Y. Masaki, <u>T. Mizushima</u>, S. Fujimoto, and I. Vekhter, Phys. Rev. Lett. **128**, 097001 (2022) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.097001].

M. O. Takahashi, M. G. Yamada, D. Takikawa, <u>T. Mizushima</u>, and S. Fujimoto, Phys. Rev. Res. 3,023189 (2021) [https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.023189].

[3] <u>T. Mizushima</u>, S. Yasui, D. Inotani, and M. Nitta, Phys. Rev. C **104**, 045803 (2021) [https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.045803]; Y. Masaki, <u>T. Mizushima</u>, and M. Nitta, Phys. Rev. B **105**, L220503 (2022) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.L220503].

[4] H. Uematsu, <u>T. Mizushima</u>, A. Tsuruta, S. Fujimoto, and J. A. Sauls, Phys. Rev. Lett. **123**, 237001(2019) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.237001].

研究室 HP: <u>http://www.fujimotolab.mp.es.osaka-u.ac.jp/</u>

水島 健 (大阪大学・基礎工学研究科・准教授)

非相反応答の逆効果による磁気ドメイン制御

D01 班 小野瀬佳文

空間反転対称性と時間反転対称性が 破れているときに現れる非相反な一方 向性の応答が注目されている。例えば、 光の場合には、図1のように一つの方向 に進む場合の光吸収は少なく、逆方向に 進む場合の光吸収は多くなる効果にな る。同様な効果は電気伝導の場合もあ り、電流方向の正負に依存して抵抗が



異なる非相反電気伝導が存在する。さらには、熱伝導においても非相反性も期待されていた。最近、 我々はマルチフェロイクス TbMnO3 において非相反熱伝導を実際に観測することに成功している[1]。

さて、このような非相反応答の逆効果について考えてみたい。上で述べた非相反応答は空間反転対

称性と時間反転対称性が破れたときに起こる流れの一方向性であった。 その逆効果は、空間反転対称性の破れた状況で一方向の流れを印加する ことによって時間反転対称性をある方向に破る効果や、時間反転対称性 が破れた状況で一方向の流れを印加することで空間反転対称性をある方 向に破る効果となるだろう。このような作業仮説のもと、最近我々が開 拓した非相反応答の逆効果を用いた非自明な磁気ドメイン制御法を二つ 紹介する。

一つ目は、表面弾性波のフォノン角運動量による磁化制御である。表 面弾性波とは文字通り表面を伝搬する音波のことで、通常の直線型の振 動ではなく歪が楕円を描いて振動する特徴がある。このような回転型の 振動は、フォノンの角運動量とみなすことが出来る。空間反転対称性が 破れた基板表面に強磁性体膜を蒸着し、弾性波を一方向に流せば非相反 応答の逆効果で強磁性の磁化制御が期待できる。これはとりもなおさず、 フォノン角運動量を用いた磁化制御に対応する。スピントロニクスの分

野では強磁性体にスピン角運動量を注入して磁化を制御することが行われてきたが、この効果は、そ のフォノン版、すなわちフォノン角運動量移行による磁化制御ということになる。我々は、最近このよ うな効果が実際に観測されることを実証した[2].。

二つ目は、金属らせん磁性体におけるカイラリテ ィ制御である。らせん磁性体のカイラリティは空間 反転対称な結晶を持つ物質においては、左右二状態 が縮退している。絶縁体のらせん磁性体においては 逆ジャロシンスキー守谷相互作用でらせん磁性体の カイラリティ制御が可能であることが知られていた が、金属の場合にはその制御法が明らかでなかった。 磁場と電流平行 +カイラリティ 磁場と電流反平行 ーカイラリティ

図3:金属らせん磁性におけるカイラリティ制御

最近我々は、非相反電気伝導の逆効果を利用して金属らせん磁性体のカイラリティ制御に成功した。 FIB 加工したらせん磁性体 MnP 結晶に磁場と高電流密度を印加すると、スピン移行トルクとダンピン グトルクの効果で縮退が解けてカイラリティ制御できることを明らかにした(図3)[3]。 参考文献

[1] Y. Hirokane, Y. Nii, H. Masuda, Y. Onose, Science Advances 6, eabd3703 (2020).

[2] R. Sasaki, Y. Nii, Y. Onose, Nature Communications 12, 2599 (2021).

[3] N. Jiang, Y. Nii, H. Arisawa, E. Saitoh, Y. Onose, Nature Communications 11, 1601 (2020).

研究室 HP: http://onoselab.imr.tohoku.ac.jp/



crystal

による磁化制御[2]

トポロジカルスピン液晶の機能的光学応答の探索

D01 班 岡村嘉大

分子から構成される(古典)液晶は、液体のような流動性を持つにも関わらず、結晶のように分子の 異方性による大きな複屈折性を示すことが知られています。この性質を活かすことでテレビやパソコ ンなどのディスプレイにも応用されるなど、重要な光学材料として、現代の生活に欠かせないものと なっています。本公募研究で注目した電子スピンが織りなすスキルミオンは、古典液晶的な特徴だけ でなく、特異な輸送現象などの量子力学的効果を示します。そこで今回は、量子液晶としての特性を利 用することで、古典液晶では現れない光学応答の実現に挑戦したいと思っています。

そもそもスキルミオンとは一つがナノメートルオーダーの磁気渦であり、構成するスピンを球面上 に射影すると球面の立体角を覆いつくすという、いわば「トポロジカルな」スピン配列を持っています (図(a))[1]。こうした特殊なスピン配列がある状況においては、伝導電子の波動関数にベリー位相と 呼ばれる量子力学的な位相が付与され、物質に対して実効的に数十テスラもの巨大な「創発」磁場が印 加されている状況になります。実際、印加磁場に比例するホール効果には「トポロジカル」ホール効果 という付加項が生じます。したがって、印加磁場に比例する磁気光学効果についても同様の増大が生 じる可能性があります(図(b))。

こうした目論見のもと、最近我々の研究グループでは、 MnGe という合金の薄膜試料においてテラヘルツ領域の磁気 光学測定を行いました[2]。この物質では、スキルミオン格子 と類似のトポロジカル磁気構造であるヘッジホッグ格子の 形成が確認されており、さらにトポロジカルホール効果は報 告されている中でも最大級です。測定の結果、低温になるに 従いホール伝導度スペクトルに共鳴構造が急激に発達する ことがわかりました。磁場・温度依存性について詳細に調べ たところ、この共鳴構造は、トポロジカルホール効果を引き 起こす電子構造の光学遷移に由来していることがわかりま した。この光学遷移はファラデー回転スペクトルにも鋭い共 鳴構造を誘起し、スキルミオン由来の大きな磁気光学効果を 実現することができました。

この研究では、テラヘルツ領域という非常に低い限られた エネルギー領域について研究を行いましたが、原理的には 様々なエネルギー領域においてスキルミオンの影響が現れ るはずです。さらにいえば、磁気光学ファラデー効果以外の 光学過程においてもスキルミオンのトポロジカルな性質が 現れるかもしれません。思えば、学生時代からスキルミオン



図: (a)スキルミオンと創発磁場の概念図。 (b)磁気光学ファラデー効果の概念図。

にいろいろな波長の電磁波や光を当て続けていますが[3,4]、まだまだこの量子液晶が示す特異な電磁 気応答があるのではと期待して研究を続けています。

参考文献

[1] Y. Tokura and N. Kanazawa, Chemical Reviews 121, 2857 (2021).

[2] Y. Hayashi, Y. Okamura, N. Kanazawa, T. Yu, T. Koretsune, R. Arita, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, and Y. Takahashi, Nature Communications 12, 5974 (2021).

[3] Y. Onose, Y. Okamura, S. Seki, S. Ishiwata, and Y. Tokura, Physical Review Letters 109, 037603 (2012).

[4] Y. Okamura et al., Physical Review B 95, 184411 (2017).

研究室 HP: https://www.qpec.t.u-tokyo.ac.jp/takahashi_lab/index.html

岡村嘉大(東京大学・工学系研究科・助教)

スピン流を用いたスピン液晶の磁化制御

D01 班 新見康洋

19世紀末に発見された液晶は、21世紀における現在でもなお凝縮系物理学の最先端の研究対象です。 最近では、結晶の対称性からは予測できない非自明な2回対称性の電子状態を有するネマティック超 伝導体や、フラストレーションの強い反強磁性体においてスピン液体状態と磁気秩序相の間に現れる 「スピン液晶」と呼ばれる特異な磁気状態が注目を浴びています。その一方で、スピン液晶を自在に制 御するような研究は未だ行われていません。

そこで本研究課題では、スピン液晶の磁化を、スピントロニクスで重要な役割を果たすスピン流で 制御することを目指します。スピン液晶の舞台として、コレステリック液晶と同じ模型で記述される らせん磁性体 CrNb₃S₆[1]、さらにフラストレーションの強い三角格子反強磁性体 Ag₂CrO₂[2,3]と Ag₂CoO₂[4]を用います。これらのスピン液晶の磁化を、ナノメートルスケールで減衰するスピン流で制 御するためには、素子全体をサブミクロン程度の大きさにする必要があります。そこで現在我々は、本 研究で用いるスピン液晶 CrNb₃S₆、Ag₂CrO₂、Ag₂CoO₂を、機械的剥離法を用いて数十ナノメートルの 薄膜に加工し、そこにスピン流を注入できるような素子の開発を進めています[3]。

 $CrNb_3S_6$ 薄膜に関しては、図1に示すように、 スピン流を注入するための強磁性体パーマロ イ Py ($Ni_{81}Fe_{19}$) 細線を隣接させ、非局所的に 電流を流すことで、対象の $CrNb_3S_6$ 薄膜にスピ ン流を注入します。このとき外部磁場を印加 せず、スピン流により生じるスピントルクだ けで $CrNb_3S_6$ のらせん磁化のひねりを制御す る実験を行います。

一方 Ag_2CrO_2 に関しては、反強磁性体転移 温度以下で、劈開面に対して垂直な方向に、わ ずかな磁気モーメントを持つことが我々の研 究で明らかになっています[3]。そこで、垂直磁 化をもつ原子層強磁性体 $Fe_5GeTe_2[5]$ 、さらに トンネルバリアとして六方晶窒化ホウ素(h-BN)を縦方向に積層した縦型スピン素子を作 製します。 $CrNb_3S_6$ の横型スピン素子(図1参



図 1:(a) 機械的剥離法で得られた CrNb₃S₆ 薄膜を用いたス ピン輸送素子の電子顕微鏡像。図のように電流 *I* を流すこと で、スピン流 *I*sを CrNb₃S₆ 薄膜に注入できる。(b) スピン流 *I*s を CrNb₃S₆ 薄膜に注入した際の模式図。スピン流により生じ るスピントルクを用いて、CrNb₃S₆ のらせん磁化を制御する。

照)のときと同様に、外部磁場を印加することなく、スピン偏極電流を用いて Ag_2CrO_2 の磁化反転を 行います。また、CrはS=3/2の古典スピンですが、 Ag_2CoO_2 ではCoのスピンはS=1/2であることが 示されており[4]、この系は量子スピン系として扱えることが示唆されています。 Ag_2CoO_2 についても 同様の実験を行い、古典スピンと量子スピンとの違いを明らかにする予定です。

これらの研究を通して、スピン液晶に磁化制御という機能を付与できると考えています。

参考文献

[1] Y. Togawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. 85, 112001 (2016) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.112001].

[2] H. Yoshida et al., J. Phys. Soc. Jpn. 80, 123703 (2011) [https://doi.org/10.1143/JPSJ.80.123703].

[3] H. Taniguchi et al., Scientific Reports 10, 2525 (2020) [https://doi.org/10.1038/s41598-020-59578-z].

[4] H. K. Yoshida et al., Phys. Rev. B 102, 024445 (2020) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024445].

[5] T. Ohta et al., Appl. Phys. Express 13, 043005 (2020) [https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab7f18].

研究室 HP: https://nanoscale.jp

新見 康洋 (大阪大学・大学院理学研究科・教授)

令和3年度領域研究会報告

総括班, A01 班 木村剛

2022年2月17日(木)~19日(土)に令和3年度領域研究会を開催いたしました。研究会企画当初はコ ロナ感染者の数が減少傾向にあり、東京大学柏キャンパスでのオンサイトとオンラインでのハイブリ ッド形式での開催を予定し、準備を進めていました。しかしながら、年明け後の感染状況の急激な悪化 をうけ、令和2年度に続き令和3年度の研究会もオンライン形式の開催に変更となりました。本研究 会では、計画班および公募班のすべての領域メンバーによる Zoom を利用してのオーラルセッション に加えて、領域外や領域内のグループの大学院生・若手研究者らによる Remo を用いたポスターセッ ションが実施されました。オーラルセッションは「New superconducting states」、「Microscopy, Spectroscopy」、「Superconductivity & theory」、「Spin liquid, Kitaev」、「Thermal & elastic properties」、 「Topological spin」といったテーマ別に計6のセッションにより構成され、電荷液晶、電子対液晶、ス ピン液晶といった多様な量子液晶研究に関わる領域メンバーによる研究進捗状況および研究成果の報 告がなされました。オンライン形式ではありましたが、各セッションにおいて常時 100 名前後の聴講 者が参加し、各発表に対して活発な質疑応答がなされ、本領域後半の活動のさらなる展開が期待でき る内容となっていました。各発表者による発表内容に関しては、次ページの研究会プログラムをご参 照下さい。

ポスターセッションで利用した Web 会議システム Remo は、領域メンバーにとっては令和2年度の 領域研究会、昨年5月に開催された領域主催の国際シンポジウムに続き、3回目ということもあり、大 きなトラブルなく、活発な議論が各ポスターにおいてなされていました。本ポスターセッションでは、 第3回 QLC 若手研究奨励賞の審査の一部も行われ、本研究会のすべてのセッション終了後に受賞者が 発表され、3名の若手研究者に同賞が授与されました。受賞者の詳細は本ニュースレターの関連記事 を参照下さい。

卒論や修論など忙しい時期の開催であったにもかかわらず、総計で181名(ロ頭発表者:43名、 ポスター発表者:54名、聴講者:84名)と多くの参加者があり、各発表に対して活発な質疑応答が行 われました。昨年度、中間評価を受けた本領域にとっては、本研究会は前半戦を終えた中締めとしての 位置づけに加えて、後半戦への研究のさらなる展開に向けて領域メンバー同士の情報交換の場として 大変有意義な機会となりました。最後に、領域代表の芝内先生、若手支援班の和達先生、領域事務の兼 子様をはじめとする本研究会の企画運営に協力下さった方々および参加いただいた皆様に御礼申し上 げます。



令和3年度領域研究会 プログラム

Thursday, February 17th. Opening 09:30-09:40 Opening Remark, Announcement SHIBAUCHI, Takasada Session 1: New superconducting states Chair : HANAGURI, Tetsuo 09:40-10:00 OKAZAKI, Kozo (University of Tokyo) "Superconducting-gap anisotropy of Fe(Se,S) investigated by laser ARPES" 10:00-10:20 EISAKI, Hiroshi (AIST) "Doping dependent critical current density for Bi2Sr2CaCu2O8+8 single crystals" 10:20-10:40 OKAMOTO, Yoshihiko (Nagoya University) "Superconductivity in Layered Tellurides Nb2Pd3Te5 and Chemically-Doped Ta2Pd3Te5" 10:40-11:00 KUDO, Kazutaka (Osaka University) "Superconductivity in Pt_{1+x}Bi₂ with a stuffed CdI₂-type structure" --- break ----11:15-11:30 SUN, Yue (Southeast University) "Protonation-induced discrete superconducting phases in bulk FeSe single crystals" 11:30-11:45 HIROI, Zenji (University of Tokyo) "Possible Surface Superconductivity in NaAlSi" KASAHARA, Shigeru (Okayama University) 11:45-12:05 "Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov pair liquid crystal state of FeSe" 12:05-12:20 MIZUSHIMA, Takeshi (Osaka University) "Pair Density Waves in Confined Superfluid ³He" Chair : KASAHARA, Shigeru Session 2: Microscopy, Spectroscopy 13:30-13:50 HANAGURI, Tetsuo (RIKEN) "Quantum liquid crystals investigated by spectroscopic imaging scanning tunneling microscopy" 13:50-14:10 HIRORI, Hideki (Kyoto University) "Applications of high-field THz pulse to time-resolved STM" 14:10-14:30 TODA, Yasunori (Hokkaido University) "Coherent quench spectroscopy of superconductors using topological lightwaves" 14:30-14:45 ITOH, Hirotake (Tohoku University) "Ultrafast photocontrol of short- and long-range charge correlations in organic electronic ferroelectrics" WADATI, Hiroki (University of Hyogo) 14:45-15:05 "Ultrafast demagnetization in ferromagnetic thin films observed by time-resolved microscopy" 15:05-15:25 KIMURA, Tsuyoshi (University of Tokyo) "Visualization of ferroic domains by linear optical effects" 15:25-15:45 KOBAYASHI, Kensuke (University of Tokyo) "Development of Quantum Spin Microscope" Session 3: Superconductivity & theory Chair: EISAKI, Hiroshi 16:10-16:25 NOJIMA, Tsutomu (Tohoku University) "Nonreciprocal transport and two-fold symmetric superconductivity in electrostatically doped SrTiO3" YANASE, Youichi (Kyoto University) 16.25-16.40 "Nonreciprocal responses in superconductors: diode effect, Meissner effect, and nonlinear optics" 16:40-17:00 ARITA, Ryotaro (University of Tokyo / RIKEN) "Hyperuniform electron distributions in quasicrystal" 17:00-17:20 IKEDA, Hiroaki (Ritsumeikan University) "Progress in the first-principles calculations---crystal field level and Fermi surface" 17:20-17:40 SATO, Masahiro (Ibaraki University) "Control of spin current with heat and light" 17:40-17:55 AKAGI, Yutaka (University of Tokyo) "Spin nematic Skyrmions in quantum magnets" 17:55-18:10 ADACHI, Tadashi (Sophia University)

"μSR Study of the Relationship between the Magnetism, Superconductivity, Electronic Nematicity in Iron-Chalcogenide Thin Films"

Friday, February 18th.

Session 4: Spin liquid, Kitaev

Poster Session

09:00-1 min. Preview, using "Zoom" 10:20-12:20 Poster Presentation, using "Remo" Chair : KIMURA, Tsuyoshi

Chair : OHGUSHI, Kenva

1	
13:30-13:50	SHIBAUCHI, Takasada (University of Tokyo)
	"Field-angle dependence of Majorana gap in a Kitaev spin liquid"
13:50-14:10	SATO, Taku J (Tohoku University)
	"Neutron Scattering study on magnetic structure and excitations in RuX_3 (X = Br, I)"
14:10-14:30	SHANNON, Nic (OIST)
	"Connections between quantum spin liquids and quantum liquid crystals"
14:30-14:50	SHIMIZU, Yasuhiro (Nagoya University)
	"Anisotropic excitation in Kitaev quantum spin liquid candidates"
14:50-15:05	SASAKI, Takahiko (Tohoku University)
	"Inelastic neutron scattering experiments of quantum spin liquid molecular material"
15:05-15:20	INOUE, Hisashi (AIST)
	"Tunneling spectroscopy of thin film antiferromagnetic kagome metal"
15:20-15:40	KONTANI, Hiroshi (Nagoya University)
	"Novel QLC states in Fe-based SCs, kagome metals, and magic angle twisted bilayer graphene"

Session 5: Therma	al & elastic properties	Chair : SATO, Taku J
16:00-16:20	SHIMAKAWA, Yuichi (Kyoto University)	
	"Giant entropy changes by charge transitions in oxides	??
16:20-16:40	OHGUSHI, Kenya (Tohoku University)	
	"Piezomagnetic Effect in Magnetic-multipole Order"	
16:40-16:55	SHIOMI, Yuki (University of Tokyo)	
	"Magnetic field dependence of piezoelectric effect in r	nagnetite"
16:55-17:10	KAWASAKI, Takeshi (Nagoya University)	
	"Emergent elasticity and topological phase transitions and steric anisotropy"	controlled via molecular chirality
17:10-17:25	YONEZAWA, Shingo (Kyoto University)	
	"Spontaneous strain measurements of quantum liquid of	crystals using fiber Bragg grating"
17:25-17:40	HOSOI, Suguru (Osaka University)	
	"Elastoresistance in the Semimetal Bismuth"	
17:40-17:55	MATSUNO, Jobu (Osaka University)	
	"Spin-orbit torque generation in CoFeB-epitaxial SrIrC	D3 bilayers"

Saturday, February 19th.

Session 6: Topological spin

Chair : KONTANI, Hiroshi 09:30-09:45 UCHIDA, Yoshiaki (Osaka University) "Mechanism of spin diffusion in liquid crystals" ARIMA, Taka-hisa (University of Tokyo) 09:45-10:05 "Transition between Helix and Ferromagnet" TOGAWA, Yoshihiko (Osaka Prefecture University) 10:05-10:25 "Chiral materials and macroscopic spin response" 10:25-10:45 MOTOME, Yukitoshi (University of Tokyo) "Phase shift in topological spin crystals" 10:45-11:00 KANAZAWA, Naoya (University of Tokyo) "Spin-orbit coupling properties in ferromagnetic-metal surface state of FeSi" TOHYAMA, Takami (Tokyo University of Science) 11:00-11:20 "Spin current texture in Hubbard models" 11:20-11:40 ISHIZAKA, Kyoko (University of Tokyo) "Unusual Phononic Phenomena in Correlated Materials"

Closing

11:40-	Winner announcement, QLC Young Researcher Award:	WADATI, Hiroki
	Comments:	Evaluation Committee Members
	Closing Remark:	SHIBAUCHI, Takasada

Quadrupole excitations in S=1 Kitaev spin liquids

New discoveries are often made on the border between different disciplines. One major discipline in solid state physics is dedicated to quantum spin liquids (QSLs). Accompanied by emergent gauge fields, topological order, and fractionalized excitations, QSLs defy an explanation with the conventional Landau paradigm of magnetism, while challenging experimental and theoretical disciplines for almost 50 years since their conceptual proposal on the triangular lattice [1].

Known for a slightly longer time is the concept of spin nematics. Proposed theoretically nearly 60 years ago [2], S=1 magnetic materials can host phases, which incorporate properties of both, a classical liquid crystal and the quantum mechanical aspects of a magnet. Their ground state is dominated by quadrupole moments, which break spin-rotation symmetry by selecting an axis, while not choosing a particular direction.

Usually seen as two separated areas of study, we are interested in combining those two disciplines, by asking the question: *"What happens, when a spin nematic and a spin liquid meet?"*

A great candidate to examine this question is the celebrated Kitaev spin liquid [3]. Until now discussed mainly for materials



Fig. 1: Dynamical structure factors for dipole, $S(\mathbf{q},\omega)$, and quadrupole, $Q(\mathbf{q},\omega)$, excitations for the ferromagnetic spin-1 Kitaev model on the honeycomb lattice. $Q(\mathbf{q},\omega)$ shows, next to strong zero-frequency excitations, also a flat band at $\omega/J=2$, originated from $\Delta S=2$ excitations of a spin-1 moment.

with an effective spin-orbital entangled moment S=1/2 [4], recent theoretical studies suggest that the Kitaev model could also be realized in materials for S=1 or even larger S [5]. By using a new (semi-)classical Monte Carlo and molecular dynamics method [6], we investigate the S=1 Kitaev model on the honeycomb lattice at finite temperature. Being able to treat quantum aspects of the problem exactly on a single site we can access dipole and quadrupole excitations simultaneously and obtain their frequency resolved excitation spectrum, as shown in Fig. 1. Dipole excitations, $S(\mathbf{q}, \omega)$ [Fig. 1(a)], show a very diffuse intensity distribution, well comparable to results of the S=1/2 model. However, noticeably distinct from the S=1/2 case is the presence of quadrupole excitations, $Q(\mathbf{q}, \omega)$ [Fig. 1(b)], which, next to strong zero-energy fluctuations, also show a flat band at $\omega/J = 2$, corresponding to excitations of a S=1 with $\Delta S=2$.

Our numerical method allows us to access finite-*T* excitations in *S*=1 magnets with ordered or disordered ground states in models with anisotropic exchange interactions like the Kitaev model. The next question to ask would be, what happens when we introduce further interactions like Heisenberg, off-diagonal, or biquadratic interactions. Finding just the right interaction strengths might allow us to tune between spin nematic and spin liquid phases and allows us to find new types of exotic states in higher-spin Kitaev materials.

- [1] P. W. Anderson, Mater. Res. Bull. 8, 153 (1973).
- [2] E. A. Harris & J. Owen, PRL 11, 9 (1963), V. M. Matveev, JETP, Vol. 38, No. 4, p. 813 (1974).
- [3] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2 (2006).
- [4] G. Jackeli & G. Khaliullin, PRL **102**, 017205 (2009).
- [5] P. P. Stavropoulos, D. Pereira, & H.-Y. Kee, PRL 123, 037203 (2019).
- [6] K. Remund, R. Pohle, Y. Akagi, J. Romhányi, & N. Shannon, arXiv:2203.09819.

Group HP: http://www.motome-lab.t.u-tokyo.ac.jp/

Rico Pohle

トポロジカル磁気構造の起源解明に向けたファンデルワールス金属の物質探索

大熊隆太郎

第3回 QLC 若手研究奨励賞をいただき大変光栄です。今回ポスター賞をいただいた研究は沖縄科学 技術大学院大学(OIST)の岡田ユニットにいたときに始まりました。岡田ユニットの別名は量子物質科 学ユニットで、最新の電子分光技術を利用してトポロジカルや強相関物質の電子状態を調べることを テーマにしています。物質合成担当のポスドクとして任されたプロジェクトは新しいファンデルワー ルス金属を探すというものでした。これは表面敏感な測定手段である scanning tunneling microscope (STM)と angle-resolved-photoemission-spectroscopy (ARPES)が売りの研究室であるため、よい表面が出る 金属や半導体の電子状態をとても高精度に調べることができるからです。

一方でこれまで金属を作った経験はなかったの で短いポスドク期間でわかりやすく面白い物性、例 えば超伝導一を探しあてるのは難しいと思いまし た。その代わり局在磁性を持つファンデルワールス 金属はないか探しました。トポロジカルな磁気構造 であるスキルミオンの文脈で遍歴磁性体は近年注 目されていますが分光研究は GdRu₂Si₂ などに限ら れています[1]。より単純なバンド構造を持つ物質 を調べることで非自明な磁気構造の起源を解明で きる可能性があります。

色々文献を漁って辿り着いたのが GdGaI[2]で、F がファンデルワールスギャップ、Ga²(4s²4p³)のハニ カム格子が伝導性、Gd³⁺(4f⁹5d⁹)の三角格子が磁性 を持つ物質です(図 1)。初めて単結晶の合成に成功 し、ARPES 実験を行いました。バンド構造はとて もシンプルで Γ 点に Ga-4p のホール、M 点に Gd-5d の電子バンドがあり室温では 0.1 eV のギャップ が空いています。非常に興味深いのは 200 K 以下か



図 1:(上、左下)GdGaI の結晶構造。緑矢印は予想されるスピン配置。(右下)GdGaI のバンド構造。

らΓ点とM点のバンドが折り返してバンドギャップが 0.2 eV まで増加することです。このバンド変化 はホールと電子のペアがボゾンとして振る舞い凝縮する励起子絶縁体を想起させます。またバンドギ ャップの増加とともに磁気相関が発達し、低温の磁気長距離秩序の形成に伴いバンド形状が変化しま す。実験結果と整合する磁気構造は triple-q の非共面構造であり最小のスキルミオンとみなせます。ま とめると 4*p*-5*d*間のクーロン相互作用により励起子不安定性が生じ、5*d*-4*f*間のフント結合によりバン ド構造の変化が非自明な磁性に転写されたという解釈ができます。

また GdGaI と同様の結晶構造の物質はいくつか知られており金属的なバンドを持つ CeSiI ではゼロ 磁場でサイクロイド型の磁気構造が実現すること、それが磁場で変化することを明らかにしました [3]。 こちらは転移温度が低いため主に STM による電子構造の解明が進んでいます。英国では両物質の磁気 構造を決定すべく ISIS と Diamond Light Source において中性子及び共鳴X線回折に取り組んでいます。

[1] Y. Yasui, C. J. Butler, N. D. Khanh, S. Hayami, T. Nomoto, T. Hanaguri, Y. Motome, R. Arita, T. Arima, Y. Tokura, and S. Seki, Nature Communications **11**, 5925 (2020) [<u>https://doi.org/10.1038/s41467-020-19751-4</u>].
[2] R. Okuma, K. Yamagami, et al. in preparation.

[3] R. Okuma C. Ritter, G. J. Nilsen, and Y. Okada., Physical Review Materials 5, L121401 (2021) [https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.L121401].

研究室 HP: <u>https://groups.oist.jp/ja/yoshi</u>

大熊隆太郎(University of Oxford · Clarendon Laboratory · PD)

磁性不純物置換による室温創発インダクタンス制御

北折曉

この度は第3回QLC若手研究奨励賞を賜り、光栄に存じます。常日頃よりお世話になっておりま す先生方、今回の機会を恵んでくださった皆様に心より感謝申し上げます。今後とも精進してまいり ますので、御縁がありましたらその際にはまたお世話になります。

今回受賞対象となりました研究は、創発インダクタンスの制御に関するものです。隣接する 3 スピンが互いに独立な方向を向いている非共面スピン構造は、伝導電子に対して創発磁場と呼ばれる有効磁場をもたらすことが知られています。創発磁場が時間変化する際に誘導される創発電場はかねてより検出・利用が試みられてきました。これを実現する画期的な一案が「創発インダクタンス」です[1]。これはらせん型をはじめとする磁気秩序を交流電流で駆動した際に、磁性伝導体がインダクタとして振舞うという現象です。ここで創発インダクタンスに由来する電圧虚部(電流と位相が90°ずれる)が創発電場と対応します。創発インダクタは低温での実証実験[2]がなされた後、短周期らせん磁性体YMn₆Sn₆を用いた室温での実測が行われており、市販品の十万分の1程度の体積にも拘わらず μH オーダー以上のインダクタンスが得られています[3]。このとき電流・磁場・温度を変化させることで、(古典的インダクタでは許容され得ない)負のインダクタンスの符号反転が生じるという特性も明らかになりました。この非単調な振る舞いからインダクタンスをもたらすスピンダイナミクスに2つ以上のモードがあることが想定されます。1つは各スピンが電流方向に倒れる傾斜のモード、もう1つはスピンの位相が伝播する位相シフトのモードです。(図参照)

今回の研究では非磁性の Y サイトの一部を Tb で置換することにより、位相シフトのモードを選択 的に抑制・制御することに成功しました。同時に、インダクタンス測定と並行して小角中性子散乱 (SANS) に基づく磁気構造解析も実施し、Tb の置換による磁気相の変化も追跡しています。すると、 高温の相境界においては Tb 置換により反強磁性秩序がらせん型磁気構造へ変化すること、そして両者 で共通して観察される正のインダクタンスの存在が明らかになりました。この磁気相を問わないタイ プのインダクタンスはスピン揺らぎに起因するものと見られ、らせん型でない共線的磁気秩序でさえ も創発インダクタンスの研究対象足りうることが実験的に立証されました。

他にも磁壁駆動に由来すると思われるインダクタンスの急峻な増大なども観察されるなど、「イン ダクタンス測定」という簡易な測定が、幅広いスピンダイナミクスの世界を覗くことができる強力な ツールへと化ける可能性が見えてきました。それと同時に創発インダクタンスそのものの応用可能性 も追求し、基礎・応用両面で価値ある成果を今後とも発信して行けたらと思います。



図:らせん型磁気構造における傾斜モード(上)と位相シフト(下)各モードと電流(j)の時間変化

参考文献

[3] A. Kitaori et al., PNAS 118, e2105422118 (2021).

北折曉(東京大学・工学系研究科物理工学専攻・博士課程3年)

^[1] N. Nagaosa, Jpn. J. Appl. Phys. 58, 12090 (2019).

^[2] T. Yokouchi et al., Nature 586, 232 (2020).

超伝導体においてスピン配列の制御を実現

A01 班 石田茂之、永崎洋

本研究では、超伝導と磁性が共存する磁性超伝導体で、磁束量子の向きによってスピンの向きが決まる現象を発見し、これを利用したスピン配列の制御に成功しました[1]。

一般に、超伝導と磁性(特に強磁性)は互いに競合する性質があり、同じ物質の中で両者が共存する ことは困難とされています。しかしごく稀に超伝導と磁性が共存する物質が存在し、磁性超伝導体と 呼ばれます。磁性超伝導体を研究対象として、超伝導と磁性の相互作用に起因するさまざまな新現象 が発見されてきました。近年発見された鉄系磁性高温超伝導体 EuRbFe4As4は、磁性超伝導体の中でも 高い超伝導臨界温度(*T*c=37 K)を持ち、15 K 以下の温度で Eu に由来する磁気秩序が発達します[2]。 多くの磁性超伝導体では磁場の印加により超伝導性が失われるのに対し、EuRbFe4As4は高い *T*cを反映 して、強い磁場中でも超伝導性を保つことができます。このような特徴を持つ EuRbFe4As4は、新現象・ 新機能を探索する対象として注目されてきました。

EuRbFe₄As₄は、図1に示すように、超伝導を担う鉄ヒ素(FeAs)層と磁性を担うEu層が積層した結 晶構造を有しています。その磁性の構造は、各Eu層ではスピンの向きがそろった強磁性配列で、その スピンの向きが90度ずつ回転しながら積層するらせん磁性になっています[3]。らせん磁性では全体と しては内部磁場が打ち消されるため、比較的超伝導と共存しやすいとされてます。一方で、外部磁場を 印加すると超伝導体内部に磁場が磁束量子として侵入し、Euのスピンはらせん磁性から強磁性に再配 列します。従来は、この状態から外部磁場をゼロに戻せば、超伝導と相性の良い元のらせん磁性に戻る と考えられていました。

本研究では、磁場中の中性子磁気回折実験を実施し、EuRbFe4As4のスピンの振る舞いを調べました。 EuRbFe4As4 にいったん強い磁場を印加してから磁場をゼロに戻したところ、前述の予想に反し、試料 中の大部分のスピンが強磁性配列のままであることが明らかになりました。さらにこの振る舞いが、 外部磁場がゼロでも磁束量子がピン止め効果により試料内に捕捉されており、この磁束量子によりス ピンが強磁性配列を保つというモデルで説明できることを示しました。このように、本来は超伝導と 相性が悪いはずの強磁性配列が、超伝導が作り出す磁束量子によって安定化されるという新現象を捉

えることに成功しました。超伝導体 内の磁束量子の情報(向きと位置) をスピンの情報に反映できること は理論的には提案されていました が、今回、磁性超伝導体を用いて実 証することに成功しました。この成 果は、メモリー機能などに応用でき る可能性があり、高速・低消費電力 が期待されるオール超伝導回路デ バイスの実現に向けた要素技術に つながると期待されます。



図1:EuRbFe4As4の結晶構造と磁束量子によるスピン配列制御の概念図。

【参考文献】

[1] S. Ishida, et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 118, e2101101118 (2021).

- [2] K. Kawashima, et al. J. Phys. Soc. Jpn. 85, 064710 (2016).
- [3] K. Iida, et al. Phys. Rev. B 100, 014506 (2019).

https://www.youtube.com/watch?v=5b8iQCXJlBI

石田茂之(産業技術総合研究所・電子光基礎技術研究部門・主任研究員)

永崎洋(産業技術総合研究所・電子光基礎技術研究部門・主席研究員)

鉄系超伝導体の超高速な結晶構造変化を実現 —光による新しい超伝導操作の可能性を示唆—

D01 班 鈴木剛、岡崎浩三

超伝導体は、電気抵抗がゼロになることから損失のない電気エネルギーの輸送を可能にし、持続可 能な開発目標を目指すこれからの生活に必要不可欠な材料と考えられていますが、超伝導状態にする には通常絶対零度に近い極めて低い温度にする必要があり、そのために希少な天然資源である液体へ リウムを大量に消費するなどの問題点があります。近年、100 GPa 以上に及ぶ超高圧をかけることで超 伝導状態が室温で実現する物質が報告され、基礎学理及び応用の観点から大きな注目を集めています [1]。しかし、圧力をかける方法として用いられているダイヤモンドアンビルセルは、高圧をかけられ る体積が極めて小さいことから実用には難しいという状況でした。

そこで我々は、ダイヤモンドアンビルセルの代わりに「光」を使って圧力印加が行えないかという目 的のもと本研究を行いました[2]。図 1(a)に測定の概念図を示します。測定試料としては、数 GPa の圧 力印加により超伝導転移温度が顕著に上昇する鉄系超伝導体 BaFe₂As₂を選びました。まず、パルス状 の近赤外光を BaFe₂As₂に照射し、その後、国内唯一の自由電子レーザーSACLA による高輝度で短パル ス化された X 線を用いて X 線回折測定を行うことで、光照射後の結晶構造をスナップショットとして 観測することができます。特にこの測定では、結晶からの X 線回折の角度変化を観測することで、結 晶構造の伸縮について知見を得ることができます。図 1(b)は結晶面間距離における時間変化を示して います。光照射後約 30 ps 後に一旦結晶構造が収縮して、その後、約 60 ps 後に伸長する様子が見て取 れます。特に最初の収縮は、熱による膨張では説明できない非平衡状態ならではの現象であることが 分かりました。そこで、光照射後約 30 ps 後に起こる収縮に注目して光の強度を変えて結晶面間距離を 測定したものを図 1(c)に示します。照射する光の強度に応じて収縮が増大していき、応力に換算すると 最大で約 0.1 GPa に相当しており、これは過渡的ながら巨大な応力がかかっていることを意味してい ます。本研究成果では、「光」により非接触で大面積、さらに超高速に応力印加できることを実証でき ましたので、超高速電気光学デバイスにおける操作方法などに応用できることが期待されます。



図 1:(a)時間分解 X 線回折法の概念図。(b)観測された結晶面間距離の時間依存性と(c)光照射後 30 ps における収縮時の結晶面間距離の光照射強度依存性。(c)では換算した応力を右軸に示している。

[1] E. Snider *et al.*, Nature (London) **586**, 373 (2020).

[2] T. Suzuki et al., Phys. Rev. Research 3, 033222 (2021).

https://www.youtube.com/watch?v=YSOeOncC-pc

鈴木剛(東京大学・物性研究所・助教) 岡崎浩三(東京大学・物性研究所・准教授)

マヨラナ粒子の粒子数を磁場方向により制御することに成功

B01 班 芝内孝禎

キタエフ模型と呼ばれる蜂の巣格子上の量子スピン模型 は、2006年にアレクセイ・キタエフにより理論的に提案さ れました(図1)。この模型においては、量子力学的な揺ら ぎの効果により、低温ではスピンが秩序化しない量子スピ ン液体と呼ばれる状態が厳密解として得られることが知ら れています。このキタエフ模型での量子スピン液体である キタエフ量子スピン液体状態は、スピンがマヨラナ粒子で 記述されるという特異な性質を持つため、マヨラナ粒子を 探索する舞台として精力的に研究されています。

キタエフ模型に磁場をかけると、磁場をかける方向によっ てこのマヨラナ粒子の励起スペクトルが大きく変化するこ とが理論的に提案されています。特に、格子点をつなぐボン ド方向(b軸方向)に平行に磁場をかけるとギャップがない ディラック分散を持ち、それ以外の方向ではギャップが開

いてトポロジカルに非自 明なエッジ流を持つ状態 となることが期待されま す。今回、キタエフ量 イン液体の候補物質で ある a-RuCl₃(塩化ルテニ ウム)において、磁場剤 定を行い、まさに期通 りの若果は、この物質でマ



図1:キタエフ模型の模式図。1つのスピンに 対して隣接する3つのスピンが結合している が、3つの隣接するスピンからは、それぞれ スピンを異なる方向に向かせる相互作用が 働き、スピンはそのフラストレーションのため に秩序化できない。





ヨラナ粒子の励起を持つことを強く示唆するとともに、マヨラナ粒子の数を磁場の方向により制御す ることができることを示すものです(図2)。磁場中でのマヨラナ粒子は、非可換エニオンという新奇 な粒子を形成し得ることが理論的に予想されており、この非可換エニオンは、環境ノイズに非常に強 いトポロジカル量子コンピューターを実現する鍵を握ると期待されています。

さらに、この磁場角度依存性を広い磁場範囲で調べたところ、10 テスラ以上の高磁場で、角度依存性 が蜂の巣構造から期待される6回対称から、2回対称へ変化するという、予想に反する結果も得られま した。このような回転対称性を破る結果は、量子スピン液体が何らかの相転移を落として対称性の低 下をもたらしていることを示唆するものであり、一種の量子液晶状態が実現している可能性がありま す。実際に、強磁場中のキタエフスピン液体状態の理論的研究により、このような量子液晶状態ができ うることを裏付ける結果も出始めており、今後の展開が期待されます。

[1] O. Tanaka, Y. Mizukami, R. Harasawa, K. Hashimoto, K. Hwang, N. Kurita, H. Tanaka, S. Fujimoto, Y. Matsuda, E.-G. Moon, and <u>T. Shibauchi</u>, ``Thermodynamic Evidence for a Field-Angle Dependent Majorana Gap in a Kitaev Spin Liquid", <u>Nat. Phys. **18**</u>, 429-435 (2022).

https://www.youtube.com/watch?v=67Yw0Fh9Mzk

芝内孝禎(東京大学・新領域創成科学研究科・教授)

反強磁性が引き起こす光の三色性を観測

A01 班 木村健太、木村剛

時間反転と空間反転がともに破れた磁性体では、光の伝搬する向きを反転すると吸収係数が変化 する「方向二色性」という現象が現れ得ることが知られています。これまでの方向二色性に関する研究 の多くは、マクロな磁化を持つ物質が対象とされていました。しかし、ある種の結晶構造のもとでは、 スピンが反平行に配列した反強磁性体でも方向二色性の発現が許されます。このような方向二色性が 活性な反強磁性体では、通常の手法では識別の難しいネールベクトルの向きを透過光強度の違いとし て識別することが可能です。さらに、このことを複数(3つ以上)の安定なネールベクトルの向きをと る反強磁性体に応用すれば、光で読み出し可能な多値メモリ機能が実現できると期待されます。しか しながら、これまでに方向二色性が観測された反強磁性体は2種類の安定配置を取るもののみであり、 さらには、その方向二色性も小さいものがほとんどでした。

そこで我々は、複数の安定なネールベクトル配置を取る反強磁性体として Bi2CuO4 という物質に 着目しました。同物質は正方晶構造を持ち、ネール温度(T_N=44 K)以下で正方晶の面内方向に Cu モー メントが向いた共線的な反強磁性秩序を示します。この反強磁性構造は方向二色性が許容な時間反転 と空間反転がともに破れた構造であり、ネールベクトルが4回回転軸まわりにπ/2 毎に回転した4つ の反強磁性ドメインが存在します。この物質の単結晶試料に対して、正方晶の面内方向に可視光を入 射したときの透過光の様子を詳細に調べました。その結果、反強磁性相において、ネールベクトルと垂 直な方向に進む光について、ネールベクトルあるいは伝搬方向の反転により吸収係数が 40%以上も変 化するという巨大な方向二色性が発現することが明らかとなりました。また、ネールベクトルが光の 伝搬方向と平行な場合では方向二色性は観測されず、すなわち、伝搬方向がネールベクトルに対して 垂直か平行かによって吸収係数が3つの異なる値を取ることが明らかとなりました。いわば、反強磁 性によって光の三色性が誘起されたと言える結果であり、これらの結果をまとめた概念図を図(a)に記 します。さらに、電場と磁場の印加により反強磁性ドメインを制御し、ネールベクトルと光が伝搬する 向きの相対的な配置を変化させることで、吸収係数を3段階に切り替えられることを実証しました。 実験結果の一例として、磁場を印加したときの単結晶の様子の変化を偏光顕微鏡で可視化した結果を 図(b)に示します。この図では、試料からの透過光強度の違いを青、赤、白の色で表しています。ゼロ 磁場で存在していた赤と青の領域が 0.58 テスラの磁場を印加すると白い領域に変化しており、調光機 能が実現していることを表しています。

本研究により、マクロな磁化をもた ない反強磁性体において巨大な方向二 色性が観測されるとともに、反強磁性が 引き起こす三色性というユニークな磁 気光学効果が実証されました。この三色 性は、反強磁性体における複数の安定な スピン配列を光によって識別すること を可能にするため、反強磁性体を使った 多値メモリの光読み出しに利用できる 可能性があります。さらに、本研究によ り、電場と磁場の印加によりスピン配列 と光の進む向きの相対的な配置を変化 させることで、3段階の調色機能とも言 うべき磁気光学機能が実現されました。



図 (a) 異なる3方向から見たときに吸収係数が異なる反強磁性 体の概念図。(b)電場と磁場でスピン方位を制御し、吸収係数を 3段階に切り替えられることを実証する実験結果の一例。

[1] K. Kimura et al., Nat. Commun. 13, 697 (2022).

https://www.youtube.com/watch?v=4DgB5L_RrlI

木村健太(東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教) 木村 剛(東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授)

超 短 パルス光を用いた超 伝 導 のポンププローブ分 光

D01 班 戸田泰則

本稿では、物質の電子応答を調べる手段として広く利用されるポンププローブ型時間分解分光を紹 介します。QLC チャンネル動画で研究室学生の山岡君と秋葉君が実際の実験系を紹介してくれている ので、ご興味のある方は下のリンクからご覧ください。ポンププローブ分光は、非平衡測定の意味で解 析の難しさがありますが、試料の加工を必要としないことや、バルク特性を時間領域で観測・制御でき る利点があるため、様々な物性観測に利用されています。高速な電子応答を検出するため、フェムト秒 の時間幅を持つ超短パルスレーザーが使われます。パルスレーザーから出力された光波を 2 経路に分 割し、片方のパルス光(ポンプ光)によって励起された電子状態のもたらす光学応答変化を、他方のパ ルス光(プローブ光)で検出します。ポンプ光とプローブ光の時間差は光路差で調節できるので、準連 続的に変化させながら応答変化をトレースすれば、時間発展を見ることができます。具体例として光 学領域(>leV)のパルスレーザーを用いた超伝導試料を考えると、まずポンプ光はクーパー対の一部 を準粒子へと励起し、遅延時間に応じた準粒子数の変化をプローブ光の光学応答変化(反射率変化)と して捉えます。光強度が十分弱ければ、準粒子数変化は熱平衡状態にある超伝導ギャップや電子秩序 を反映した振る舞いを示します。図は銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 (T_c=91K)の過渡反射率変化(ΔR/R) の観測結果です。一般的に反射率変化は微弱なので、ストロボスコピックな繰り返し測定を行います。 このとき試料の熱平衡条件を維持するため、繰り返しの時間間隔はサブミリ秒に設定します。図左は 異なる温度で測定された過渡応答をカラープロットで表示しています。 相転移温度 (T_e) 以下で現れる 過渡応答はピコ秒(ps)オーダーの超伝導ギャップ間緩和を反映した応答に対応します。他方、T。以上で は量子液晶的な特性を示す擬ギャップ応答が支配的となり、超伝導応答とは異なる緩和や温度依存性 を見ることができます。過渡応答の振幅や緩和時間を解析することにより、ギャップの大きさや対称 性、秩序間の相互作用などを調査できます。このように熱平衡下の電子状態の解析はポンプ光を弱励 起条件に設定することが必須ですが、例えば照射領域のクーパー対を全て励起するような高強度のポ ンプ光を用いると、瞬時的な相破壊を誘起できます。この光誘起相転移で生成される過渡的常伝導の 時間発展は秩序形成過程を反映し、相破壊パルスをポンププローブ分光に加えたマルチパルス分光 (コ ヒーレントクエンチ分光)を用いて観測されます。図右は T。以下の低温でマルチパルス分光を行った

結果です。遅延時間(DP)は相破壊パルス到 着後の経過時間に対応し、光誘起された過渡 電子状態は遅延時間 (Ppr) の過渡応答から判 別できます。例えば DP 時間が 1ps から 10ps で支配的となる応答は図左の擬ギャップ応 答に対応することが分かります。結果から約 5ps で擬ギャップ再形成が完了することが分 かります。また超伝導応答は擬ギャップ形成 完了と同時に再形成を開始します。つまり両 者の相関が示唆されます。相破壊光は強度や 時間以外にも位相や偏光など様々な自由度 を利用できます。光波制御を組み合わせるこ とによって、時空間の物性探索や機能開拓が 期待できます。具体例としてトポロジカル光 波を用いた試みを前号で紹介しています。是 非ご覧ください。



図 1:(左)ポンププローブ分光による Bi2212 の過渡反射率変化 (ΔR/R)の温度依存性、(右)相破壊パルスを加えたマルチパル ス分光による同試料の秩序再形成ダイナミクス.

https://www.youtube.com/watch?v=5oM4Lsh4FMQ

戸田泰則(北海道大学・大学院工学研究院・教授)

Photo-induced antiferromagnetic-ferromagnetic and spin-state transition

B01 Yujun Zhang and Hiroki Wadati

With the trend of rapid development of intelligent electronic devices and functional information materials, spintronics has become a booming field in modern condensed-matter physics. Instead of only utilizing the electron charge, the spin degree of freedom of electrons can be exploited in spintronic devices with low power consumption, fast speed, and high density. Novel methods to manipulate the electron spin are the key for the development of spintronics. Ultrafast manipulation of spin by light is a promising strategy due to its low power consumption and fast speed. Studying dynamic behaviors in magnetic thin films is especially meaningful for achieving deeper comprehension of magnetic properties and electronic structure within very small temporal and spatial scales, which is crucial to the realization of high-density spintronic devices.

Previous reports of ultrafast magnetic dynamics mainly focus on demagnetization of ferromagnets, which is often characterized by a transient decrease of magnetization. Transient increase of magnetization induced by light excitation was rarely investigated. In this research, we chose an oxide thin film with an antiferromagnetic (AFM) - ferromagnetic (FM) transition and a spin-state transition (SST), GdBaCo₂O_{5.5}, and investigated its ultrafast dynamics. By taking advantage of the time-resolved soft x-ray scattering system in beamline FEMTOSPEX (UE56/1-ZPM) of BESSY II, the dynamic behaviors of both antiferromagnetism and ferromagnetism can be detected in a single experimental instrument. X-ray magnetic circular dichroism in reflectivity (XMCDR) can reflect the ferromagnetism, while antiferromagnetism can be characterized by resonant magnetic x-ray diffraction (RMXD). Photo-induced enhancement of XMCDR and decay of the RMXD can be clearly observed, indicating a photo-induced AFM-FM transition. Photon energy dependence of the transient XMCDR and reflectivity suggests a concomitant photo-induced SST. Both the electronic state change and the competition between AFM and FM exchange interactions simultaneously contribute to the observed magnetic dynamics, as schematically shown in Fig. 1 (HS and LS indicate high-spin and low-spin states of the Co ions; B is the applied magnetic field). Our investigation presents a new category of photo-induced phenomena involving both magnetic and electronic structure degrees of freedom.



Fig. 1: Image of the photoexcited state of cobalt spins. Laser irradiation increases magnetization in a-directions.

[1] Y. Zhang, H. Wadati et al., Commun. Phys. 5, Article number: 50 (2022).

https://youtu.be/NGKmCuzXqi8

Yujun Zhang (Chinese Academy of Sciences • Institute of High Energy Physics • Associate Research Fellow) Hiroki Wadati (Univ. of Hyogo • Graduate School of Science • Professor)

レーザー光で引き起こされるの超高速な磁気秩序の変化を観測 ~ペロブスカイト型酸化物の反強磁性秩序構時間分解共鳴軟 X 線散乱による観察~

B01 班 山本航平、和達大樹

今回我々はペロブスカイト型鉄酸化物 La_{1-x}Sr_xFeO₃ の薄膜における反強磁性磁気構造の超高速な変 化を、共鳴軟 X 線散乱の時間分解測定により観測に成功しました。その結果、レーザー照射して 0.1 ピ コ秒程度という超高速な時間で、反強磁性秩序が消失するというスピンのダイナミクスを明らかにし ました。

近年、電荷の自由度のみならずスピンの自由度をエレクトロニクスに応用するスピントロニクスの 分野において、従来からメモリなどへの応用で広く使われている強磁性体に加えて、反強磁性体の光 誘起ダイナミクスが注目されています。反強磁性体は、そのマクロな磁化が消失していることにより、 より高いエネルギー効率で超高速の光誘起磁化ダイナミクスを示すことが期待されています。本研究 では、反強磁性・らせん磁性を示す鉄ペロブスカイト酸化物薄膜における光誘起磁化ダイナミクスを 調べました。La_{1/3}Sr_{2/3}FeO₃薄膜は、電荷不均化を伴う整合的な反強磁性秩序を示し、一方、SrFeO₃₋₆薄 膜は、Fe イオン間の強磁性結合の増加により非整合的な強磁性秩序を示すことが知られています。ど ちらの物質も反強磁性相と同時に高い価数の Fe を持つっています。反強磁性体はマクロな磁化が消失 しているため、直接的な観測手段は限られますが、反強磁性秩序を直接的に観測可能な手段である共 鳴軟 X 線散乱は、内殻吸収により限られた試料体積の薄膜の測定が可能であり、X 線パルスを用いる ことにより時間分解測定が可能であるという特長をもっています。Fe L 吸収端での La_{1/3}Sr_{2/3}FeO₃およ び SrFeO₃₋₆薄膜に対する時間分解共鳴軟 X 線散乱法による測定を行いました。これにより、反強磁性 秩序の光誘起状態の時間発展を直接検出しました。実験は BESSY II においてレーザースライシングに よる短パルス X 線が得られるビームラインで行いました。

レーザーフルーエンスと反強磁性秩序に関する散乱ピークの強度変化との比較により、La_{1/3}Sr_{2/3}FeO₃

薄膜の反強磁性磁気秩序のレーザー照射に よる消失は、SrFeO3-3薄膜に比較して低いレ ーザーフルーエンスで引き起こされること が見出しました。さらに La_{1/3}Sr_{2/3}FeO₃ 薄膜 に対して時間分解能130fsでの測定を行った ところ、変化はおよそ 100 fs 以内に引き起こ されることが分かりました。La_{1/3}Sr_{2/3}FeO3薄 膜での結果を図1に示します。この現象の 機構として、Fe 原子間の電荷移動とそれに 続く磁気的相互作用の結果として理解でき ることを提案しました。また両物質の電荷 秩序構造の違いがレーザーフルーエンス依 存性に反映されていると考えられます。本 研究で見出された過程を用いることで、反 強磁性磁気秩序を光学的に制御するための より効率的な手段となると考えています。



図1:La_{1/3}Sr_{2/3}FeO₃薄膜の軟X線時間分解測定で観測された磁 化の時間変化の様子。横軸の単位はピコ秒:1 兆分の1 秒であ る。反強磁性秩序に由来する強度が、レーザー照射(0 秒)の後 0.1ps 程度で変化している様子が見られる。

[1] K. Yamamoto, H. Wadati et al., New J. Phys. 24, 043012 (2022).

https://youtu.be/ss4vFEIVL9c

山本航平(分子科学研究所・助教) 和達大樹(兵庫県立大学・理学研究科・教授)

Randomized 特異値分解による2次元 Mott 絶縁体における光励起状態の解析

C01 班 時本 純

2022年4月から東京理科大学理学部第一部応用物理学科遠山研究室でポスドク研究員として本プロ ジェクトに参加させて頂いております、時本純です。よろしくお願いいたします。私のこれまでの研究 は、超流動フェルミ原子ガスにおける Higgs モード[1]や Josephson 振動の BCS-BEC クロスオーバーで の振る舞いや、2 次元 Mott 絶縁体の光励起状態などを、主に大規模並列計算機を用いた数値シミュレ ーションを手法として研究を行なってきました。今回は2次元 Mott 絶縁体における光励起状態の研究 の方を簡単にご紹介させて頂きます。

さて、この研究の舞台である Mott 絶縁体ですが、そ の光励起状態は1次元と2次元では大きく性質が異 なります。具体的には、1次元においては、幾何学的 な特徴から、スピン自由度と電荷自由度が分離する、 スピン電荷分離という性質を持ち、光学伝導度などに 寄与する励起状態(エネルギー固有状態)は比較的少 数となります。また、U/t>10(Uはオンサイトクーロ ン相互作用、tはホッピングパラメータ)の領域では、 有効モデルの一種である電荷モデルを用いることに より扱うべき基底の数が比較的少数となり、(数値) 計算量もそれほど多くはなりません。一方、2次元系 の場合、スピン電荷分離の性質は成立しないため、解 析すべき励起モードや計算量は1次元系に比べて圧 倒的に多くなります。

そこで我々は、2次元系に対して、強相関有効モデ ルにおける光パルス照射時の時間発展を数値的に厳 密に計算し、その解に対して Randomized 特異値分解 [2]を施すことによりエネルギー固有モードに分解すのピークに対応する各種相関。 ることで特徴的なスペクトルピークに対応する励起



図2光吸収スペクトル、スピン相関及び電荷相関。 U/t=10 の場合の一例で、下の2図は上図中の青丸

モードの詳細を計算しました。ここで、Randomized 特異値分解とは、近年、情報分野において盛んに 利用されている(レコメンデーションや検索予測など)手法であり、目的の行列に対してランダムベク トル (要素をランダムに設定したベクトル)を作用させることで行列を圧縮し、重要なモードを優先的 に抽出できる、新しい特異値分解の1手法です。この Randomized 特異値分解のおかげで、従来の特異 値分解では処理ができない大きさのサイト数(本研究ではサイト数 N=26)での計算が可能となりまし た。

結果として我々の計算により、クーロン相互作用 V=0 の系において、バンド下端付近に、スピン由 来のエキシトン的モードが存在することを解明しました(図1)。このモードは DMRG 計算の結果など から、その存在の可能性が予言されてきましたが、今回の我々の電荷相関及びスピン相関の計算によ り、改めてその存在をはっきりと示すことができたと言えます。その他にもいくつかの面白い特徴を 持つモードが存在することが判明し、これらの詳細を現在論文投稿準備中です。

また、現在は、ホールドープされた銅酸化物の光励起ダイナミクスを計算しています。ダイナミクス の詳細な解析については、上記の研究と同様、Randomized 特異値分解を応用して行う予定です。本プ ロジェクトの推進に少しでも寄与できるように頑張りますので、どうぞ宜しくお願い致します。 参考文献

[1] J. Tokimoto, S. Tsuchiya, and T. Nikuni, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 023601 (2019)

https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.023601

[2] N. Halko, P. G. Martinsson, and J. A. Tropp, SIAM Review 53:2, 214-288 (2011)

時本純(東京理科大学・応用物理学科・PD)

●人事異動

名古屋大学 大学院工学研究科の岡本佳比古准教授が、2022年4月1日付で東京大学 物性研究所 教授へ異動 しました。

茨城大学 理学部の佐藤正寛准教授が、2022年4月1日付で千葉大学 大学院理学研究院 教授へ異動しました。

東京大学 大学院工学系研究科の有田亮太郎教授が、2022年4月1日付で東京大学 東京大学 先端科学技術研究 センター 教授へ異動しました。

当領域の PD・特任研究員(C01 班) 古谷峻介氏が、2022 年 4 月 1 日付で東京大学 大学院総合文化研究科 特任 研究員へ転出しました。

当領域の PD・特任研究員(C01 班)山田武見氏が、2022 年 4 月 1 日付で富山県立大学 工学部 准教授 へ転出 しました。

当領域の PD・特任研究員として、C01 班に時本純氏(東京理科大学 理学部 ポストドクトラル研究員)が 2022 年4月1日付で着任しました。

東京大学 物性研究所の平井大悟郎助教が、2022 年 5 月 1 日付で名古屋大学 大学院工学研究科 准教授へ異動 しました。

東京大学 大学院工学系研究科の速水賢講師が、2022 年 6 月 1 日付で北海道大学 大学院理学研究院 准教授へ 異動しました。

●受賞報告

清水宏太郎氏(求研究室), "2021年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞", (日本物理学会, 2021/10) https://www.jps.or.jp/activities/awards/gakusei/2021_student_presentation_award.php

鈴木剛助教(岡崎研究室), "第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞",(日本物理学会,2021/10) https://www.jps.or.jp/activities/awards/jusyosya/wakate2022.php#r5

佐々木健人助教(小林研究室), "第 38 回(2021 年度) 井上研究奨励賞", (井上科学振興財団, 2021/12/13) http://www.inoue-zaidan.or.jp/f-02.html

戸川欣彦教授, "文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 令和3年度「秀でた利用成果」優秀賞", (文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム, 2022/1/26)
 課題名:無機系キラル結晶におけるキラル誘起スピン選択性
 https://www.nims.go.jp/news/press/2021/12/202112200.html

有田亮太郎教授, "Outstanding Referee", (American Physical Society, 2022/2/28) <u>https://journals.aps.org/OutstandingReferees</u>

島川祐一教授, "2021 (R3) 年度矢崎学術賞 (功績賞)", (公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団, 2022/3/10) https://www.yazaki-found.jp/news/news20220310_001.html

佐藤卓教授, "令和4年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)"(文部科学省, 2022/4/8) 受賞業績:中性子散乱による磁性体の磁気構造および励起に関する研究 https://www.mext.go.jp/b menu/houdou/mext 00989.html 島川祐一教授, "FRSC: Fellow of Royal Society of Chemistry", (Royal Society of Chemistry, 2022/4/26)

NAJAFZADEH Sahand 氏(岡崎研究室) "第 77 回年次大会(2022 年) 日本物理学会学生優秀発表賞(領域 6)",(日本物理学会, 2022/4)

https://www.jps.or.jp/activities/awards/gakusei/2022a-student-presentation-award.php#6

打田正輝准教授, "第 43 回本多記念研究奨励賞" (公益財団法人本多記念会, 2022/5/27) http://hondakinenkai.or.jp/awards/hresearch.html

●アウトリーチ

A01 班 計画研究

木村健太, 木村剛, 一般向け講演会・セミナー: "3 段階調光機能を有する反強磁性体の発見", QLC チャンネル ビデオ, 2022/2/5)

https://youtu.be/4DgB5L_Rr1I

A01 班 公募研究

佐々木孝彦, 一般向け講演会・セミナー: "令和3年 みやぎ県民大学「持続可能な未来社会を創る材料の科学 と技術」、講演題目「超伝導の科学と技術」",(みやぎ県民大学, 2021/10/25) http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/public/events/detail---id-539.html

佐々木孝彦,小中高向け授業・実験・実習:"仙台たなばた分団、2021年12月活動、活動名:電気が流れる有機材料、講演題目「電気が流れるやわらかい有機材料の物質科学」",(日本宇宙少年団たなばた分団, 2021/12/12)

http://www.yacsendai.com/reports/2021nian12yuehuodong

B01 班 計画研究

清水康弘,小中高向け授業・実験・実習:"名古屋大学出前講義(超伝導の磁気浮上等の模擬実験)",(豊橋市科学館,2021/12/12)

水上雄太, 芝内孝禎, 一般向け講演会・セミナー: "マヨラナ粒子の粒子数を磁場方向により制御することに成 功", (QLC チャンネルビデオ, 2022/2/1) <u>https://youtu.be/67Yw0Fh9Mzk</u>

Yujun Zhang, 和達大樹, 一般向け講演会・セミナー: "Photo-induced antiferromagnetic-ferromagnetic and spin-state transition", (QLC チャンネルビデオ, 2022/3/15) https://youtu.be/NGKmCuzXqi8

山本航平, 和達大樹, 一般向け講演会・セミナー: "レーザー光で引き起こされる超高速な磁気秩序の変化を観 測″, (QLC チャンネルビデオ, 2022/5/2) <u>https://youtu.be/ss4vFEIVL9c</u>

和達大樹,一般向け講演会・セミナー:" 東進 TV 兵庫県立大学理学部の紹介動画【兵庫県立大学理学部】大学 選びに迷う高校生にオススメ!世界初の技術で近畿 から世界を変える!! | 充実した研究施設・実験装置で医療に 貢献する!! (理系編)",(【公式】東進 TV, 2022/5/24) https://youtu.be/Je-Ctg00RmI

D01 班 計画研究

戸田泰則,小中高向け授業・実験・実習: "サイエンスオリエンテーリング 2021 in 札幌", (応用物理学会 北

海道支部, 2021/10/23)

https://annex.jsap.or.jp/hokkaido/old/index.htm

戸田泰則、一般向け講演会・セミナー: "北海道大学 戸田研究室 ポンププローブ分光実験"、(QLC チャンネルビデオ_実験室・研究室から、2022/3/3)
 https://youtu.be/5oM4Lsh4FMQ

小林研介,小中高向け授業・実験・実習: "令和3年度「東大の研究室をのぞいてみよう!~多様な学生を東大に~」",(東京大学,2022/3/28)

https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/admissions/undergraduate/houmon122020.html

●メディア報道

A01 班 計画研究

島川祐一, "『磁場と圧力』 複数手法で冷却可能 大きな熱量効果・高効率な熱制御実現", (科学新聞, 2021/6/25)

島川祐一, "ぷらっとラボ「磁気や圧力だけでひんやり」", (朝日新聞 (夕刊), 2021/7/12)

永崎洋, "超伝導体においてスピン配列の制御を実現-高速・低消費電力な超伝導メモリーなどへの応用に期待-", (JPubb, 2021/9/7)

https://release.itmedia.co.jp/release/sj/2021/09/07/2cd2ffb9cf61d85c09939cdbc44670c5.html

永崎洋, "産総研ら、超伝導体でスピン配列の制御を実現", (EE Times Japan, 2021/9/9) https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2109/09/news041.html

永崎洋, "超伝導体 スピン配列を制御 産総研 メモリー応用期待", (化学工業日報, 2021/9/9)

永崎洋, "産総研など スピン配列を制御 超伝導・磁性共存下で", (日刊産業新聞, 2021/9/27)

木村剛, "神戸大・阪大・東大、交流電場を用いた新規測定技術によりテラヘルツ電磁波の非相反線二色性の観測
 に成功",(日本経済新聞,2021/12/24)
 https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP624600_U1A221C2000000/

木村剛, "方向二色性の強磁場下で反強磁性秩序変数を観測", (科学新聞, 2022/1/28)

木村剛, "東大、異なる3方向から見たときに光の透過具合が変化する反強磁性体を発見", (マピオン, 2022/2/8) https://www.mapion.co.jp/news/column/cobs2365222-1/

木村剛, "東大、異なる3方向から見たときに光の透過具合が変化する反強磁性体を発見", (TECH+ powered by マイナビニュース, 2022/2/8) https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220208-2267684/

B01 班 計画研究

芝内孝禎, "東工大ら,磁性絶縁体内のマヨラナ粒子の性質解明", (OPTRONICS ONLINE, 2022/2/1) https://optronics-media.com/news/20220201/76209/

芝内孝禎, "東大など、キタエフ模型を実現する候補物質で「マヨラナ粒子」の観測に成功", (TECH+ powered by マイナビニュース、2022/2/2) https://news.mynavi.jp/techplus/article/2022020-2263477/

和達大樹, "(レーザー関連) 兵庫県立大学他/酸化物薄膜における超高速な強磁性の実現 - 光による新しいス ピン操作の可能性を示唆!-", (Optinews, 2022/3/14) https://optinews.info/2022/03/14/laser-spin-operation/

和達大樹, "兵県大ら,反強磁性薄膜をレーザーで強磁性に", (OPTRONICS ONLINE, 2022/3/14) https://optronics-media.com/news/20220314/76634/

和達大樹、"(レーザー関連)東京大学他/レーザー光で引き起こされるの超高速な磁気秩序の変化を観測 - 反
 強磁性体のスピン制御に道!-"、(Optinews, 2022/4/11)
 https://optinews.info/2022/04/11/university-tokyo/

和達大樹、"東大ら、レーザーによる超高速磁気秩序変化を観測"、(OPTRONICS ONLINE, 2022/4/11) https://optronics-media.com/news/20220411/76915/

和達大樹, "東大、ペロブスカイト型鉄酸化物薄膜の反強磁性磁気構造の高速な変化の観測に成功", (TECH+ powered by マイナビニュース, 2022/4/12) <u>https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220412-2319702/</u>

芝内孝禎, "東大、鉄系超伝導体における量子液晶の量子臨界点を発見", (TECH+ powered by マイナビニュー ス, 2022/5/10)

https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220510-2342614/

芝内孝禎, "東大、鉄系超伝導体における量子液晶の量子臨界点を発見", (ニコニコニュース, 2022/5/10) https://news.nicovideo.jp/watch/nw10903693?news_ref=watch_60_nw10903219

C01 班 計画研究

水島健, "阪大・東北大など、量子コンピュータの基礎となるトポロジカル超伝導体固有のスピン伝導現象を解 明",(日本経済新聞,2022/3/14)

https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP628307_U2A310C2000000/?fbclid=IwAR04taErSXTPZUFJlEazXQ5sj5U6runn4FfAitiqnYPI1ZUKgLhjmCfa28

D01 班 計画研究

戸川欣彦, "文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 令和3年度「秀でた利用成果」発表",(科学新聞, 2022/1/14)

戸川欣彦, "サブテラヘルツ帯の無線通信を実現する「キラル磁気ソリトン格子」。Beyond 5Gの実現へ", (PC Watch, 2022/6/22) https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1419222.html

戸川欣彦、"大阪公立大、Beyond 5G/6Gの実現につながる高周波エレクトロニクス材料を確認"、(TECH+ powered by マイナビニュース, 2022/6/22)

https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220622-2375534/

D01 班 公募研究

金澤直也, "新トポロジカル表面状態 鉄シリコン化合物で実現", (科学新聞, 2021/12/3)

●プレスリリース

A01 班 計画研究

木村剛, "交流電場を用いた新規測定技術によりテラヘルツ電磁波の非相反線二色性の観測に成功", (東京大学

大学院新領域創成科学研究科, 2021/12/24) https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/4283.html

島川祐一, "遷移金属酸化物の近藤効果を初めて実証 ~電子相関物性の設計・探索の新たなプラットホームを開 拓~", (京都大学, 2022/1/31) <u>https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2022-01-31</u>

木村剛, "3 段階調光機能を有する反強磁性材料を発見"(東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2022/2/4) https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/9259.html

工藤一貴, "4 倍に!超伝導状態への転移温度が上昇 結晶構造の上下対称性の回復で達成一超伝導体探索の新 たな指針へ—",(大阪大学大学院理学研究科, 2022/4/27) https://www.sci.osaka-u.ac.jp/ja/topics/10431/

B01 班 計画研究

芝内孝禎, "磁性絶縁体内部で現れるマヨラナ粒子の性質を解明~磁場の方向によって粒子数を制御可能~",(東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2022/2/1) https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/4307.html

和達大樹, "酸化物薄膜における超高速な強磁性の実現-光による新しいスピン操作の可能性を示唆!-", (兵 庫県立大学, 2022/3/7)

https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/news/index.html https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/news/puresuririsu_wadatiR040307.pdf

芝内孝禎, "量子液晶の量子臨界点が超伝導転移温度を上昇させることを解明", (東京大学大学院新領域創成科 学研究科, 2022/5/9)

https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/9471.html

B01 班 公募研究

米澤進吾, "60 年前に予言されていた液晶のような超伝導状態を酸化物で発見", (京都大学, 2022/4/22) https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2022-04-22

C01 班 計画研究

求幸年, "交流電場を用いた新規測定技術によりテラヘルツ電磁波の非相反線二色性の観測に成功", (東京大学 大学院工学系研究科, 2021/12/24) https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_202112241509158072399010.html

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_202112241509158072399010.html

紺谷浩, "自発的回転対称性の破れの発現機構の新発見 〜ツイスト2層グラフェンにおける複合自由度の重要性 〜", (名古屋大学, 2022/2/15)

https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/02/post-201.html

紺谷浩, "カゴメ格子超伝導体 CsV3Sb5 に浮かび上がるダビデ星模様と超伝導の謎を解明 ~幾何学フラストレー ションと量子干渉効果の競演~",(名古屋大学,2022/4/4) <u>https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/04/csv3sb5.html</u>

C01 班 公募研究

水島健, "量子コンピュータの基礎となるトポロジカル超伝導体固有のスピン伝導現象を解明 ― ヘリカルクーパ
 一対に由来したスピン流生成―", (大阪大学, 2022/3/14)
 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2022/20220314_1

川崎猛史, "トポロジカル材料を力で操る ~分子の形とねじれを制御する、独自の分子モデルで解明~", (名 古屋大学, 2022/3/30)

https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/03/post-237.html

D01 班 計画研究

戸川欣彦, "Beyond 5G の実現に新たな光 キラル磁気超構造が示す集団共鳴運動の観察に成功-サブテラヘル ツ帯まで広帯域に変調可能な高周波エレクトロニクス材料-",(大阪公立大学,2022/6/21) https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-00903.html

●開催報告

日本磁気学会第 236 回研究会/第 69 回化合物新磁性専門研究会がオンライン開催されました。

日時:2022年2月9日(水)13:00 ~ 18:00 共催:日本学術振興会、新学術領域「量子液晶の物性科学」 (HP 掲載先)https://www.magnetics.jp/event/topical_236/

第6回 QLC 若手コロキウムをオンライン開催しました。

日時:2022年2月15日(火)13:30~14:30 講演者1:岡村 嘉大氏(東京大学大学院工学系研究科) タイトル:トポロジカル磁性体における磁気光学分光 講演者2:鈴木 博人氏(東北大学学際科学フロンティア研究所) タイトル:共鳴非弾性X線散乱によるKitaev磁性体 a-RuCl₃の擬スピンハミルトニアンの決定 アブストラクト:<u>http://qlc.jp/2022/01/06/6thqlcyoungcolloquium/</u> 担当:和達大樹(兵庫県立大学)

令和3年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会をオンライン開催しました。

日時:2022年2月17日(木)~19日(土) プログラム: <u>http://qlc.jp/wp-content/uploads/2022/02/FYR03-QLCmeeting_program_20220210.pdf</u> 第3回QLC若手研究奨励賞を授与しました。 POHLE Rico 氏 (University of Tokyo) "Spin liquid and nematic states in the spin-1 honeycomb Kitaev model with bilinear-biquadratic interactions" 大熊 隆太郎 氏 (University of Oxford) "Discovery of frustrated van der Waals metals CeSiI and GdGaI" 北折 曉 氏 (University of Tokyo) "Tb doping impacts on magnetism and emergent inductance of YMn6Sn6" (HP 揭載先)<u>http://qlc.jp/2021/11/24/fyr03qlcmeeting/</u>

第7回QLC 若手コロキウムをオンライン開催しました。

日時:2022年5月31日(火)15:30~17:00 講演者:第3回QLC若手研究奨励賞、受賞者3名 講演者1:POHLE Rico氏(東京大学大学院工学系研究科) タイトル:Spin liquid and nematic states in the spin-1 honeycomb Kitaev model with bilinear-biquadratic interactions 講演者2:北折 曉氏(東京大学大学院工学系研究科) タイトル:創発インダクタンスの研究2022-対象系の大幅増加-講演者3:大熊 隆太郎氏(オクスフォード大)

タイトル:ファンデルワールス構造を持つヨウ化物磁性体における遍歴フラストレーション アブストラクト:<u>http://qlc.jp/2022/04/06/7thqlcyoungcolloquium/</u> 担当:和達大樹(兵庫県立大学)

新学術領域研究「量子液晶の物性科学」第2期公募研究キックオフミーティングを東 京大学(柏キャンパス)およびオンラインにてハイブリッド開催しました。

日時:2022年6月17日(金)10:00-18:25、6月18日(土)9:30-12:10 プログラム: http://qlc.jp/wp-content/uploads/2022/05/2nd-POR-kickoff-meeting_program-20220509.pdf (HP 掲載先) http://glc.jp/2022/04/07/2nd-por-kickoffmeeting/

第31回 QLC セミナーを東北大学(片平キャンパス)にて開催しました。

講師:M. de Boissieu 氏 (Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, SIMaP, Grenoble France) 日時:2022年6月17日(金) 10:00~11:30 場所:東北大学片平キャンパス セミナー室(2階)多元研西1号館(B06) タイトル:Thermal conductivity and lattice dynamics in structurally complex materials アブストラクト:<u>http://qlc.jp/2022/06/13/31stqlcseminar/</u> 担当:佐藤卓(東北大学)

●支援プログラムの紹介

総括班では、若手育成支援プログラムとして、(1)海外派遣支援、(2)交換プログラム、(3)若手研究奨励賞、 国際活動支援プログラムとして、(1)国際会議開催および支援、(2)海外研究者招聘・国際ビデオ講義、(3)シ ンポジウム提案、研究活動支援プログラムとして、(1)研究会主催、(2)QLCセミナー、(3)共同研究支援、な どの支援プログラムを実施しています。

●今後の予定

第16回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会)が開催されます。

日時:2022年11月25日(金)~11月26日(土) 場所:オンラインまたは東京大学 本郷キャンパス 武田ホール *最新情報は下記 HP 掲載先をご確認ください。 (HP 掲載先) <u>http://qlc.jp/2022/07/11/16thryoikioudan/</u>

令和4年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会をハイブリッド開催 します。

日時:2022年12月8日(木)~12月10日(土) 場所:名古屋大学およびオンラインを利用したハイブリッド開催 *最新情報は下記HP掲載先をご確認ください。 (HP掲載先) <u>http://qlc.jp/2022/07/11/fyr04qlcmeeting/</u>

●編集後記

6月17-18日に東大物性研究所で、「量子液晶第2期公募研究キックオフミーティング」がハイブリッド形式 で開催されました。本新学術領域発足直後の2020年春以降、COVID-19のため、全員が集まる会議はすべてオン ラインで行われてきたのですが、今回のキックオフミーティングは、現地参加された計画研究・公募研究の皆さ んと対面でお話のできる、待ちに待った機会となりました。オンライン会議の利点も浸透してきたとは言え、改 めて、対面式で発表したり議論したりできることの有難味を感じた次第です。今後も、より一層、本新学術に関 わる皆さんと対面でお目にかかれる機会が増えていけばと願っています。

量子液晶ニュースレター編集局: 小林研介(東京大学)<u>kensuke@phys.s.u-tokyo.ac.jp</u>

永崎洋(産総研)<u>h-eisaki@aist.go.jp</u> 岡崎浩三(東大物性研)<u>okazaki@issp.u-tokyo.ac.jp</u>

量子液晶の物性科学

文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」(令和元年度~5年度)
新学術領域研究
「量子液晶の物性科学」ニュースレター 第7号
2022 年7月 発行
領域事務局: <u>office@qlc.jp</u>
領域ホームページ: <u>http://qlc.jp/</u>