量子液晶の物性科学

News Letter Vol.4

2021 年 1 月 発行

目次

1．公募研究の紹介

A01 班

優柔不断なパイ電子集団の振る舞い ..... 佐々木 孝彦 2
チタン酸ストロンチウム電場誘起伝導表面におけるネマティック超伝導の検証 ..... 野島 勉 3
スピン軌道結合金属物質の探索 ..... 広井 善二 4
トポロジカル磁気構造に基づく量子液晶を具現する薄膜物質開発 ..... 松野 丈夫 5
液晶中の分子間磁気相互作用 ..... 内田 幸明 6

B01 班

磁気圧電効果を用いた電荷液晶の観測 ..... 塩見 雄毅 7
ネマティックな超伝導と結晶格子の深い関係 ..... 米澤 進吾 8
歪みによる物性制御と精密物性計測 ..... 細井 優 9
Achieving the depairing critical current density along *c*-axis in Fe(Te, Se) single crystals ..... 孫 悦 10
ハニカムネットワークを有する $BaPtAs_{1-x}Sb_x$ におけるミュオンスピン緩和からみたカイラル超伝導 ..... 足立 匡 11

C01 班

量子液晶におけるトポロジカル励起と創発現象 ..... 赤城 裕 12
液晶秩序を発現する古典異方粒子系における相転移ダイナミクス ..... 川﨑 猛史 13
パリティを破る磁性体の光電流応答 ..... 柳瀬 陽一 14
中性子星内部にひろがるネマティック超流動 ..... 水島 健 15

D01 班

強相関 π 電子がつくる電荷秩序・強誘電ドメインの形成機構解明と光機能探索 ..... 伊藤 弘毅 16
薄膜ネマティック超伝導体の開発 ..... 井上 悠 17
トポロジカルスピン液晶制御と巨大電子散乱現象 ..... 金澤 直也 18

2．QLC チャンネルより

反強磁性体に内在するドメインを偏光顕微鏡で可視化 ..... 木村 健太，木村 剛 19
はしご型鉄系化合物における軌道秩序 ..... 青山 拓也，大串 研也 20
固体物質における正三角形の分子の形成をとらえた！ ..... 岡本 佳比古 21

3．若手研究者の紹介

極低温・高磁場で動作する時間分解 STM の開発に向けて ..... 林 寛 22
汎関数くりこみ群に基づく「ループ流のミクロな機構」の理論研究 ..... 田財 里奈 23
軌道自由度を取り入れた銅酸化物高温超伝導体の微視的理論 ..... 渡部 洋 24
フラストレート磁性体の超交換相互作用の電場による制御 ..... 古谷 峻介 25

次ページへ続く

新学術領域研究 令和元年度～5年度

量子液晶の物性科学

Quantum Liquid Crystals

http://qlc.jp/

４．その他

「量子物質開発フォーラム」開催報告 26
「第 14 回物性科学領域横断研究会」開催報告 26
人事異動 27
開催報告 28
支援プログラムの紹介 29
今後の予定 29
編集後記 30

優柔不断なパイ電子集団の振る舞い

A01 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、プラスティックのように「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、さかのぼると有機物質に特徴的な電子状態が関わっていることがわかります。有機物質の中には、電気伝導性の高いもの、磁性を有するものなど無機化合物同様に電子的機能性を有する物質群もあります。このような導電性を持つ有機物質は、近年、有機発光デバイス、有機トランジスターなどの軽量で「曲がる」エレクトロニクス材料としても注目されています。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、ガラスの様に振る舞うパイ電子の研究について紹介します。

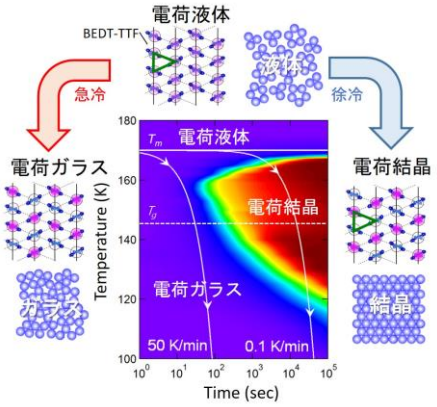


図 1:分子性有機物質に現れる電荷液体（高電気伝導状態）－電荷ガラス－電荷結晶（絶縁体状態）状態変化の様子。ガラス化、結晶化には大きな冷却速度依存性があらわれる。

分子性有機物質θ_m-(BEDT-TTF)$_2$TlZn(SCN)$_4$ は、BEDT-TTF と呼ばれる分子が三角格子上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 分子層をアニオン分子 TlZn(SCN)$_4$ 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、室温では高い電気伝導性を示しますが（電荷液体）、低温では三角格子上に配列した BEDT-TTF 分子上のパイ電子間に働く斥力の相互作用によって電荷秩序という絶縁体状態(電荷結晶)になっています。

パイ電子が示す「優柔不断な性質」の一つが、電荷のガラス化です。ガラス化現象は極めて普遍的な現象で、窓ガラス(ソーダ石灰ガラス)などの構造ガラス以外にも、金属ガラスやスピングラスなど、自然界においてよく現れる現象です。私たちが対象としたガラス状態は、有機物質中のパイ電子によるガラス化現象で、パイ電子が無秩序な配置のまま凍結した状態です。このガラス状態は電子の結晶化が妨げられた場合に生じ、強い電子相関と幾何学的フラストレーションをもった分子性有機物質で観測されます。分子性有機物質θ_m-(BEDT-TTF)$_2$TlZn(SCN)$_4$ は、私たちが発見した電荷ガラス形成物質です[1, 2]。高温では、パイ電子は遍歴的に運動することができ高い電気伝導性を示します。ゆっくりと低温に冷やしていくと 170 K で電荷が+0.85 価と+0.15 価に分離して周期的に整列した「電荷結晶」状態へと転移します。しかし、50 K/min 以上の速さで急冷すると、電子のガラス状態である「電荷ガラス」状態になります。この結晶－ガラス変化が起こる温度領域では、温度を一定に保っていても、時間の経過とともにガラス状態が徐々に結晶化していく過程が電気抵抗の時間依存性として観測されます。この変化は数秒から数時間、数日という電子の振る舞いとしては驚くほど長い時間スケールで起こります。このような電子のガラス化現象は一般的なガラス形成物質と多くの類似点をもつことが明らかになりました。自然界で普遍的に現れるガラス化現象への理解をより一層深めるものです。

参考文献

[1] S. Sasaki, K. Hashimoto, R. Kobayashi, K. Itoh, S. Iguchi, Y. Nishio, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, N. Yoneyama, M. Watanabe, A. Ueda, H. Mori, K. Kobayashi, R. Kumai, Y. Murakami, J. Müller, and T. Sasaki, *Science* **357**, 1381 (2017) [https://doi.org/10.1126/science.aal3120].

[2] 橋本顕一郎、佐々木孝彦、固体物理 **53**, 745 (2018).

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）

チタン酸ストロンチウム電場誘起伝導表面におけるネマティック超伝導の検証

A01 班　野島 勉

チタン酸ストロンチウム（$SrTiO_3$）は絶縁体状態において比誘電率ε_rが 20000 以上になる量子常誘電性（量子ゆらぎにより秩序しない強誘電に近い性質）を低温で示す一方、あらゆる酸化物中で最も低い 10^{17} cm^{-3} という電子キャリア密度（一般的な金属の 1/100000 以下）で超伝導になる、という特異な物性を合わせ持つ物質として知られています。バルクの $SrTiO_3$ は Sr サイトの Ca 置換や ^{16}O サイトの ^{18}O 同位体置換、圧縮歪み、強電場印可といった摂動を加えると、強誘電体となることから、超伝導と強誘電性の共存、強誘電的量子臨界ゆらぎと超伝導発現の関係が長らく議論されてきました[1,2]。これらに加え、近年電気二重層トランジスタ（図 1）やヘテロ接合を用いて表面/界面に形成される $SrTiO_3$ の 2 次元電子系では、2 次元化による空間反転対称性の破れ（反対称性スピン軌道相互作用）の効果により、伝導を担う Ti-3*d* 電子の t_{2g}（d_{xy}, d_{yz}, d_{zx}）軌道が分裂し再混成することによって多軌道性ラシュバ超伝導という新たな側面も見せることも分かってきました[3]。以上のような軸性の強い強誘電性や異方的電子軌道を伴う 2 次元 $SrTiO_3$ の超伝導特性には、本領域の主要テーマである量子液晶性（ネマティシティ）が潜んでいると予測されます。

本研究では、$SrTiO_3$ 単結晶の清浄表面に電気二重層トランジスタという一種の電界効果デバイスを作製することにより（図 1）、キャリア面密度（表面電場）が人工制御可能な 2 次元超伝導電子系を実現し、超伝導特性におけるネマティシティの検証とその特性制御を行っています。具体的には 2 次元 $SrTiO_3$ 系に現れる強誘電転移、超伝導転移、および超伝導転磁場の一軸性がキャリア面密度や試料サイズ、結晶方位によってどのように変わるかを包括的に調べています。これまで低キャリア密度において強誘電性由来、高キャリア密度において異方的 d_{xz} ,d_{zx} 軌道由来と考えられる超伝導転移磁場の一軸異方性を見出しており、これらのキャリア密度依存性を詳細に測定することにより、特徴的なネマティック超伝導の全貌を明らかにする予定です。特に強誘電性が起源となるネマティック超伝導の実現は新たな量子液晶物質の開発となるだけでなく、未だ議論の続く $SrTiO_3$ における超伝導機構の解明にもつながるものと期待しています。

本研究から、金属性と強誘電性という、一見両立が不可能な性質の共存状態に関する知見も得られています。本年度の詳細な実験により、少なくとも金属－絶縁体転移近傍のキャリア密度領域における金属状態は、短距離秩序した強誘電ドメインがグラス的に固化したまま金属性を維持する「誘電性金属グラス」と言うべき特殊な電子状態を形成していることが、分かってきました。これと超伝導の量子液晶性がどのようにつながるかが課題です。

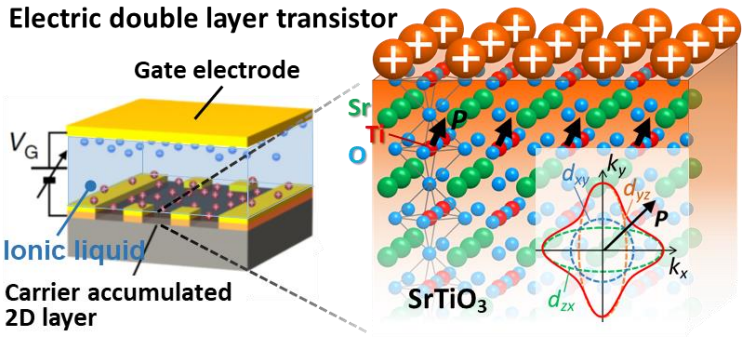


図 1：$SrTiO_3$ を用いた電気二重層トランジスタ（左）と表面近傍（右）の模式図、および予想される多軌道混成による 2 次元フェルミ面（右下）。

参考文献

[1] C. W. Rischau *et al*., *Nat. Phys.* **13**, 643 (2017).
[2] R. Russell *et al*., *Phys. Rev. Mater.* **3**, 091401(R) (2019)
[3] Y. M. Itahashi, T. Ideue, Y. Saito, S. Shimizu, T. Ouchi, T. Nojima, Y. Iwasa、*Science Advances* **6**, eaay9120 (2020) [https://doi.org/10.1126/sciadv.aay9120].

研究室 HP: http://ltsd.imr.tohoku.ac.jp/

野島勉（東北大学・金属材料研究所・准教授）

スピン軌道結合金属物質の探索

A01 班　広井 善二

固体の物性はフロンティア電子の性質により決定される。フロンティア電子の軌道が重なって作られるバンドが２つの電子により完全に埋まれば半導体となり、途中まで占有されて空きができれば金属となる。単純な金属は球状のフェルミ面をもち、電子はほとんど自由に振る舞うが、しばしば何らかの相互作用により自由でないフェルミ液体となる。図１に示すように、金属のフェルミ面は様々な摂動に対して不安定となり、温度低下とともに何らかの対称性の破れが引き起こされ、ある秩序状態に落ち込む。例えば、電子格子相互作用が弱ければ、電子はクーパー対となってフェルミ面にギャップが開き超伝導となるが、電子格子相互作用が強ければ、電荷密度波の形成によりフェルミ面が消失して絶縁体となる。一方、電子間のクーロン相互作用が適度に作用すると高温超伝導が出現し、強いと磁性が誘起されて最終的にはモット絶縁体となる。さらに、磁性イオンと伝導電子間の近藤効果に起因して重い電子状態が出現することが知られている。このように、フェルミ液体不安定性は電子系の相転移を引き起こし、そこで見られる劇的な物性変化の観測は物性研究の醍醐味となり、結果として出現する秩序状態は、超伝導や強磁性状態のように応用研究の重要な対象となる。

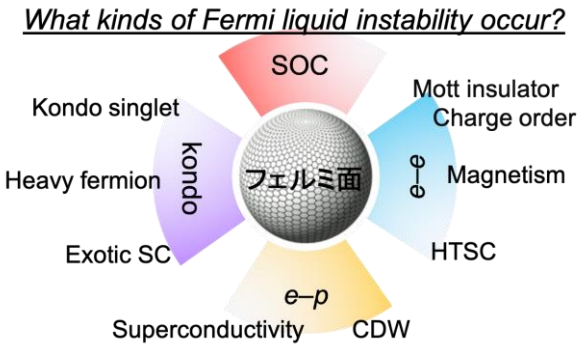


図 1:様々なフェルミ液体不安定性により産み出される物性

最近、研究のフロンティアとして、スピン軌道相互作用（SOC）の効果が注目を集めている。SOC が摂動として有効に働くとき、どのようなフェルミ液体不安定性が現れ、どのような電子の秩序状態が安定化されるのか、そこでどのような現象が起こるのか興味深い。Liang Fu は、2015 年に、SOC に基づく新しいフェルミ液体不安定性を提案し、それを示す電子系をスピン軌道結合金属（SOCM）と名付けた[1]。SOCM とは、高温で空間反転対称性を有する偶パリティの結晶構造をもち、大きな SOC を有する電子系である。そこでは SOC 由来のフェルミ液体不安定性のために低温で自発的に空間反転対称性を破る相転移が起こる。低温相は空間反転対称性を持たないため、SOC に新たな項として奇パリティの反対称スピン軌道相互作用（ASOC）が加わる。この ASOC により、高温相で守られていたフェルミ面のスピン縮退が解け、低温相ではスピン分裂した 2 枚のフェルミ面が現れる。逆に言えば、ASOC を活性化してスピン縮退を解くことが相転移の駆動力となる。結果として現れる奇パリティ多極子相では、パリティ揺らぎによるエキゾチックな超伝導や特異な電流磁気効果が期待される。

本研究では SOCM の候補物質を探索し、その物理を明らかにすることを目指している。現在、候補物質として提案されているのは、5d パイロクロア酸化物 $Cd_2Re_2O_7$ (CRO)と $LiOsO_3$ である[2]。前者はすでに詳細な研究が行われ、確かに SOCM の典型例と考えられているが、後者の理解は進んでいない。われわれは $PbRe_2O_6$ が新しい候補物質であると考えて研究を行っている[3]。$PbRe_2O_6$ は CRO と全く異なる結晶・電子構造を持つにもかかわらず、非常によく似た 2 段相転移を示し、確かに反転対称性を破って何らかの奇パリティ多極子相が安定化されていると思われる。CRO との比較を通して、SOCM の物理が明らかになると期待される。

[1] L. Fu, Phys. Rev. Lett. **115**, 026401 (2015).
[2] Z. Hiroi, J. Yamaura, T. C. Kobayashi, Y. Matsubayashi and D. Hirai, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 024702 (2018).
[3] S. Tajima et al., J. Solid State Chem. **288**, 121359 (2020).

研究室 HP: https://hiroi.issp.u-tokyo.ac.jp/saito/Hiroi_Lab.html

広井善二（東京大学・物性研究所・教授）

トポロジカル磁気構造に基づく量子液晶を具現する薄膜物質開発

A01 班　松野 丈夫

我々の研究室では遷移金属酸化物のエピタキシャル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。エピタキシャルとは単結晶基板の上に薄膜が方位を揃えて成長する状態を言います。二種類のエピタキシャル薄膜が接する界面は原子レベルで平坦であり、かつ方位が揃った界面ですので、物理学を探究する上で理想的な舞台です。そこでは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。

本研究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。スキルミオンというのは右図にあるような渦状のスピン構造を指し、それ自体が 1 個、2 個と数えられる準粒子です。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）相互作用です。強いスピン-軌道相互作用と空間反転対称性の破れとの共存により $\boldsymbol{D}\cdot(\boldsymbol{S}_1\times\boldsymbol{S}_2)$の形を持つ DM 相互作用が現れることが知られており、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必ず界面由来の DM 相互作用が期待できます。我々の研究室で実際に合成した界面を図 2 に示します。強磁性体 $SrRuO_3$ に強いスピン-軌道相互作用を持つ $SrIrO_3$ [1]を組み合わせたもので、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により界面 DM 相互作用とスキルミオンの存在を提唱しています [2,3]。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相互作用を明らかにすることを目標としています。本研究領域においてバックグラウンドの異なる研究者の方々との交流を通して量子液晶の学理構築に貢献したいと考えております。

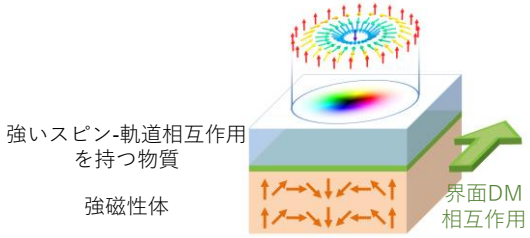


図 1：界面でのジャロシンスキー-守谷（DM）相互作用の模式図。

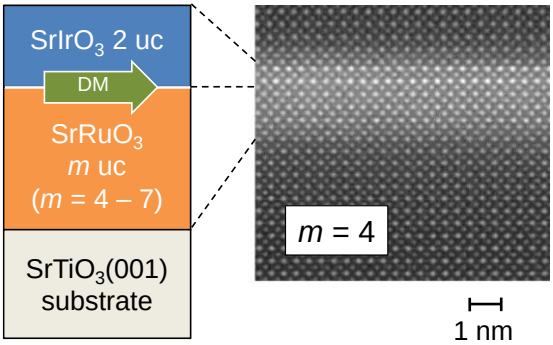


図 2：スキルミオンを生み出す $SrRuO_3$-$SrIrO_3$ 界面の模式図（左）と透過型電子顕微鏡像（右）。

参考文献

[1] J. Matsuno, K. Ihara, S. Yamamura, H. Wadati, K. Ishii, V. V. Shankar, H.-Y. Kee, and H. Takagi, *Physical Review Letters* **114**, 247209 (2015) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.247209].

[2] 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].

[3] Y. Ohuchi, J. Matsuno, 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].

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）

液晶中の分子間磁気相互作用

A01 班　内田 幸明

私は「分子の凝縮相の方の液晶相」における磁性に関する研究をしています。そのため、普段の文章の書き出しや講演の話し始めは、「液晶とはディスプレイの種類のことではなく、液体と結晶の間の状態（相）のことを指すとともに、液晶相を示す物質のことも単に液晶と呼びます。」というのが常套句です。本新学術領域では「液晶」は分子の凝縮相やその材料を指さないことの方が普通ですが、ここでは「液晶」を従来の分子の凝縮相の意味で使います。本稿では、液晶相の中で分子がどのように互いに影響を及ぼし合うのかという観点から、私が研究している液晶中の分子間磁気相互作用について、最近、分かってきたことを紹介します。

液晶中では分子がそこそこ同じ方向を向いています。この「そこそこ」というのが非常に重要で、バラバラではないが、完全に同じ方向を向いているわけでもないのです。しかも、分子は絶えず動き続けています。接触している二つの分子が、平均的に 1 ns 未満の短時間（τ_{LC}）の後では、離れ離れになる程、激しく動いています [1]。そんな状態の分子一つ一つに電子スピンを持たせた場合に何が起こるのかを調べるのが、液晶中の分子間磁気相互作用の研究です。

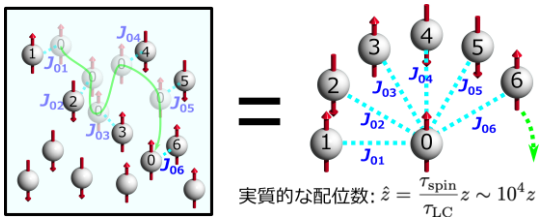


図 1: 液晶中の分子間磁気相互作用の連鎖による実質的な配位数の増加。

電子スピンを持つ液晶には、金属元素と有機ラジカルをスピンソースとする金属錯体液晶と有機ラジカル液晶の二種類が知られていますが、私が出身研究室（京都大学田村類教授研究室）で合成された有機ラジカル液晶 [2] に出会ったところから研究がスタートしました。その頃、電子スピンを持つ液晶に特徴的な磁気特性はまだ知られていませんでしたが、私は、ちょっとした思いつきで有機ラジカル液晶を水に浮かべて磁石を近づけてみたところ、磁石に引き寄せられることを見出しました [3]。また、同じ物質でも結晶状態では同じ磁石では動かなかったことから、磁化率の温度依存性測定を行い、この物質が結晶相から液晶相に転移するとき（この温度を融点と呼び、液晶相から等方相への転移を透明点と呼びます）に磁化率が増加することと、磁気相互作用が不均一であることを見出しました [4]。

このような挙動は知られておらず、メカニズムを提案するまでに 10 年を要しました [1]。きっかけは、分子運動が磁化率を増加させる現象を見つけたことにあります [5]。現在考えているのは、相互作用の不均一性に依って生じるスピングラス的な僅かな磁化率の上昇が、分子運動に依って増幅するというものです。分子が別の分子と相互作用した時に生じた微視的な状態の変化としてのスピン偏極が消失する前に（寿命τ_{spin} は 1 μs 程度と考えています）、次々に他の分子との相互作用が連鎖することで、相互作用が動的に記憶されて、実質的な配位数が増大する（$z \rightarrow \hat{z}$）というモデルです（図 1）。実際に、分子動力学シミュレーションの結果にこのモデルを適用することで実験結果を再現することに成功しました。現在、この液晶へのスピン注入について検討しています。

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

[2] N. Ikuma, R. Tamura, S. Shimono, N. Kawame, O. Tamada, N. Sakai, J. Yamauchi, Y. Yamamoto, *Angewandte Chemie International Edition* **43**, 3677 (2004) [https://doi.org/10.1002/anie.200460007]

[3] Y. Uchida, 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]

[4] Y. Uchida, 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]

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

研究室 HP：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）

磁気圧電効果を用いた電荷液晶の観測

B01 班　塩見 雄毅

私が学生だった頃、所属していた研究室ではマルチフェロイクスの研究が流行っていて、先輩や後輩は対称性の破れた磁性絶縁体試料に対して外部磁場をかけながら電気分極の測定（電気磁気効果の測定）を行っていました。マルチフェロイクスは磁性と強誘電性を両方持つ物質のことで、らせん磁気構造に関係した電気分極の発現がホットトピックでした。私は当時余り日の当たらない磁性金属のホール効果の研究をしていたので、物質を変えて測定するだけで所謂良い雑誌に論文が載ってずるいなと（ひねくれて）やっかみ全開で同僚を眺めていたのを思い出します。そのような同僚たちは最近では磁性金属でホール効果を測っているようで、研究の流れというのは不思議なものだなと歳を重ねてつくづく思います。

電気磁気効果などの対称性の破れに関係した研究を避けていた私ですが、これまた不思議な縁で、研究室を立ち上げてから、今更ながらどっぷりと浸かることになりました。それが題名にある磁気圧電効果の研究です。

磁気圧電効果とは、空間反転対称性と時間反転対称性が破れた磁性金属で、電流によって歪みが生じる応答（およびその逆応答）です。通常の圧電効果は絶縁体で発現するのに対して磁気圧電効果の対象物質は金属であり、ある理論論文[1]によれば電気磁気効果の金属版と言えるそうです。ここにきて電気磁気効果の研究とは、ぐるっと回って原点回帰した感があります。

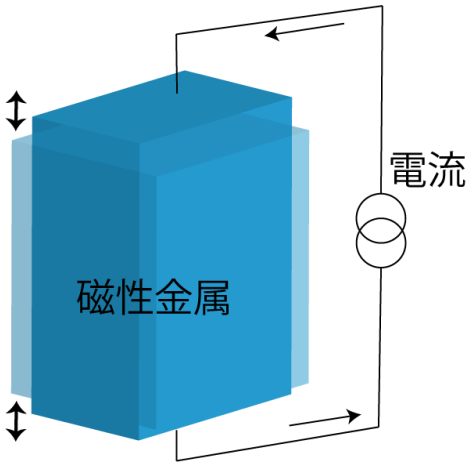


図 1：磁気圧電効果の概念図

研究室を立ち上げてすぐの頃に、この現象に関する柳瀬陽一教授（京大）の理論講演[2]をたまたま研究会で耳にし、私が有しているレーザードップラー振動計による動的歪み計測手法が観測に使えるのではないかと思ったのが研究のスタートです。温度を冷やしながらの測定に多少苦戦しましたが、無事にそれらしき信号は見えてきています[3-5]。

しかし、磁気圧電効果の微視的機構の背後にあると言われている電流に誘起された電荷液晶状態は私の中では見えた気がしていません。見えた気がするためには物質を変えて測定するだけでなく、計測をより精緻化して物理情報をもっと引き出せるようにすることが不可欠です。私自身が納得いく形になるまで計測技術を磨きたいと思って、この新学術領域の B01 班に参画させて頂いています。

参考文献

[1] D. Varjas, A. G. Grushin, R. Ilan, and J. E. Moore, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 257601 (2016) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.257601].

[2] H. Watanabe and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **96**, 064432 (2017) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064432].

[3] Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, and S. Ishiwata, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 127207 (2019) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.127207].

[4] Y. Shiomi, Y. Koike, N. Abe, H. Watanabe, and T. Arima, *Phys. Rev. B* **100**, 054424 (2019) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.054424].

[5] Yuki Shiomi, Hidetoshi Masuda, Hidefumi Takahashi, and Shintaro Ishiwata, *Sci. Rep.* **10**, 7574 (2020) [https://doi.org/10.1038/s41598-020-64530-2].

研究室 HP: http://yukishiomi.com/

塩見雄毅（東京大学・総合文化研究科・准教授）

ネマティックな超伝導と結晶格子の深い関係

B01 班　米澤 進吾

超伝導は、一言で言うと電気抵抗がゼロになる現象ですが、その中にいろいろな種類があることをご存知でしょうか。超伝導の種類を分類するにはいくつかの方法がありますが、一番標準的なのが「対称性」を使った分類です。全ての超伝導体では基本的性質として「ゲージ対称性」という対称性が破れていることがわかっています。これ以外の対称性も超伝導によって破れるかどうかで超伝導を分類できるのです。この分類の例として、時間反転対称性（時間を逆に回したら同じに見えるかどうか；強磁性体のように自発磁化が生じている場合が該当）の破れた「カイラル超伝導」、ある方向とその逆方向で波の位相が 180 度ずれており、反転対称性を破った「奇パリティー超伝導」などが挙げられます。

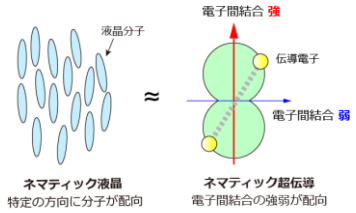


図 1:ネマティック液晶とネマティック超伝導の比較。

このような超伝導の「新種」として「ネマティック超伝導」（図 1 右）というものが最近見つかりました[1,2]。このネマティック超伝導とは、本来等価な方向にもかかわらず超伝導を形成する強さ（専門用語でいうとギャップの大きさ）が異なっているという、「回転対称性の破れた」超伝導状態です。これは考えてみると奇妙なことです。電子は超伝導状態にいるので流動性を持っているわけですが、それにもかかわらず特徴的な方向を有しているということになります。この状況は、液晶で棒状分子がある方向に整列しつつ流動性を保っているという「ネマティック液晶状態」（図 1 左）によく似ています。これが、この新種の超伝導がネマティック超伝導と呼ばれる理由です。ネマティック超伝導は本領域の研究テーマである「量子液晶」の典型例の一つといえます。

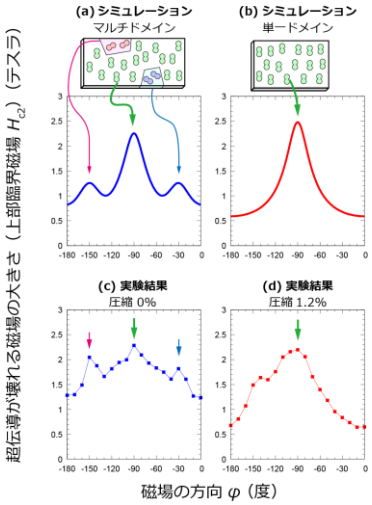


図 2:ネマティック超伝導ドメインの結晶ひずみによる制御[3]の解説。

さて、ネマティック超伝導のもつ特徴的な方向をどう検出したり制御したりできるかが研究の大きなポイントになります。5 年ほど前にネマティック超伝導がドープした Bi_2Se_3 で見つかりましたが、ほとんどの実験では、物理量を磁場の方向の関数として観測し、それが結晶の持っている回転対称性とマッチするかどうかでネマティック超伝導性が検証されてきました[1,2]。

我々はその次の段階として、ネマティック超伝導と結晶格子の深い関係に着目しています。ネマティック超伝導が形成されれば、その特異な方向に結晶格子が引きずられ、わずかに変形してもいいはずです。逆に、結晶格子を外的に変形すればネマティック超伝導の方向性を変えることができるはずです。実際、我々は最近、結晶を特定の方向にひずませてネマティック超伝導を能動的に制御することに初めて成功しました。この研究では、ネマティック超伝導体 $Sr_xBi_2Se_3$ へ印加するひずみ量を変えながら超伝導の壊れる磁場（上部臨界磁場 H_{c2}）の異方性を調べ、ネマティック超伝導の作るドメイン構造が大きく変えられたことを示しました（図 2）[3]。一方、ネマティック超伝導の形成に引きずられた結晶格子の変形を検出することも同様に重要です。そのために、私たちは光ファイバーに刻んだ回折格子（Fiber Bragg grating; FBG）を試料に貼り付け、試料の複数の方向の変形を同時に検出しようとする技術を開発しています。この技術はネマティック超伝導だけでなく、他の「量子液晶」にも使えるはずなので、新たな量子液晶の検出技術として確立できることを目指しています。

[1] K. Matano *et al*., Nature Phys. **12**, 853 (2016); S. Yonezawa *et al.*, Nature Phys. **13**, 123 (2017); etc.
[2] レビューとして、俣野・米澤 日本物理学会誌 2018 年 2 月号; S. Yonezawa, Condens. Matter **4**, 2 (2019).
[3] I. Kostylev, S. Yonezawa *et al*., Nature Commun. **11**, 4152 (2020).

米澤進吾（京都大学・理学研究科・准教授）

歪みによる物性制御と精密物性計測

B01 班　細井 優

物質に歪みを導入する技術は電子状態の揺らぎを調べるプローブとして、また圧力に代わる電子状態を制御するパラメータとしても活用され、物性研究として非常に有力なツールとして注目されています。なかでも鉄系超伝導体をはじめとして、結晶構造の回転対称性を破った異方的な電子状態である“ネマティック液晶状態”がしばしば報告されており、その起源や電子状態や超伝導等に与える影響が盛んに議論されています。このようなネマティック液晶状態と同じ対称性を有する異方的な歪みは共役な外場として働き、ネマティック液晶状態に起因した電子系の異方的なゆらぎと密接に関係します。この関係性を応用して歪みに対する電気抵抗応答である弾性抵抗から液晶状態の感受率を定量的に評価することができます。

最近、この弾性抵抗を応用して、A01 班の東北大学大串研也先生の研究グループで開拓された物質であるはしご型鉄系超伝導体 $BaFe_2S_3$ において軌道スイッチング現象の存在を明らかにしましたのでご紹介いたします[1]。$BaFe_2S_3$ は鉄原子が 2 列に並んだ 1 次元的なはしご構造を有しており、典型的な鉄系超伝導体における鉄原子の 2 次元的な正方格子構造に比べ、次元性が低くより強い電子相関効果が働くことが期待され、実際常圧下では絶縁体的な電気伝導を示します。この物質には T^* 異常と呼ばれる 180 K 付近において電気伝導性がわずかに良くなる兆候があり、何らかの電子相転移の存在が示唆されてきましたが、磁気構造や結晶構造にも大きな変化がなくその起源は謎のままでした。そこで T^* 異常の電子状態を明らかにするために弾性抵抗測定を試みました。その結果、弾性抵抗は T^* 付近で極小構造を示し（図 1）、電子相転移を示唆する証拠を掴むに至りました。さらにこの振る舞いはもともとはしごの足方向に延びていた電子軌道が、T^* 付近ではしごの足掛け方向に広がる軌道に切り替わる“軌道スイッチング”によって説明できることを明らかにしました。

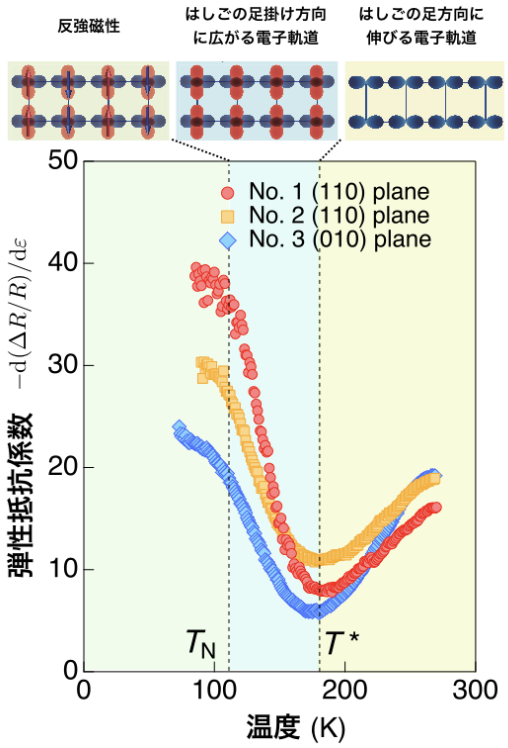


図 1：BaFe2S3 の弾性抵抗と電子相図[1]。T^* 異常付近で弾性抵抗は極小構造を示し、何らかの電子相転移が起こっていることを示唆しています。この振る舞いは T^* 付近で電子軌道スイッチングを通じて等方的な電子状態が実現していると考えられます。

このように歪みに対する摂動応答である弾性抵抗は電子状態を調べる上で非常に強力な物理量です。QLC 公募研究ではより大きな歪みを印加させ、単に電子状態を調べるだけでなく電子状態制御を行い、さらにこの歪み制御下において動作する走査型磁気顕微鏡と組み合わせた新たなプローブ開発を進めています。このプローブ開発により、例えば超伝導状態における時間反転対称性の破れの検証やその制御へとつなげていくことを目指しています。

参考文献

[1] S. Hosoi, T. Aoyama, K. Ishida, Y. Mizukami, K. Hashizume, S. Imaizumi, Y. Imai, K. Ohgushi, Y. Nambu, M. Kimata, S. Kimura, T. Shibauchi, *Physical Review Research* **2**, 043293 (2020). [https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.043293].

研究室 HP: https://qc.mp.es.osaka-u.ac.jp/

細井　優（大阪大学・基礎工学研究科・助教）

Achieving the depairing critical current density along *c*-axis in Fe(Te, Se) single crystals

B01 班　孫 悦

The depairing critical current density J_c determined by the depairing process of Cooper pairs, is crucial for the study of the superconducting mechanism, because it directly provides information on the critical velocity of superfluids, and the magnitude as well as the symmetry of the superconducting (SC) gap. The depairing process occurs when the kinetic energy of the supercurrent exceeds the condensation energy. However, it is difficult to be achieved, since the vortex flow occurs preceding the depairing at much smaller current density. In addition, it is very difficult for a clean single crystal to achieve this limit since the extremely large current is needed. To solve this problem, micro-fabrication technique is used to reduce the size of the crystal to micrometer or sub-micrometer scale.

Here, we report the fabrication of a series of $Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x$ single crystals with T_c ranging from 8.6 K to 13.7 K (different amounts of excess Fe, y), into *c*-axis nano-bridges with a square-micrometer cross-section [Figs. 1(a)-1(c)]. The single crystals with different T_c were prepared by annealing with appropriate amount of O_2 or Te as explained in detail in our review paper [1]. The transport current-voltage measurements were performed by using the pulse technique (duty ratio ~3.3×10^{-5}) to avoid possible heating effect. The obtained J_c reaches a very large value, about one order of magnitude larger than the depinning J_c, but comparable to the calculated depairing J_c based on the Ginzburg-Landau (GL) theory. The temperature dependence of the depairing J_c follows the GL-theory down to ~0.83 T_c, then increases with a reduced slope at low temperatures, which can be qualitatively described by the Kupriyanov-Lukichev (KL) theory [Fig. 1(d)]. Our study provides a new route to understand the behavior of depairing J_c in iron-based superconductors in a wide temperature range [2].

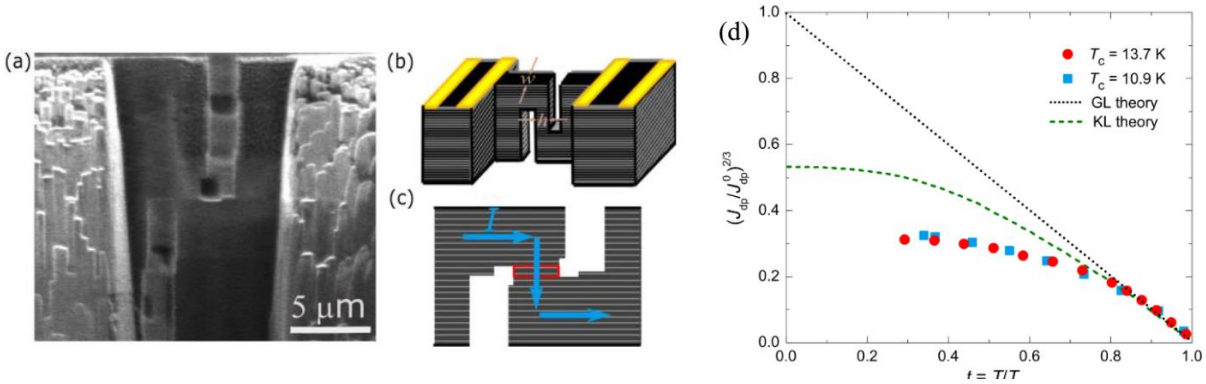


Fig. 1 (a) The scanning ion microscopy images of the fabricated *c*-axis structure. Schematic drawing of (b) the bridge structure and (c) the current-flowing path along the *c*-axis bridge. (d) Temperature ($t = T/T_c$) dependence of the depairing current density, normalized to the extrapolated value $(J_{dp}/J_{dp}^0)^{2/3}$, along *c*-axis for the $Fe_{1+y}Te_{0.6}Se_{0.4}$ with T_c = 13.7 K and 10.9 K. The dotted and the dashed line represent the results from the GL-theory and KL-theory, respectively.

参考文献

[1] Y. Sun, Z. Shi, and T. Tamegai Supercond. Sci. Technol. **32**, 103001 (2019) (invited review)
[2] Y. Sun, H. Ohnuma, S. Ayukawa, T. Noji, Y. Koike, T. Tamegai, and H. Kitano Phys. Rev. B **101**, 134516 (2020)

研究室 HP: http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-kitano/

孫悦（青山学院大学・理工学部物理・数理学科・助教）

ハニカムネットワークを有する $BaPtAs_{1-x}Sb_x$ における ミュオンスピン緩和からみたカイラル超伝導

B01 班　足立 匡

電気抵抗がゼロになる超伝導の発現メカニズムの研究では，どのように電子が対を形成するのかを明らかにすることが重要です。これまで、フォノン、スピンゆらぎ，軌道ゆらぎなどによる超伝導が発見されてきました。これまでに発見されている多くの超伝導体では、電子のスピンが互いに反対向きのスピン一重項の対によって超伝導が発現してきましたが、近年，電子対を形成する 2 つの電子が軌道運動をすることで自発的に磁場を発生するカイラル超伝導が注目を集めています。なぜなら、一般には超伝導は磁場を嫌うので、どのようなメカニズムで超伝導が発現しているのかに興味が持たれているからです。私たちは、この新しい電子対を実験的に探索しています。

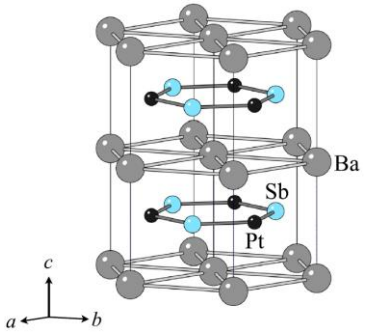


図 1. $BaPtAs_{1-x}Sb_x$（$x = 0.2, 1.0$）の結晶構造。Pt と Sb(As)がハニカムネットワークを形成しています[2]。

以前、図 1 のようなハニカム状の格子をもつ物質でカイラル *d* 波超伝導が発現すると理論的に指摘されました[1]。そこで、私たちは、A01 班の工藤一貴教授のグループとともに、このようなハニカム状のネットワークを持つ超伝導体 $BaPtAs_{1-x}Sb_x$ [2,3]の研究を行いました。高品質の単結晶試料を準備し、微弱な磁場を検出することが得意なミュオンスピン緩和によって、自発磁場の有無を詳しく調べました。実験には、茨城県東海村にある J-PARC MLF ミュオン施設の世界最高強度パルスミュオンビームを用いました。

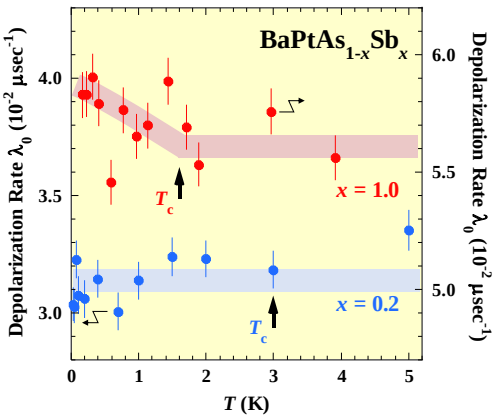


図 2. $BaPtAs_{1-x}Sb_x$（$x = 0.2, 1.0$）におけるミュオンスピン緩和率λ_0の温度依存性。$x = 1.0$ では T_c 以下で緩和率が増大し、超伝導状態で自発磁化が発生していることを示しています。

図 2 に、$BaPtAs_{1-x}Sb_x$ の $x = 0.2$ と 1.0 におけるミュオンスピン緩和率の温度依存性を示します。As サイトを Sb で 20%置換した $x = 0.2$ では、超伝導転移温度 $T_c = 3.0$ K 以下で緩和率の増大は見られませんが、Sb で 100%置換した $x = 1.0$ では、$T_c = 1.6$ K 以下で緩和率が増大することがわかります。緩和率の増大は、試料中で局所的な磁場が発生したことを意味します。したがって、$x = 1.0$ の試料では超伝導状態で自発磁場が発生している可能性が高いと言えます。つまり、カイラル超伝導状態が実現している可能性が高いです。今後は、Sb に As をわずかに置換して乱れを導入した試料の測定からカイラル超伝導が *d* 波かどうかを確かめる、単結晶試料を用いた自発磁場の異方性の測定から電子対の軌道運動の詳細を明らかにするなどを目指します。

参考文献

[1] M. H. Fischer, T. Neupert, C. Platt, A. P. Schnyder, W. Hanke, J. Goryo, R. Thomale, and M. Sigrist, *Physical Review B* **89,** 020509(R) (2014) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.020509].
[2] K. Kudo, Y. Saito, T. Takeuchi, S. Ayukawa, T. Kawamata, S. Nakamura, Y. Koike and M. Nohara, *Journal of the Physical Society of Japan* **87,** 063702 (2018) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.063702].
[3] K. Kudo, T. Takeuchi, H. Ota, Y. Saito, S. Ayukawa, K. Fujimura and M. Nohara, *Journal of the Physical Society of Japan* **87,** 073708 (2018) [https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.073708].

研究室 HP: http://www.ph.sophia.ac.jp/~adachi/

足立 匡（上智大学・理工学部・教授）

量子液晶におけるトポロジカル励起と創発現象

C01 班　赤城 裕

素粒子・物性物理にまたがる普遍的な概念の一つが自発的対称性の破れであり、多くの現象が対称性の破れにより理解できます。また、連続的対称性の破れた相の低温での性質は、南部-Goldstoneモードやトポロジカル励起[cf. 図1]により支配されます。トポロジカル励起とは、秩序変数の空間的変化が、連続変形により一様なものに変形できない励起であり、Kosterlitz-Thouless転移やKibble-Zurek機構などの普遍的現象において重要な役割を果たします。

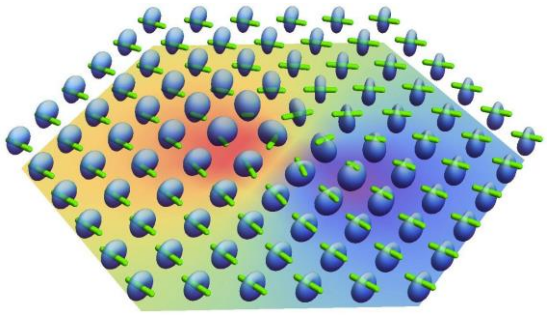


図 1：SU(3)点のスピン液晶相における新規トポロジカル励起及び、励起に誘起された磁気双極子(背景色).

最近、量子液晶という新規統一概念が本新学術から提案されました。そ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模型を詳細に調べることで、新規トポロジカル励起(ソリトン)を見出しました[図1]。この新種のソリトンはSU(3)点で現れ、トポロジカル電荷が異なるソリトン同士には反発的相互作用が生じます。通常このようなソリトン同士は相互作用することはありません。この解は解析的には求まらず、私が開発した数値計算法により見出しました[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⇄磁気四重極子と大きく形を変える点です。本公募研究では、こうしたスピン液晶相におけるトポロジカル励起と創発現象の解明を行います。特に、上記のトポロジカル励起やトポロジカル点欠陥の対消滅をはじめとした動的性質を、最近私達が開発した手法[2]を用いて詳細に調べることで、誘起される磁気双極子に由来した特異的振る舞いを明らかにすることを目指します。

他にも、ボゾン系トポロジカル相に関しても独立に研究を進めています。ボゾン系にはその統計性に由来した非エルミート性があるため、エルミート系におけるトポロジカル相の分類/特徴付けを直接適用することは出来ません。最近私は乱れのあるトポロジカルマグノン系の非可換指数による特徴付けを行いました[3]。また私達は、フェルミオン系におけるクラスAIIに対応する2, 3次元 $\mathbf{Z}_2$トポロジカルマグノン系[4,5]や、時間反転×並進対称性に保護された3次元マグノン系トポロジカル結晶“絶縁体”[6]を提案しました。特に後者は電子系には対応物のない電場応答を示すことを明らかにしました。

[1] H. T. Ueda, Y. Akagi, and N. Shannon, Phys. Rev. A **93**, 021606(R) (2016).
[2] K. Remund, R. Pohle , Y. Akagi, J. Romhányi, and N. Shannon, in preparation.
[3] Y. Akagi, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 123601 (2020).
[4] H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **99**, 041110(R) (2019).
[5] H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **100**, 144401 (2019).
[6] H. Kondo and Y. Akagi, Preprint arXiv:2012.02034. [研究室 HP: https://park.itc.u-tokyo.ac.jp/hkatsura-lab/]

赤城裕（東京大学・理学系研究科・桂研究室 助教）

液晶秩序を発現する古典異方粒子系における相転移ダイナミクス

C01 班　川﨑 猛史

温度や密度などの状態変数を変化させることにより，水（液体相）は，水蒸気（気体相）や氷（固体相）に転移します．この様な気液転移や固液転移は，我々にとって最も身近な相転移現象であり，主に古典統計力学を用いてその特徴を捉えることができます．一方，量子力学的効果が重要となる，超電導や超流動，磁性などの発現も相転移現象ですが，これまでの相転移研究においては，古典系と量子系の研究領域の間には大きな隔たりがありました．ところが近年，これらの間に多くの共通点が見出されており，そこでの普遍性・多様性を明らかにすることは極めて重要な課題です．

私が専門とするソフトマター物理分野では，古典系を中心とした相転移現象やその外場応答が広く研究されています．その主な対象は，コロイドや液晶，膜など比較的大きな構成粒子からなる凝縮系です．例えば巨大高分子であるコロイド粒子は剛体球，細長い分子である液晶分子は剛体楕円球になどに近似しても十分現象の本質を捉えることができます．また，それらの相互作用は，量子系と比べると極めてシンプルです．ところが，そこで見られる相転移現象は依然として複雑であり，量子系との共通点も多々あります．従って，ソフトマター系は複雑な相転移現象における本質を抽出することに適したモデル系を数多く提供しています．また，ソフトマター系は，量子系と比べると，粒子間相互作用計算にかかるコストが小さく，数値計算の大規模化が可能です．そのため，メソスケールの構造形成に関する研究が盛んに展開されており，多くの知見を与えています．一方，当該分野においては，球などの等方粒子に比べ異方的な粒子系のメソ構造形成に関する研究例は少なく発展途上です．相互作用の異方性は量子効果として本質となりうることからも，異方性が相転移に及す影響を深く追及することは極めて重要です．

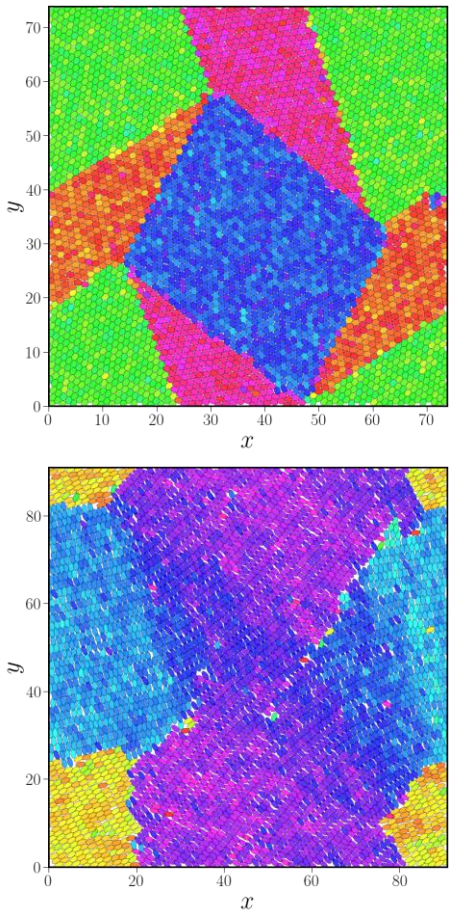


図 1: 本分子動力学計算によって自発的に得られた異方粒子系の典型的な低温構造．粒子の色は，粒子の長径方向を表します．上図: 異方度が比較的小さい時，マルテンサイト変態と呼ばれる異方性に起因したメソ構造が得られます．下図: 異方度が比較的大きい時，ネマティック秩序を有する粒子が層状に配列したスメクティック液晶構造が得られます．

異方粒子系の秩序化においては，粒子の重心位置から特徴づけられる「位置秩序」，粒子の重心間ボンドの配向角で特徴づけられる「ボンド配向秩序」，これらに加えて，異方粒子の向き（例えば楕円体の長径方向）によって特徴づけられる「ネマティック秩序」との競合により非常に豊かな相挙動が観測されます．本公募研究においては，粒子の異方性を系統的に変化させた際の古典大規模分子動力学計算を行い，相転移現象における異方性の寄与について研究を進めております．図 1 は本研究で得られた 2 次元粒子構造であり，異方性の度合いを変化させた際の振る舞いを表しています．異方性が比較的小さい系（上図）においては，低温状態で，ボンド配向秩序，位置秩序，ネマティック秩序の全てを兼ね備えた，鉄系合金などでも見られるマルテンサイト変態と呼ばれるシャープな結晶界面をもつ構造が自発的に得られます．一方，異方度を大きくしていくと，粒子が層状に配列した液晶構造が得られます（下図）．この様に，本公募研究においては，様々な秩序構造の競合が織りなす多様な相転移現象とその外場応答を調べることにより，古典系，量子系双方に対して重要な物理的知見を与えていきたいと考えています．

研究室 HP: https://www.r.phys.nagoya-u.ac.jp/

川﨑猛史（名古屋大学・理学研究科・講師）

パリティを破る磁性体の光電流応答

C01 班　柳瀬 陽一

光を照射された物質が直流電流（光電流）を生み出す現象を光電流応答と呼びます。光電流は、太陽電池や光センサーなど私たちの Quality of life を向上させるテクノロジーに有用です。この現象は、物質における対称性の破れを巧みに利用しています。空間反転対称性が破れた物質に特有の現象であることから、量子的秩序相の対称性を検出するプローブとしても利用されています。近年は、物質の量子幾何学的性質あるいはトポロジーに由来する光電流に注目が集まっています。量子物質における対称性と幾何学・トポロジーといった基礎概念が私たちの生活に結びつく道筋かもしれません。

	時間反転対称性	PT対称性
直線偏光	シフト電流	ドルーデ項
		内因的フェルミ面効果
		磁気的注入電流
円偏光	ベリー曲率双極子効果	旋回電流
	内因的フェルミ面効果	
	電気的注入電流	

表１：光電流の分類結果

光電流は、量子物質が示す非線形光学応答の典型例でもあります。高次の応答であるが故に、その種類やメカニズムはバラエティーに富んでいます。近年の研究により様々な光電流が解明されていますが、その包括的な分類はなく、どれだけのことが分かったのかもよくわからない状況でした。

当研究グループの渡邉光氏は、バンド理論の範囲内で得られる光電流の包括的分類を行いました。その結果を表１に示します[1]。ここでは、物質の基本的対称性として、時間反転対称性、空間反転対称性、両者をあわせた PT 対称性、の３つを考えています。光電流が発生するためには空間反転対称性が破れていることが必要ですから、残り２つの何れかが保存されている場合に、直線偏光・円偏光の光が生み出す光電流をそれぞれ示しています。

表１に示す光電流の多くは既知のものでしたが、分類結果から２つの光電流が新たに見つかりました（表１の白色部分）。直線偏光に対する「内因的フェルミ面効果」と円偏光に対する「旋回電流」です。旋回電流は、特に波動関数の幾何学的性質、すなわち量子計量、ベリー曲率、ベリー接続に由来します。その帰結として、トポロジカルに非自明な電子系、例えばディラック電子系において大きくなります。大雑把に見積もると、典型的な GaAs の値より１００倍程度大きな光電流が得られます[1]。

以上で述べた「内因的フェルミ面効果」と「旋回電流」は、PT 対称でかつ空間反転対称性がない系の特徴です。そのような対称性を持つ系として、パリティを破る反強磁性体が挙げられます。それは様々な分野で興味を持たれてきた物質群であり、マルチフェロイクス分野では電気磁気物質、多極子物理分野では奇パリティ磁気多極子物質と呼ばれます。その分類と１００を超える物質のリストが[2]に示されています。詳細にご興味がある方は文献[1]をご覧いただくか、どうぞ私たちにご連絡下さい。

参考文献

[1] Hikaru Watanabe and Youichi Yanase, To appear in *Phys. Rev. X* [arXiv:2006.06908].
[2] H. Watanabe and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **98**, 245129 (2018) [https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.245129].

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

柳瀬陽一（京都大学・理学研究科・教授）

中性子星内部にひろがるネマティック超流動

C01 班　水島 健

私はこれまでにドープされたトポロジカル絶縁体におけるネマティック超伝導状態や超流動 ^{3}He における対密度波状態など、回転対称性や並進対称性を自発的に破った超伝導・超流動の研究を行ってきました [1]。ここでは、それらと少し趣の異なったトピックを紹介したいと思います。

宇宙に浮かぶ中性子星は巨大な超流動体であることが知られています。中性子星は超新星爆発によってできる天体の最終形態の一つで、半径 10km 程度の高密度天体です。ベータ平衡のためにわずかな電子や陽子が存在しますが、大部分は中性子による量子液体状態で占められています。中性子星内部で中性子超流動が実現している観測的証拠はいくつかあります。特に、中性子星内部は高密度核子系となっていますが、このような高密度下ではベクター中間子が媒介する強い LS 力が中性子間に働く結果、全角運動量が J=2 となる $^3P_2$ 相互作用チャンネルが最も有効な引力となります。誕生直後の熱い状態から主にニュートリノ放射によって中性子星は冷却されていきます。Cassiopeia-A にある中性子星を 10 年間ほど観測した結果によると、この天体は他と比べて急激に冷却されていることが報告されています。この急冷曲線は天体内部に 10^9K 近くの転移温度を持つ $^3P_2$ 超流動状態が存在するという効果を取り入れなければ説明できないことが指摘されています[2]。

$^3P_2$ 超流動はスピン 3 重項 p 波超流動状態ですが、クーパー対の全角運動量が J=2 となっているという点で超流動 ^{3}He などと異なります。また中性子星は内部磁場を有しますが、中には 10^{15}G 以上に及ぶ強い磁場を有しているマグネターと呼ばれる天体があります。我々は、強磁場における $^3P_2$ 超流動の安定状態について解析しました。零磁場では最も対称性の高い $^3P_2$ 超流動相である一軸的ネマティック相が安定化しますが、有限磁場下では D_2 対称性を持った二軸性ネマティック相から D_4 対称性を持った二軸性ネマティック相へ逐次相転移することがわかりました。さらに、高磁場・高温極限ではクーパー対のスピンが完全偏極した強磁性超流動相が現れることもわかってきました。

このように中性子星内部では異なる対称性の一軸性・二軸性ネマティック超流動状態が競合していることが明らかとなりました[3,4]。中性子星は高速に自転している超流体であり、その内部は量子渦励起で満たされています。特に有限磁場下で最も安定な D_4 対称な二軸性ネマティック超流動で循環が半整数に量子化された渦が存在し得ます。この半整数量子渦は非可換統計性に従うという点で従来の量子渦と異なります [5]。例えば 2 つの非可換渦が衝突すると、2 つの渦を架橋するように「ラング」と呼ばれる新しい渦が生成され、渦の 3 次元的ネットワーク構造が生み出されます。このように中性子星内部では半整数非可換渦がラング渦を介して 3 次元的に絡まった量子乱流状態にあると期待されます。今後はネマティック超流動の特徴が天体の冷却機構にどのように影響を与えているかなどについて詳しく研究していくつもりです。

本研究は新田宗土氏（慶應義塾大学）、安井繁宏氏（高知大）、猪谷太輔氏（慶應義塾大学）、正木祐輔氏（東北大）との共同研究に基づきます。

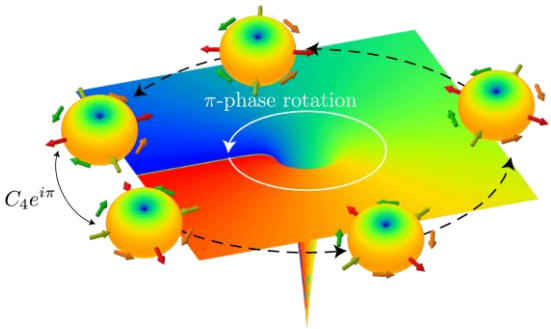


図 1: 中性子星内部で実現が期待される二軸性ネマティック状態のギャップ関数と半整数非可換量子渦。

参考文献

[1] 水島健，固体物理 **55**, 479 (2020).
[2] D. Page, M. Prakash, J. M. Lattimer, and A. W. Steiner, Phys. Rev. Lett. **106**, 081101 (2011).
[3] T. Mizushima, K. Masuda, and M. Nitta, Phys. Rev. B **95**, 140503(R) (2017).
[4] T. Mizushima, S. Yasui, and M. Nitta, Phys. Rev. Research **2**, 013194 (2020).
[5] K. Masuda and M. Nitta, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 013D01 (2020).

水島健（大阪大学・基礎工学研究科・准教授）

強相関π電子がつくる電荷秩序・強誘電ドメインの形成機構解明と光機能探索

D01 班　伊藤 弘毅

量子多体効果がはたらく電子集団の興味深い性質のひとつに、「電子型」強誘電性があります[1]。強誘電性(電圧下で電気を帯びやすい性質)自体は古くから知られた性質であり、科学的に興味深いだけでなく、スマートフォンや小型モーターにも応用されています。「電子型」では、その性質が電子間クーロン反発によって生じているため、強相関電子系に特有の劇的な応答が生じると期待できます。実際、光の波長変換デバイスの性能指標である非線形光学係数が非常に大きいことや、光で超高速(ピコ秒 = 一兆分の一秒未満)に相転移が生じる「光誘起相転移」が起こせることもわかっています[2,3]。本研究では、このようなミクロな電子がマクロなドメイン構造に自己組織化する現象に注目し、その形成機構の解明と、新しい光機能の探索を行います。

有機分子性結晶$(TMTTF)_2X$ (TMTTF: tetramethyl-tetrathiafulvalene 分子、X: ReO_4 などのアニオン分子)では、強相関π電子が互いに反発しあうことで規則正しく整列し(電荷秩序)、その結果、電子型強誘電性を示します[4]。電子がつくる電気分極は「右へならえ」といっせいに整列してマクロなドメインを形成すると考えられます。これはπ電子集団の挙動として興味深いだけでなく、相競合状態を象徴する構造として電子相を操るヒントも与えてくれるでしょう。しかし、ドメインの成長過程は結晶歪みなどの外因にも強く左右されてしまうため、それをいかに除去するかが「真の姿」を明らかにする上での関門でした。

最近、アニオン秩序状態を利用することで、結晶歪みの影響を除去できることが明らかとなりました。これは通常とは逆の発想で、温度を上げながら強誘電転移させることによって発見されたものです。このとき図に示すように、100 ミクロン以上のドメイン(赤と青では分極が逆向き)が成長するとわかりました。その大きさは、見えているだけでも電子 10 万個以上に相当し、従来予想されていたサイズより遥かに大きいものです。さらに、その形状は固定化されておらず転移のたびに様々に変わることから、量子液晶としての特異な性質を示すと期待されます。

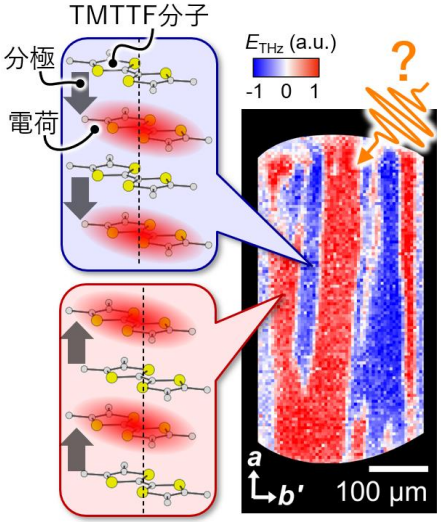


図:$(TMTTF)_2ReO_4$(165 K)における顕微テラヘルツ波発生[5]の測定結果。赤および青の領域が正負の電子型強誘電ドメインに対応。

ごく最近、このドメイン混在状態にレーザー光を照射すると、周期約 4 ピコ秒の超高速振動が生じることが解りました。π電子集団の特徴を表している可能性があり、詳細を調べています。また、非常に強いテラヘルツ電場(数百 kV/cm、コンセントの約 1 万倍)によるドメイン駆動にも挑戦します。

参考文献

[1] S. Ishihara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 011010 (2010) [https://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.79.011010].

[2] H. Itoh, K. Itoh, K. Goto, K. Yamamoto, K. Yakushi, and S. Iwai, *Appl. Phys. Lett.* **104,** 173302 (2014) [https://dx.doi.org/10.1063/1.4871735].

[3] H. Itoh, R. Fujiwara, Y. Kawakami, K. Yamamoto, Y. Nakamura, H. Kishida, and S. Iwai, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 093302 (2018) [https://dx.doi.org/10.1063/1.4995798].

[4] P. Monceau, F. Ya. Nad, and S. Brazovskii, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4080 (2001) [https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.4080].

[5] M. Sotome, N. Kida, S. Horiuchi, and H. Okamoto, *Appl. Phys. Lett.* **105,** 041101 (2014) [https://dx.doi.org/10.1063/1.4890939].

研究室 HP: http://femto.phys.tohoku.ac.jp/

伊藤弘毅（東北大学・大学院理学研究科・助教）

薄膜ネマティック超伝導体の開発

D01 班　井上 悠

最近、ネマティック超伝導と呼ばれる新しい超伝導相が注目を集めています。ネマティック超伝導体とは、その超伝導状態に何らかの異方性が内在することで、外部から電場や磁場を与えたときに、その方向によって異なる応答を生じるという性質をもつ超伝導体です。例えば、トポロジカル絶縁体として知られる Bi_2Se_3 という物質に Cu 等の元素をドープすると、低温でネマティック超伝導体となり、印可する磁場の方向によって超伝導が保たれる最大の磁場の強さや熱的な性質が変化することが観測されました [1,2]。このような性質は珍しいので、例えば、ネマティック超伝導体の異方性をそろえたり、回転させてあげることで、内部の超伝導状態を自在に操る素子を作製するということが可能になるかもしれません。

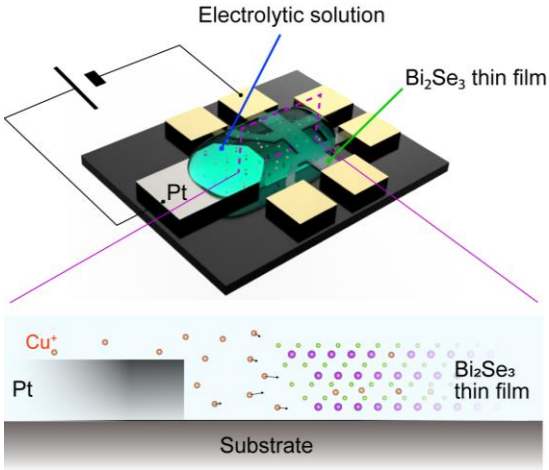


図 1：電気化学セルの模式図。電解液中で Bi_2Se_3 と Pt 電極の間に電界を印可して、Bi_2Se_3 に化学ドープを行う。

私は、このネマティック超伝導状態が、どのような仕組みで異方性を持つようになるのか、また、どうやったらネマティック超伝導体の性質を制御できるようになるのか、ということを、ネマティック超伝導体を薄い膜として作製してあげることで調査したいと考えています。薄い膜にする、というところがポイントで、薄い膜として作製することで、例えば電界効果（トランジスタのように、超伝導体に電場を印可してその性質を制御すること）を利用できるようになったり、超伝導体の組成を精密に制御できるようになります。このように、パラメータをいろいろと変化させながら、ネマティック超伝導体の性質を測定していくことで、ネマティック超伝導状態がどうやって生じるのかを明らかにできるのではないかと期待しています。

それではどうやって、ネマティック超伝導体の薄膜を作製するか、ということなのですが、（そのままでは超伝導にならない）Bi_2Se_3 の薄膜に元素をドープすることで作製を試みています。まず、図 1 のように、ドープをしたい元素のイオンを含んだ電解液の中に電極と試料を沈め、電圧を印可すると、イオンが電場を感じて、Bi_2Se_3 の薄膜の方に引き寄せられます。そのまま電圧を印可し続けると、この元素は Bi_2Se_3 の薄膜の中にまで入り込んで、ドープされるという仕組みです[3]。超伝導を示す試料の作製ができるように、ドープを行うときの条件や、熱処理を組み合わせるなどして試行錯誤を繰り返しています。この先、薄膜でのネマティック超伝導の観測と、それを電場等を与えて制御するところまで取り組んでいきたいと考えていますので、どうぞご期待ください。

参考文献

[1] Y. S. Hor *et al., Phys. Rev. Lett.* **104**, 057001 (2010).
[2] S. Yonezawa, *Condens. Matter* **4**, 2 (2018).
[3] M. Kriener et al., *Phys. Rev. B* **84**, 054513 (2011).

井上悠（産業技術総合研究所・強相関エレクトロニクスグループ・研究員）

トポロジカルスピン液晶制御と巨大電子散乱現象

D01 班　金澤 直也

スピン系のトポロジカルな欠陥構造であるスキルミオンと分子系の液晶のアナロジーを考えることによって、巨大な電子散乱現象とその機能を探索することが本公募研究の目標です。

欠陥というと、不備であったり欠点であったりと理想的な状態を乱す悪い存在のイメージがあります。物性物理においても周期性を乱す特異点としてなるべく排除したい対象として扱われることが多いと思います。しかし一方で、欠陥構造は避けられないものであり普遍的に存在するため、上手く取り扱うことが必要です。これまで液晶の分野において欠陥の取り扱いは古くから研究されており、その欠陥の分類学[1]は現在の実空間におけるトポロジカル物性にも繋がってきました。

本研究の対象としているスキルミオンは、多数のスピンが織りなすナノスケールの渦状構造で、外部刺激に対しても壊れない磁気欠陥として振舞います。現在ではこの強固性を利用した磁気メモリデバイスへの応用が期待されていおり、薄膜デバイスに閉じ込めた 2 次元状のスキルミオンの書込/消去/転送といった研究が世界中で盛んに行われています。一方で 3 次元のバルク試料においては、スキルミオンは紐状の構造として存在し、うねりやちぎれ、ゆらぎといった空間的にも時間的にも複雑な状態を示していることがわかってきました[2]。

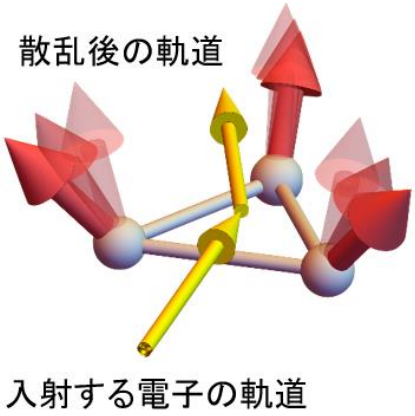


図 1:スピンクラスター欠陥のゆらぎによって電子が非対称的に散乱される様子。

実は、多数の分子が集まって集団構造を成している液晶でも同じような時間的・空間的ゆらぎが現れ、強い光散乱現象などが引き起こされます。これに着目して、本研究では 3 次元スキルミオンストリングが引き起こす巨大な電子散乱現象を開拓しています。これまでに、スキルミオン内部のスピンクラスター(スカラースピンカイラリティ)のゆらぎに由来した巨大なホール効果を観測しました[3,4]。その大きさは散乱角(ホール角)にして 20%程度に達し、磁性体のホール効果では最大級になっています。

引き続き中性子散乱実験などの共同研究を通して複雑な 3 次元スキルミオンストリングの構造と運動の正体を明らかにすることにより、頭を悩ませる欠陥ではなく、制御可能な欠陥としてスキルミオンの機能性の開拓に挑戦します。

参考文献

[1] N. D. Mermin, Reviews of Modern Physics 51, 591 (1979) [https://doi.org/10.1103/RevModPhys.51.591].
[2] Y. Tokura and N. Kanazawa, Chemical Reviews (2020) [https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00297].
[3] N. Kanazawa, A. Kitaori, J. S. White, V. Ukleev, H. M. Rønnow, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki and Y. Tokura, Physical Review Letters 125, 137202 (2020) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.137202].
[4] Y. Fujishiro, N. Kanazawa, R. Kurihara, H. Ishizuka, T. Hori, F. S. Yasin, X. Z. Yu, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa, M. Tokunaga and Y. Tokura, Nature Communications accepted (2020) [https://arxiv.org/abs/2011.11573].

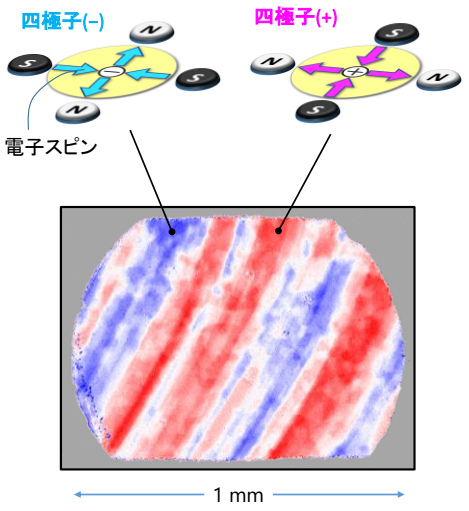
研究室 HP: http://www.cmr.t.u-tokyo.ac.jp/

金澤直也（東京大学・工学系研究科・講師）

反強磁性体に内在するドメインを偏光顕微鏡で可視化

A01 班　木村 健太，木村 剛

電場によって磁化が、磁場によって電気分極が線形に誘起される線形電気磁気効果は、特定の対称性の要件を満たす磁性体で現れる電気磁気結合現象です。このような磁性体に光を通過させると、光の電場成分と磁場成分に比例した振動磁化と振動分極が物質中に誘起される「線形電気磁気光学効果」が生じ、これが光の伝搬にも影響を与えます。その結果、直線偏光や無偏光の吸収量が光の進行方向の正負で変化する方向二色性といった、従来の線形磁気光学効果とは質的に異なる非相反光学応答が現れることが知られていました。また、この効果のもう一つの特徴として、マクロな磁化を持たない反強磁性体においても現れる点が挙げられます。したがってこの効果は、反強磁性体を使った新しい磁気光学素子の動作原理となり得るほか、反強磁性の性質を探る強力なプローブにもなり得ると期待されます。しかしながら、これまで反強磁性体で報告されていた線形電気磁気光学効果は大変小さく、そのために、同効果をプローブとして活用した反強磁性体の研究は進められていませんでした。



図：偏光顕微鏡で可視化した $Pb(TiO)Cu_4(PO_4)_4$ 結晶における四極子ドメイン。青と赤が四極子の＋と－に対応している。白色部分は、結晶の厚さ方向に沿って＋と－が混在していることを意味する。

そこで我々は、反強磁性体における線形電気磁気光学効果の研究の舞台として、$Pb(TiO)Cu_4(PO_4)_4$ という物質に着目しました。同物質では、磁性を担う銅イオンが 4 つで 1 つの磁気ユニットを形成し、これが四重極磁石をミクロなスピンで置き換えた四極子型スピン配列をとります(図上図)。このスピン配列は、マクロな磁化を生み出さないながらも、線形電気磁気光学効果が現れる条件を満たしています。

$Pb(TiO)Cu_4(PO_4)_4$ の結晶に可視光を入射し、透過光の様子を詳細に調べました。その結果、互いに直交する二つの直線偏光の吸収量に違いが生じる「線二色性」が現れ、さらには、光の進行方向を反転すると線二色性の符号も反転することが分かりました。これは、非相反線二色性と呼ぶべき新しい光学応答です。また、線二色性による吸収係数の相対的変化が約 4%と大きい点も特筆すべき点です。これは従来の反強磁性体における電気磁気光学効果に比べると 1～2 桁も大きな値です。さらに、四極子の＋と－を入れ替えることによっても、線二色性の符号が反転することが分かりました。以上の結果から、我々は、試料の各位置での線二色性を調べることで、試料内部における四極子の＋と－の分布（ドメイン）を可視化できるのではと考えました。そこで、偏光顕微鏡により結晶の様子を観察したところ、図下図に示すように四極子ドメインを明瞭に可視化することに成功しました[1]。線形電気磁気光学効果を活用して、偏光顕微鏡観察という簡便な手法で磁化を持たない反強磁性体の磁気ドメインを可視化したのは本研究が初めてとなります。

本研究により、線形電気磁気光学効果が、ある種の反強磁性体の磁気ドメインを可視化する有効なツールとなり得ることが実証されました。今回用いた偏光顕微鏡による観察は、従来手法に比べて格段に簡便かつ高速に反強磁性ドメインを可視化できるという利点を有します。そのため、外部刺激に対する反強磁性ドメインの応答の解明や、反強磁性体を使った光磁気デバイス開発の加速に大きく貢献すると期待されます。

[1] K. Kimura et al., Commun. Mater. 1, 39 (2020).

https://www.youtube.com/watch?v=ZLiUO6CZrxE&t=2s

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）

はしご型鉄系化合物における軌道秩序

A01 班　青山 拓也，大串 研也

鉄ニクタイドや鉄カルコゲン化合物は，室素温度に迫る温度で超伝導転移を示す高温超伝導体です．超伝導は，二次元正方格子上に並んだ鉄イオンがもつスピンおよび軌道自由度が示す秩序相を，圧力印加や元素置換によって抑制することで発現します．鉄イオンが d_{yz}/d_{zx} の軌道縮退を持つことから超伝導を引き起こすペアリング相互作用においてスピン揺らぎだけでなく軌道揺らぎが重要であると考えられています．

この記事では，擬一次元はしご構造を持つ鉄系化合物 $BaFe_2X_3$ (X = S, Se)の軌道秩序の研究を紹介します．図 1(a)に示すように，$BaFe_2X_3$ においては鉄原子がはしご構造を形成しています．はしご同士が結晶中で離れていることによる低次元性を反映して電子相関効果が顕在化し，$BaFe_2X_3$ は大気圧下でモット絶縁体となります．我々は，$BaFe_2X_3$ において反強磁性転移温度(T_N)より高温側(T_{OO})で観測されている電気抵抗率の弱い異常が，他の鉄系超伝導体と同様に軌道秩序と関連していることを見出しました(図 1(b))．それぞれの試料で報告されている反強磁性転移温度および軌道秩序温度は，$BaFe_2S_3$ において 115 K/200 K，$BaFe_2Se_3$ において 255 K/400 K です．また，磁気秩序および軌道秩序パターンは二つの物質で異なっておりそれぞれ $BaFe_2S_3$ においてはストライプ型反強磁性 と $d_{x^2-y^2}$ 軌道による強的秩序，$BaFe_2Se_3$ においてはブロック型反強磁性と $d_{x^2-y^2}$ と d_{xz} 軌道のスタッガードな秩序です．二つの試料の混晶体 $BaFe_2(S_{1-x}Se_x)_3$ においては臨界組成 x = 0.23 において磁気構造および軌道秩序パターンが同時にスイッチすることから，スピン配列と軌道配列が一対一に対応していることが示唆されます(図 1(c))．電荷ダイナミクスにも軌道秩序の影響が現れており，電荷-スピン-軌道自由度が強く相関していることがわかります．$BaFe_2X_3$ は圧力印加によって超伝導性を示すことから，それらの自由度と圧力によって誘起される超伝導相との関連を明らかにすることは非常に興味深い研究テーマです．以上の詳細を下記の動画で紹介していますのでご覧ください．

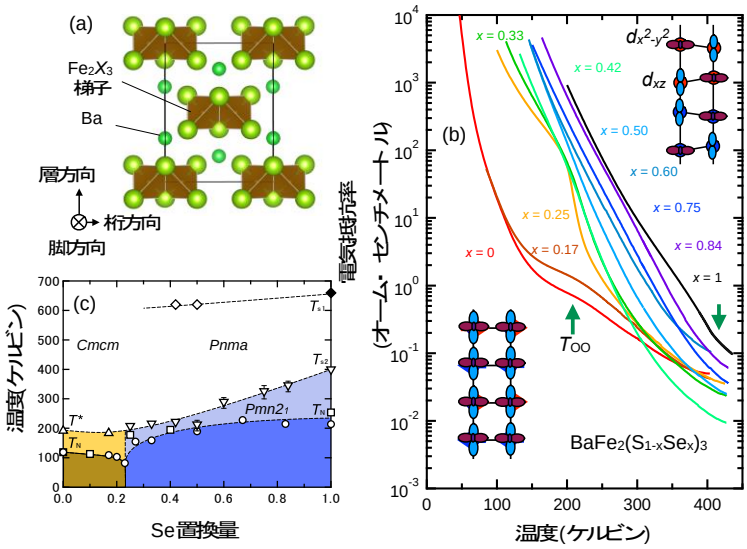


図 1：(a) $BaFe_2X_3$ の結晶構造．(b) $BaFe_2(S_{1-x}Se_x)_3$ の電気抵抗率の温度依存性．緑の矢印が x = 0 および x = 1 における T_{OO}．インセットは $BaFe_2S_3$(左下)および $BaFe_2Se_3$(右上)における軌道秩序パターン．(c) $BaFe_2(S_{1-x}Se_x)_3$ の電子相図．

https://www．youtube．com/watch?v=cEUo12iWvm4

青山拓也（東北大学・理学研究科・助教）
大串研也（東北大学・理学研究科・教授）

固体物質における正三角形の分子の形成をとらえた！
～パイロクロア構造に現れた新しいタイプの電子の自己組織化現象～

A01 班　岡本 佳比古

皆さん、小さい頃に「砂鉄」で遊んだことはあるでしょうか。私は、今回の QLC チャンネルの解説動画を作成するために、ネット通販で砂鉄を購入し、遊びました。一見単なる黒い砂のように見える物体が、重力を無視して磁石に吸い付けられる様子を眺めるのは、はっきり言って飽きません。むしろ、中学、高校、大学と物理を勉強し、より理解が進んだからこそ、改めてそのすごさに気付けるようになったのかもしれません。砂鉄の主成分は磁鉄鉱と呼ばれる鉱物で、Fe_3O_4 の化学組成をもちます。580 °C 以下で電子のスピンが揃うフェリ磁性と呼ばれる磁気秩序状態をとるので、室温付近で永久磁石として使えます。人類が手にした最初の磁石です。一方磁鉄鉱は、今から 80 年以上も前に、オランダの化学者のフェルベーにより、約 120 K において金属絶縁体転移を示し、それ以下の温度において今でいう電荷秩序に対応する状態にあると指摘され、物性物理の観点からも大変興味をもたれてきました[1]。

磁鉄鉱の物理の面白いポイントは、鉄原子が図 1 に示したパイロクロア構造と呼ばれる配列に並んでいて、電荷秩序状態においてパイロクロア構造上で同じ数の Fe^{2+}と Fe^{3+}イオンが周期的に並ぶことです。「周期的に並ぶ」と書きましたが、これは簡単ではありません。自分の手で並べてみるとわかるのですが、例えば正方格子の場合には市松模様に並べればよいので簡単です。しかし、パイロクロア構造のように、正四面体から形成される配列を、1：1 の数比で色分けするのは単純ではなく、どうしても複雑なパターンになってしまいます。このような状況を幾何学的フラストレーションと呼びます。幾何学的フラストレーションを内包する物質では、電荷秩序や反強磁性秩序などの単純な電子の秩序が形成されにくくなるので、代わりに普通の物質では現れない、様々な変わった電子の状態が現れます。実際、磁鉄鉱の電荷秩序配列は非常に複雑で、フェルベーの発見以来ずっと研究されてきたにもかかわらず、今なお未解決の部分があり、研究が続いています。

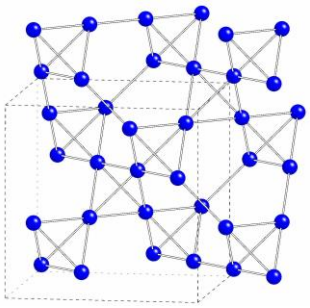


図 1：パイロクロア構造.

今回、私たちが報告したことは、磁鉄鉱と同じように、W（タングステン）原子がパイロクロア構造を形成する CsW_2O_6 という物質において、これまでにない形式の電子の自己組織化現象を発見したことです[2,3]。CsW_2O_6 では、磁鉄鉱の場合と同じように、同じ数の W^{5+}と W^{6+}イオンからなる電荷秩序が実現しそうですが、幾何学的フラストレーションによりそのような電荷秩序の形成は阻害されます。困った CsW_2O_6 は、私たちが思いもよらなかった裏技的で美しい方法により電荷秩序を実現し、エネルギーを安定化させるということを、純良な単結晶試料を用いて様々な物理量を測定することで発見できました。「分子」の形成と分数の価数が鍵になりますが、CsW_2O_6 がどのように電荷秩序を形成するのかは、図 2 に解説動画のリンクを貼っておきますので、時間があれば見てみてください。CsW_2O_6 に現れた新しいタイプの電子の自己組織化現象は、私たちの想像を超える未発見の電子や原子の秩序構造が、まだまだ自然界に存在することを感じさせます。このような、幾何学的フラストレーションをもつ物質を新規開拓することで、本新学術領域で目指す、これまでにない電子の液晶的な状態を発見できると考えています。

図 2：解説動画.

本研究は、天野春樹、二木健太、三十日陸斗、片山尚幸、澤博、横山泰範、中村優斗、岸田英夫、竹中康司（名古屋大学）、播磨尚朝（神戸大学）、長谷川巧、荻田典男（広島大学）、田中雄、瀧川仁（東京大学）、竹端寛治、今中康貴（NIMS）各氏との共同研究です。この場を借りて御礼申し上げます。

[1] E. J. W. Verwey, Nature **144**, 327 (1939).　[2] Y. Okamoto *et al*., Nat. Commun. **11**, 3144 (2020).
[3] Y. Okamoto *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 124710 (2020).

https://youtu.be/HZiVHpfGSJ8

岡本佳比古（名古屋大学・工学研究科・准教授）

極低温･高磁場で動作する時間分解 STM の開発に向けて

林　寛

京都大学の林寛です。今回はこれまで行ってきた「ダイヤモンド中 NV センターを用いた量子センサ開発」の研究と、本領域研究で行う「極低温・高磁場で動作する時間分解 STM の開発」の研究に関して紹介させていただきます。

ダイヤモンド中の窒素と空孔ペアの事を NV センターと呼びます(図 1(a))。特徴としてそのスピンが長いコヒーレンス時間(ミリ秒)を室温で持つ事が挙げられます[1]。またスピンのエネルギー順位が様々な外場に依存するため、超高感度センサ(磁場、電場、温度など)への応用研究が盛んです。単一 NV センタを利用することでナノメートルの高空間分解能も実現できます。そのため、高空間分解能かつ高感度を要求する細胞内計測などの生命科学分野への応用が期待されています。私は複数の NV センターを使った「温度センサ」「磁気センサ」の開発を目指し、新たな測定法提案と到達感度予測の研究を行いました[2]。センサ感度は「コヒーレンス時間」と「NV センター数」が重要となり、それぞれの値が大きいほどセンサ感度は向上します。しかし、試料中の NV センターの数を増やすとお互いの電子スピンがノイズ元になってしまいコヒーレンス時間が短くなります。このため、NV センター数はセンサ感度に対して最適値があると考えました。私はコヒーレンス時間を悪化させるノイズ(均一広がり、不均一磁場広がり、不均一歪み広がり)と NV センター数との関係を、光検出電子スピン共鳴法とシミュレーションにより明らかにしました。この結果から温度感度が細胞サイズでμK に到達することを予測しました。この値は、細胞内での温度分布として予測されている値であり、NV センターが細胞内の温度分布測定に利用できることを示しました[2]。

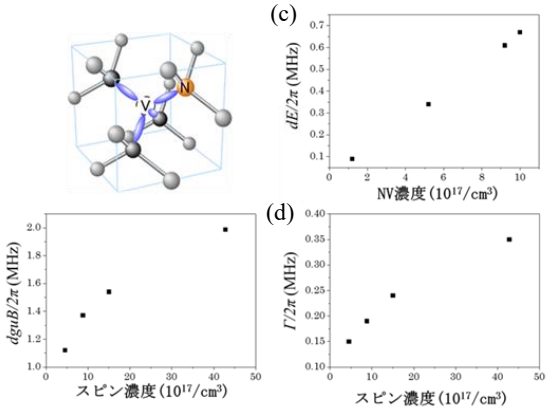


図 1: (a)NV センター概念図と(b)不均一磁場広がり、(b)不均一歪み広がり、(c)均一広がりの NV 濃度依存

上記 NV センターはでナノスケールの空間分解能を持つ室温動作のセンサとして注目されていますが、時間分解能としてはマイクロ～数秒です。この値は細胞内測定などでは十分力を発揮しますが、物性測定ではさらなる時間分解能が求められます。本研究領域ではフェムト秒スケールの時間分解能と原子レベルの空間分解能を持つ、高強度テラヘルツ（THz）パルス発生技術と走査型トンネル顕微鏡（STM）技術を融合した時間分解 THz-STM の開発を目指します。このような超高速時間分解イメージングは非自明な空間構造・対称性の破れによって特殊な電子状態を持つ量子液晶物質においては、その秩序形成と、磁性や光学特性などの物性間の関係性を理解する強力な手法になります。私は特に極低温・高磁場下で動作する装置開発を行い、これらの特色ある物質の光励起直後の電子状態をナノスケールの空間分解能とフェムト秒スケールの時間分解能で観測します。

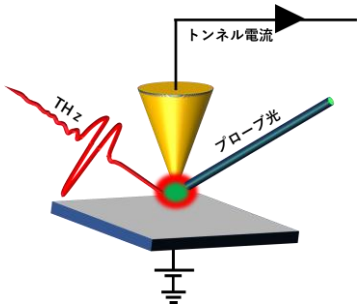


図 2: THz-STM 概念図

参考文献

[1] E. D. Herbschleb, K. Hayashi, et. al., Nat. Communications, 10, 3766 (2019).
[2] K. Hayashi et. al., Phys. Rev. Applied, 10, 034009 (2018).

林　寛（京都大学・化学研究所・特定助教）

汎関数くりこみ群に基づく「ループ流のミクロな機構」の理論研究

C01 班　田財　里奈

皆様、こんにちは。今年の春から C01 班の PD として研究をしております、名古屋大学の田財里奈です。コロナ以前の趣味は、研究室でおやつを作る事だったのですが、最近はあまりできておりません。終息後を楽しみにしたいと思います。私にとって今回の記事は QLC ニュースレターへの３稿目となります（ヘビーローテーション！)。前回は、若手奨励賞を頂いたテーマである重い電子系の超伝導研究の記事を書かせて頂きました。今回はテーマを変えて、私が最近行っている「くりこみ群に基づいた電荷ループ相のミクロな理論の研究」についてお話したいと思います。

最近、強相関電子系の分野では、電荷ループ秩序と呼ばれる不思議な量子相転移相が注目されています。巨視的には電子の電荷は流れない一方、ミクロにループを描いて電荷が流れる現象です（図 1）。様々な金属を冷やしていくと、ある温度以下で“自発的に”電荷ループ相が生じる可能性が最近の実験によって明らかになってきました。しかし、このループ相がなぜ生じるのか？そして、生じるとすればどの様な構造のループ相が安定なのか？ということは未だに分かっていない未解明問題です。私たちはこの疑問に答えるべく、汎関数くりこみ群という強力な理論手法を駆使し、どのような電子多体散乱が電荷ループ相を生み出すのかを解明する為の研究を行いました。

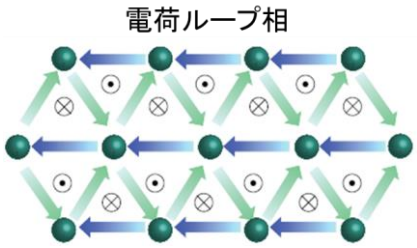


図1: 電荷ループ相の様子。
なぜ生じるのかは未解明。

私たちが新たに構築したくりこみ群の特徴は、電荷ループ相の空間構造を特徴図ける“構造因子”というものを自動で最適化できる様にしたことです。これにより、様々な空間構造を持つ量子相転移を同じ理論で記述することが出来るようになりました（図 2）。本研究の結果、磁気揺らぎによって電荷ループ相が発現するという理論的シナリオを提唱し、また、磁気フラストレーションが重要となることを見出しました（図３に相図を示しました）。ご興味のある方は、以下の参考論文をご覧下さい。

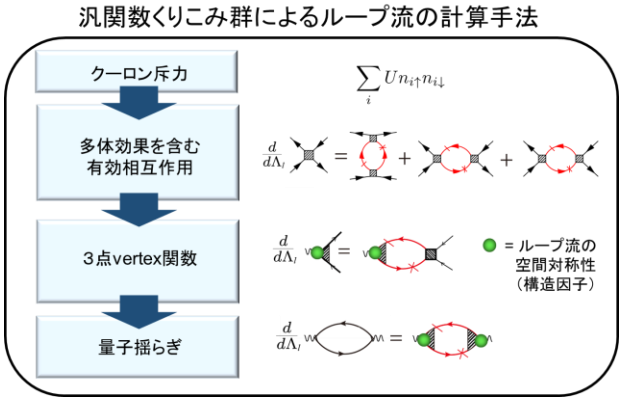


図2：汎関数くりこみ群を用いてループ流の計算を行う方法とその Feynman ダイアグラム。

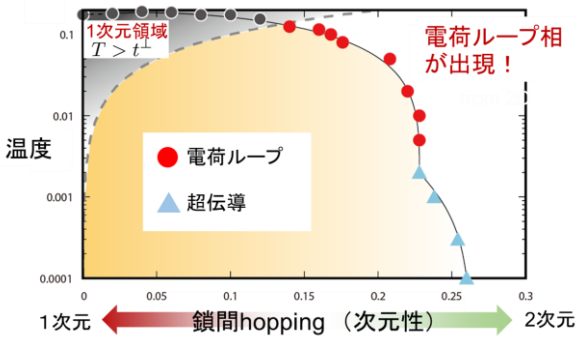


図３：本研究で見出した電荷ループの相図。
（coupled chain Hubbard 模型に基づく）

参考文献

[1] R. Tazai, Y. Yamakawa, H. Kontani, arXiv:2010.16109 (2020) [https://arxiv.org/abs/2003.07556]
[2] H. Kontani, Y. Yamakawa, R. Tazai, S. Onari, arXiv:2003.07556 (2020) [https://arxiv.org/abs/2003.07556]

Sc 研究室 HP: http://www.s.phys.nagoya-u.ac.jp/

田財　里奈（名古屋大学・理学研究科・特任助教）

軌道自由度を取り入れた銅酸化物高温超伝導体の微視的理論

C01 班　渡部　洋

はじめまして、立命館大学の渡部と申します。今年度から C01 班の PD・特任研究員として池田浩章先生の研究室でお世話になっております。私は東大理物で博士号を取得した後、理化学研究所、早稲田大学高等研究所を経て現在に至ります。修士課程の頃から一貫して強相関電子系の磁性や超伝導の研究に従事し、イリジウム酸化物[1]、有機導体[2]、重い電子系などを対象にハバード模型や近藤格子模型の計算を行ってきました。これらの系ではスピン・電荷・軌道といった複数の自由度が絡み合うため解析も困難ですが、そこから生み出される非自明な現象はどれも興味深く強相関電子系の奥深さを感じさせてくれます。本領域ではこれまで積み重ねてきた知識や経験を活かし、量子液晶の解明に少しでも貢献できればと考えています。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

現在取り組んでいるテーマは、銅酸化物高温超伝導体の諸現象を軌道自由度の効果に着目して明らかにすることです。銅酸化物高温超伝導体では母物質の反強磁性絶縁体に伝導キャリアをドープすることで超伝導・擬ギャップ・ストライプ・ネマティック秩序[3]といった様々な現象が見られます。発見から 30 年以上経った今でも精力的に研究が行われ、膨大な研究結果の蓄積があるものの、まだ統一的な見解には至っていないのが現状だと思われます。私は特に超伝導の発現機構の詳細を明らかにすることを目指して研究を行っています。軌道自由度を正しく取り扱うため、銅の $d_{x^2-y^2}$, d_{z^2} 軌道、酸素の p_x, p_y 軌道を考慮した 4 バンド *d-p* 模型を用いた解析を行っています。この模型によって超伝導をはじめ量子液晶に深く関連するストライプ・ネマティック秩序、さらに数多くある銅酸化物の物質依存性を議論することが可能になると考えています。従来の単一バンド模型に比べて解析は困難ですが、より銅酸化物高温超伝導体の本質に迫ることができると期待されます。

例えば図 1 は超伝導転移温度が低い La_2CuO_4 と高い $HgBa_2CuO_4$ に対して第一原理計算から抽出した模型を示しています。前者では 2 つの *d* 軌道間の混成が強く *d-p* 軌道間のエネルギー差が大きい一方、後者は 2 つの *d* 軌道はほとんど混成せず *d-p* 軌道間のエネルギー差は小さいことが分かります。これら 2 つの模型に対して変分モンテカルロ法を用いた解析を行った結果、確かに La 系に比べて Hg 系の方が超伝導相関が強く出る傾向が見られました。これは単一バンド模型では得られなかった結果であり、d_{z^2} 軌道の影響が重要であるという先行研究[4]とも整合しています。また、超伝導相関は *d-d* 軌道間だけでなく *d-p*, *p-p* 軌道間でも有限の値を持ち、*p* 軌道も超伝導に少なからず寄与していることを示唆しています。ストライプ秩序に関しては、電荷密度波は主に *p* 軌道、スピン密度波は主に *d* 軌道で起こるといった役割分担も見られています。今後はストライプ・ネマティック秩序と超伝導の共存・競合についてその詳細を調べる予定です。また、超伝導が消失した後の過剰ドープ領域での強磁性の可能性についても議論したいと考えています。

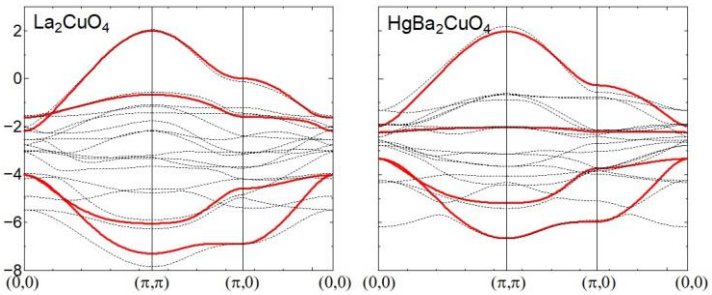


図 1: 4 バンド *d-p* 模型による銅酸化物のバンド構造。第一原理計算の結果（点線）を tight-binding 描像でフィットしている。

参考文献

[1] H. Watanabe *et al*., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 027002 (2013) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.027002].
[2] H. Watanabe *et al*., *Nat. Commun*. **10**, 3167 (2019) [https://doi.org/10.1038/s41467-019-11022-1].
[3] Y. Sato *et al*., *Nat. Phys*. **13**, 1074 (2017) [https://doi.org/10.1038/nphys4205].
[4] H. Sakakibara *et al*., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 057003 (2010) [https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.057003].

渡部　洋（立命館大学・総合科学技術研究機構・専門研究員）

フラストレート磁性体の超交換相互作用の電場による制御

C01 班　古谷　峻介

量子磁性体は強い電子間相互作用のために、電子が自由に動けなくなる Mott 絶縁体と呼ばれる絶縁体において実現する。電子の運動が「凍結」しても、電子の持つスピンの自由度は周囲の電子スピンと強く相互作用する。この微視的なスピン自由度が巨視的な磁性の起源になっており、基本的な統計力学の模型として取り上げられる Heisenberg 模型は、まさにこの量子磁性体の具体例となっている。量子磁性体は、このような簡単な模型から多彩な物性が現れる。とくに、電子スピンの間に幾何学的フラストレーションがある量子磁性体はフラストレート磁性体と呼ばれ、スピンネマティック相などの「量子液晶」状態を実現する可能性を有する（図 1b の SN 相）ことから、物性物理学の重要な研究対象として研究が盛んに行われてきた。長年に亘って多くの新奇な量子磁性体の物性が研究されてきたが、興味のある量子相を実現する適切なパラメータを持つ物質を得ることは、特にその量子相の実現条件が厳しい場合などに難しく、重要な課題となっている。

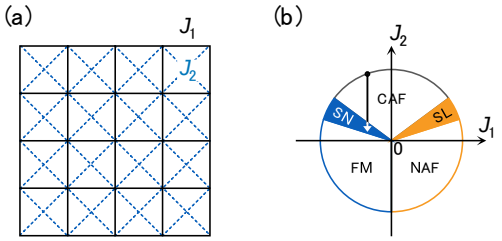


図 1: 正方格子$J_1 - J_2$模型(a)と基底状態相図(b)。

本稿では私が「量子液晶」の研究員着任後に得た、量子液晶の研究成果[1]について述べる。本研究では先述の背景を踏まえ、静電場を用いて磁性絶縁体の相互作用パラメータを制御して「量子液晶」状態を実現し、その応答を調べるための基礎となる理論研究を行った。まず、電子スピン間の超交換相互作用の静電場制御についての一般的な議論を行い、それを具体例に適用した。電場は磁性イオンと隣接する非磁性イオンの間に電位差を生じさせ、その電位差が電子軌道間の hopping に影響を与える。電子が「凍結」した Mott 絶縁体においてもこの電位差は重要な役割を果たす。本研究では、磁性イオン間に働く超交換相互作用へのこの電位差の影響を微視的に評価した。本研究は磁性イオン間の直接的な交換相互作用を扱った先行研究[2]を超交換相互作用へ拡張したというだけでなく、2 次元量子スピン系に空間的異方性を与えることなくスピン間相互作用を制御する方法について議論を行ったという点で重要である。面直方向の電場は直接的交換相互作用に影響を及ぼさないが、対照的に、面直の電場は超交換相互作用に大きな影響を与え得る。そのため、2 次元量子スピン系の各空間方向を等価に扱いつつ、スピン間の微視的相互作用を制御することが可能になった。

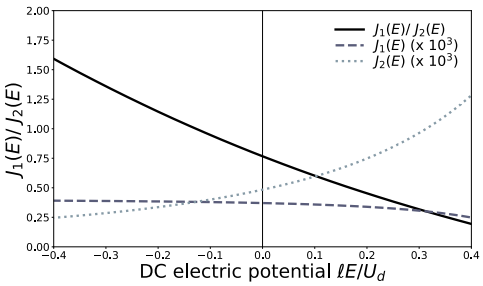


図 2: toy model を使った正方格子$J_1 - J_2$模型のJ_1/J_2比の制御の様子。横軸が面直電場。

図 2 に簡単な模型への適用例を示した。正方格子面に垂直な方向へ印加した静電場が、超交換相互作用の比J_1/J_2を変調する様子が見てとれる。論文[1]では、実際の 2 次元量子磁性体物質により則した模型や、1 次元フラストレートスピン鎖への応用も議論している。今後、この研究を発展させ、量子磁性体における「量子液体」状態についての微視的な観点からの研究を行っていきたいと考えている。

参考文献

[1] S. C. Furuya, K. Takasan, and M. Sato, in preparation
[2] K. Takasan and M. Sato, Phys. Rev. B **100**, 060408(R) (2019)
[https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.100.060408]

古谷峻介（茨城大学・理工学研究科・研究員）

「量子物質開発フォーラム」開催報告

東北大理　大串 研也

2020 年 10 月 1 日-10 月 2 日に、「量子物質開発フォーラム」を開催しました。この研究会は、量子液晶状態が具現する新物質開発で活躍する若手・中堅研究者が交流する場として設けられたものです。領域内外から常時 80 名を超える参加者に恵まれ、とても有意義な研究会となりました。招待講演者の、山本隆文先生（東工大フロンティア研）からは“アニオンに着目した物質探索”について、菅大介先生（京大化研）からは“原子レベルで構造制御した酸化物におけるスピントロニクス物性開発”について、最新の成果を交えてご講演頂きました。一般講演者からは、5d ダブルペロブスカイトの多極子秩序、$EuRbFe_4As_4$ における磁性と超伝導の結合、遷移金属ダイカルコゲナイドにおける電荷秩序、強相関ディラック半金属の新奇輸送現象、キタエフスピン液体候補物質の高圧合成、f 電子系の価数転移と負熱膨張、磁気四極子物質の非相反光学応答、ディラック磁性体の高圧合成、歪みを用いた FeSe の物性制御、奇周波トリプレット s 波超伝導の理論、を含む多彩な話題が提供されました。

オンライン研究会の欠点として、参加者で“雑談”することができず、生の情報を交換できないことが挙げられます。この欠点を克服するために、本研究会ではコミュニケーションツール slack を活用し、参加者間の交流を促しました。開催期間中に slack 上で多くの議論がなされ、有効に機能したと考えています。本研究会では、私が若手の頃に若手研究会で知り合った同年代の先生方に多大なご協力を頂きました。陽にお名前は挙げませんが、深く感謝しております。願わくは、本研究会で知り合った若手研究者が、将来、協力して分野を先導する役割を担って下さればと思っています。

量子物質開発フォーラムの参加者集合写真

「第 14 回物性科学領域横断研究会」開催報告

東大新領域　芝内 孝禎

2020 年 12 月 4 日（金）、5 日（土）の 2 日間にわたってオンラインにて、第 14 回物性科学領域横断研究会が開催されました。この研究会は、物性科学に関連した新学術領域研究が合同で開催するものであり、今年度は本領域を含め 6 領域が参加しました。本領域からは、芝内領域代表による「領域紹介」、B01 班の笠原氏による「イリジウム酸化物 $Sr_2Ir_{1-x}Rh_xO_4$ におけるアナポール秩序と鉄系超伝導体 FeSe における FFLO 超伝導」の講演があり、活発な議論が行われました。また、40 件の若手発表会がパラレル口頭セッションとして行われ、大学院生・若手研究者を対象とする最優秀若手奨励賞（1 件）および若手奨励賞（5 件）の選考が行われ、本領域の東大工金澤氏の研究室の大学院生、北折暁氏が若手奨励賞を受賞いたしました。写真はオンライン授賞式での様子です。なお、来年度からは、学術変革領域研究の新領域も加わり、さらに参加領域が増える見込みです。

第 14 回物性科学領域横断研究会において若手奨励賞を受賞した北折暁氏

人事異動

当領域の PD・特任研究員として、B01 班に吳紘丞（WU, Hung-Cheng）氏（東北大学　多元物質科学研究所　学術研究員）が 2020 年 12 月 2 日付で着任しました。

受賞報告

有田亮太郎教授が Clarivate Analytics 社による“Highly Cited Researchers 2020”に選出されました。
https://recognition.webofsciencegroup.com/awards/highly-cited/2020/

内田幸明准教授が大阪大学賞（若手教員部門）を受賞しました。
業績名は「室温の純有機材料における光と磁気の相互作用に関する研究」です。
https://www.osaka-u.ac.jp/ja/news/topics/files/R2.pdf

渡邉光氏（京大理）が日本物理学会 2020 年秋季大会において、学生優秀発表賞（領域４）を受賞しました。
http://www.r4.div.jps.or.jp/studentawards.html

岩切秀一氏（阪大理）が日本物理学会 2020 年秋季大会において、学生優秀発表賞（領域４）を受賞しました。
http://www.r4.div.jps.or.jp/studentawards.html

林田健志氏（木村研修士２年）が日本物理学会 2020 年秋季大会において、学生優秀発表賞（領域 10)を受賞しました。
http://www.r10.div.jps.or.jp/award-gakusei/jyusyou/

北折曉氏が第 14 回物性科学領域横断研究会において、若手奨励賞を受賞しました。
http://www.ryoikioudan.mp.pse.nagoya-u.ac.jp/program.html

アウトリーチ

A01 班　計画研究

岡本佳比古、 一般向け講演会・セミナー：”パイロクロア構造上に形成される正三角形「分子」の発見”, （QLC チャンネルビデオ, 2020/9/18)
https://www.youtube.com/watch?v=HZiVHpfGSJ8&t=49s

メディア報道

B01 班　計画研究

芝内孝禎, “電子集団向きそろう 東大・産総研、新しい量子液晶状態発見”, (日刊工業新聞, 2020/4/3)
https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00553848

B01 班　公募研究

細井優, “阪大ら，鉄系超伝導体に電子軌道スイッチを発見”, (OPTRONICS online, 2020/12/4）
http://optronics-media.com/news/20201204/70552/

D01 班　計画研究

岡崎浩三, “ボース･アインシュタイン凝縮､超電導発現　東大･京大が確認”（日刊工業新聞, 2020/12/3）
https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00580469

プレスリリース

A01 班　計画研究

木村剛, “電場で誘起される旋光性を用いて結晶に内在する「時計回り、反時計回り」構造の空間分布を可視化”, (東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2020/9/11)
http://www.k.u-tokyo.ac.jp/info/entry/22_entry902/

青山拓也、大串研也, “鉄アレイ型から四つ葉のクローバー型へ —鉄系超伝導体に現れた電子軌道スイッチング現象を発見—, (東北大学, 2020/12/3)
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/12/press20201203-02-clover.html

B01 班　計画研究

芝内孝禎, “鉄アレイ型から四つ葉のクローバー型へ —鉄系超伝導体に現れた電子軌道スイッチング現象を発見—”, (東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2020/12/3)
https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/3778.html

B01 班　公募研究

米澤進吾, “液晶のような超伝導の配向パターンの制御に成功 ーネマティック超伝導のドメインエンジニアリングへー”, （京都大学理学研究科 2020/8/25）
https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-08-25

細井優, “鉄アレイ型から四つ葉のクローバー型へ —鉄系超伝導体に現れた電子軌道スイッチング現象を発見—”, (大阪大学, 2020/12/3)
https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20201203_2

D01 班　計画研究

岡﨑浩三, “ボース・アインシュタイン凝縮による超伝導を初めて確認”, （東京大学物性研究所, 2020/11/7）
http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=11590

開催報告

第 15 回 QLC セミナーをオンライン開催しました。

講師：古谷　峻介 氏（茨城大学 理工学系研究科）
日時：2020 年 11 月 4 日（水）　15:30～　Zoom にて開催
場所：茨城大学（水戸キャンパス）
タイトル：対称性に守られた量子臨界相と共形場理論の大域的異常
アブストラクト：http://qlc.jp/2020/10/21/15thqlcseminar/
担当：佐藤正寛（茨城大）

第 16 回 QLC セミナーをオンライン開催しました。

講師：伏屋　雄紀氏 (電気通信大学 基盤理工学専攻)
日時：2020 年 10 月 23 日（金）　14:00～16：00
場所：オンライン*Zoom を使用して実施。
タイトル：磁場中固体電子の量子論
アブストラクト：http://qlc.jp/2020/10/22/16thqlcseminar/
担当：紺谷浩（名古屋大）

第 17 回 QLC セミナーをオンライン開催しました。

講師：高橋　和孝 氏（東京工業大学 科学技術創成研究院）

日時：2020 年 11 月 25 日（水）　15:30～　Zoom にて開催
場所：茨城大学（水戸キャンパス）
タイトル：断熱ショートカットとダイナミクスの構造：周期駆動系への応用
アブストラクト：http://qlc.jp/2020/11/09/17thqlcseminar/
担当：佐藤正寛（茨城大）

第 18 回 QLC セミナーをオンライン開催しました。

講師：越野　幹人 氏 (大阪大学大学院理学研究科物理学専攻)
日時：2020 年 11 月 17 日（火）　14:00～
場所：オンライン*Zoom を使用して実施
タイトル：ツイスト 2 次元物質の物理
アブストラクト：http://qlc.jp/2020/11/11/18thqlcseminar/
担当：紺谷浩（名古屋大）

第 19 回 QLC セミナーをオンライン開催しました。

講師：杉浦　祥 氏（NTT Research Inc. Phi laboratory）
日時：2020 年 12 月 2３日（水）　15:30～　Zoom にて開催
場所：茨城大学（水戸キャンパス）
タイトル：ポラリトンによる光波混合と Floquet レーザー
アブストラクト：http://qlc.jp/2020/11/30/19thqlcseminar/
担当：佐藤正寛（茨城大）

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

【C01 班】量子液晶の理論研究に従事する１名の博士研究員を募集します。

新学術領域「量子液晶」（領域代表　芝内孝禎）の計画研究 C01 班では、量子液晶の理論研究に従事する１名の博士研究員を募集します。
プロジェクトに意欲的に取り組んでいただける若手研究者からの積極的な応募を期待いたします。
これまでの経験は問いません。
（HP 掲載先）http://qlc.jp/2020/12/08/c01recruitment202012/

International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021)をオンライン開催します。

日時：2021 年 5 月 11 日～13 日
タイムスケジュール：http://qlc.jp/wp-content/uploads/2020/11/QLC2021-schedule.pdf
（HP 掲載先）　http://qlc.jp/2020/11/26/qlc2021/

編集後記

ニュースレター第４号をお届けします。本号は、公募研究と若手研究者の紹介がメインです。今年度は研究会・セミナーはすべてオンライン開催となり、実際に顔を合わせて議論する機会はありませんでしたが、本ニュースレターが、皆様の研究活動の情報発信、収集の一助となれば幸いです。

本領域ではコロナ禍にありながら確実に成果も上がっています。昨年末には領域会議が開かれ、多くの議論が行われました。次号 vol.5 ではその内容を紹介する予定です。

量子液晶ニュースレター編集局：　小林研介(東京大学・大阪大学) kensuke@phys.s.u-tokyo.ac.jp
永崎洋(産総研) h-eisaki@aist.go.jp
岡﨑浩三(東大物性研) okazaki@issp.u-tokyo.ac.jp

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４号

2021 年 1 月　発行

領域事務局：office@qlc.jp

領域ホームページ：http://qlc.jp/