

# BUSSEKEN BAYOR \$59 & \$2 & 2019 & 7 &

グラフェンをトポロジカル絶縁体に

超高速・超指向性・完全無散逸の3拍子がそろった 理想スピン流の創発と制御 ~『弱い』トポロジカル絶縁体の世界初の実証に成功~

強磁場で解き明かすトポロジカル磁気相転移 −スキルミオン格子から創発磁気モノポール格子へ−

異なるタイプのスピン分裂バンドの共存





東京大学物性研究所

The Institute for Solid State Physics The University of Tokyo

Copyright ©2019 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved. ISSN 0385-9843







### contents

1	グラフェンをトポロジカル絶縁体に	春山 純	志、中村	寸 壮智、	、勝本	信吾
---	------------------	------	------	-------	-----	----

4 超高速・超指向性・完全無散逸の3拍子がそろった理想スピン流の創発と制御 ~『弱い』トポロジカル絶縁体の世界初の実証に成功~

野口 亮、黒田 健太、近藤 猛

7 強磁場で解き明かすトポロジカル磁気相転移 ースキルミオン格子から創発磁気モノポール格子へー 金澤 直也、藤代 有絵子、十倉 好紀、三田村裕幸、三宅 厚志、松尾 晶、金道 浩一、徳永 将史

10 異なるタイプのスピン分裂バンドの共存

矢治 光一郎、小森 文夫、ビシコフスキー アントン、田中 悟

13	日本中性子科学会ポスター賞を受賞して	長谷川 舜介
14	第 13 回日本物理学会若手奨励賞 ( 領域 5) を受賞して	玉谷 知裕
16	第 24 回日本物理学会論文賞を受賞して	北川健太郎
18	第 13 回日本物理学会若手奨励賞を受賞して	酒井 明人
20	外国人客員所員を経験して	Natalia DRICHKO

21 【物性研究所談話会】

22 【物性研究所セミナー】

【物性研ニュース】

- 33 〇人事異動
- 35 ○東京大学物性研究所教員公募について

編集後記

# グラフェンをトポロジカル絶縁体に

ナノスケール物性研究部門 春山 糸

春山 純志\*1、中村 壮智、勝本 信吾

#### 1 はじめに

21 世紀に入って物性物理学の世界で脚光を浴びたもの に、グラフェンを始めとする2次元物質群と固体中のトポ ロジー概念がある。これらは無関係ではなく、前世紀、甲 元によって初めて明確に認識された量子ホール効果におけ るトポロジー概念[1]を、グラフェンのようなハニカム2 次元格子にスピン軌道相互作用(SOI)を仮想的に導入する ことで、類似のトポロジー数が有限の2次元系が出現する ことを示した Kane-Mele の仕事がトポロジカル絶縁体 (TI)の研究に火をつけたということができる[2]。しかし、 実際のグラフェンでは構成原子が炭素原子という軽原子で あり、格子が完全に2次元的であることから、SOI は極め て弱く、到底 TI にはなり得なかった。2 次元 TI は最初に 考えられたものとはかなり異なる形で実証され[3]、その 後3次元系で様々な TI が見出された[4]。しかし、当初予 言されたような形、グラフェンなどの2次元物質にSOIを 何らかの形で導入して TI にする、という試みも続けられ た。これは、2次元物質そのものの電気伝導に基礎・応用 の両面から興味が持たれ、SOIを空間変調をもって導入で きれば、2次元物質とトポロジカル絶縁体との界面の物理 が大きく広がる期待があったことが動機づけの一つになっ ている。

グラフェンへの SOI 導入の様々な試みの中で、最初に 注目されたのがグラフェン表面を一部水素化して2次元系 に非対称性を導入するものである。特に注目されたのがシ ンガポール国立大の報告で[5]、0.05%の水素化で2.5 meV という大きな SOI ギャップを導入できるとされた。しか し、実験手法の信頼度にやや問題があり、我々のところで 同様な水素化法を用い、信頼度のより高い実験を行ったと ころ、確かに SOI は導入されるものの、その大きさはか なり小さいことが判明した[6]。

我々のグループでは、その後色々な SOI 導入法を試み たが、最終的に重い元素からなる微粒子(Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)をグラ フェン表面に分散する、という方法で大きな SOI ギャッ プを導入し[7]、トポロジカル絶縁体化することに成功した[8]。これらの研究結果について報告する。

#### 2 実験

グラフェン表面の重元素修飾については、多くの理論が 提唱されてきた。特にカリフォルニア大 Wu・カリフォル ニア工科大 Alicea らのグループでは、被覆率僅か 1%程度 でランダム修飾した重原子からグラフェンにその均一な ディラック状態を介して広がるトンネル電流により 200 meV を超える SOI ギャップが導入され、高温まで安定な TI 状 態が形成されるとしている[9]。これに触発され、我々のグ ループでも様々な方法を試したが、グラフェンについては 「医療ナノ針」を使う方法が唯一の成功例である<sup>\*2</sup>。

この方法では、まず Bi₂Te₃ の微粒子をアセトン中に分 散する。アセトン溶液を、数 10 µm オーダー内径の医療 用の針先から手動で直接グラフェン表面に滴下し、この液 滴を針先から吸引する。この滴下・吸引を数十回繰り返し たのち、400℃で高真空アニールすると、AFM 観察(図 1(a))から、滴下・吸引のサイクル数により表面被覆率を 再現性良く制御できることがわかった。一見極めて原始的



図 1 (a) グラフェン表面に分散した Bi<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub> 微粒子の AFM 像。 表面被覆率は 3%。(b)~(d)微粒子修飾したグラフェンの光電子 分光スペクトル。

<sup>\*1 2018</sup>年度客員所員。青山学院大学理工学部。

<sup>\*2</sup> MoS<sub>2</sub> については、別の方法で類似の結果を得ることが できた(論文準備中)。

な方法であるが、図 1(b)および(c)の光電子分光スペクト ルのような Bi および Te と下地のグラフェンとの結合が明 瞭にピークとして見えるような修飾ができたのは、試みた 中ではこの方法だけであった。

伝導測定用の試料は、図2の挿入図のような形状にグラフェンをスパッタ加工し、金属電極を付けた上で微粒子分散を行い、表面被覆率が3%となるようにした。グラフェンは高濃度ドープシリコン基板上のSiO2膜上に置かれており、背面ゲート電圧を加えることができる。電気伝導測定はヘリウムの減圧により1.5Kまで行った。低温STM装置はカリフォルニア大学のもので、測定は希釈冷凍機中で0.4Kまで冷却して行った。

#### 3 実験結果と議論

図 2 は、試料の端子 1-6 間に電流源を接続して一定電流 を流し、端子 3-4 間で電圧を測定することによって得られ る、非局所抵抗を背面ゲート電圧( $V_{bg}$ )に対してプロットし たものである。一般に非局所抵抗配置では、電圧端子は電 流が流れていない箇所に配されており、古典的なバルク伝 導では電圧が生じない、すなわち非局所抵抗はゼロになる。 実際、微粒子修飾を行っていないグラフェンで同形状の試 料、同じ端子配置で抵抗測定を行うと、緑線で示したよう に抵抗はゼロである。しかし、微粒子修飾を行った試料で は、青線で示したように室温でもすでに大きな非局所抵抗 が現れている。赤線で示した低温の結果では、グラフェンの ディラック点を反映して  $V_{bg}$ に対して非局所抵抗は明瞭な ピーク構造を取り、その頂上付近はややフラットなプラトー 状になっている。しかもそのプラトーの値が、 $R_{Q} = h/e^{2}$ を量子化抵抗として、ちょうど $R_Q/6$ となっている。



図2 挿入図は、試料のAFM 像に電極番号をオーバーラップした もの。主パネルは、この試料で電極 1-6 に電流を流し、電圧を 3-4 間で取ることで得られた非局所抵抗の背面ゲート電圧依存 性を示している。青線は 300 K での測定、赤線は 1.5 K での測 定。また緑線は微粒子修飾を行っていない試料。

このような非局所抵抗の要因としては、(1)量子コヒー レンス長が長くなって、波動関数の非局所性により現れる、 (2) 電流を要因として何らかの機構によりスピン流が発生 して拡散し、電圧端子でも上下スピンの化学ポテンシャル 差を検出する何らかの機構が働いて電圧として現れる、 (3)バルク部分が絶縁体化して端部分に電流が集中し、電 圧端子部分にも電流が流れている、などが考えられる。ま ず、(1)については、電子波の白色性がどうしても悪く なってしまう高温においても見られるという点と、このよ うな乱雑性の強い系で電圧(Vbg)に対して(またデータは示 していないが磁場に対しても)ほとんどゆらぎのような乱 雑な依存性を示していないことから、否定される。また、 (2)については、Bi2Te3 微粒子によって SOI が導入されて いると期待され、それ程スピン拡散長が長いとは考えにく く、電極などもすべて時間反転対称な材料でありスピンに 反応することも期待しがたいことから、これも可能性は低 い。また、(1)、(2)いずれも抵抗の頂上プラトー位置が ちょうど R<sub>Q</sub>/6 であることを説明しない。

残る可能性は(3)の端状態伝導である。[7]のように強い SOIが導入され、これによるエネルギーギャップが開いて 絶縁体状態が現れているとすると、これは TI 状態になっ て量子スピンホール効果(QSE)が生じると期待される。 QSE 状態では、試料端でギャップが閉じ、↑スピンと↓ スピンの電子が反対方向に伝播するヘリカル端状態が生じ ると期待される。

今、図2の挿入図中の試料 AFM 像で、番号を付した金 電極の部分でこのヘリカル端状態がコヒーレンスを失って 金属に吸い込まれている、とする。量子ホール効果の言葉 で言うと、各電極に「ホットスポット」が生じているとす る。このような状態は、Landauer-Büttiker の伝導公式 [10]で扱うことができ、図2の電極配置にすると、 $R_Q/6$ になることが簡単に導かれる。今の場合は更に簡単で、実 は電極間の端状態が  $R_Q/2$ の古典的抵抗になっているとす る単純な電子回路計算で  $R_Q/6$ が導かれる。電極間の1次 元弾道的伝導状態の抵抗が  $R_Q$  になる、というのは Landauer の公式そのものであり、ヘリカル端状態では これが2本並列であるため $R_Q/2$ が説明される。更に、そ の他の電極配置でも非局所抵抗が測定され、いずれも Landauer-Büttiker 公式で説明することができ、QSH 状態が実現していることが明らかになった。

一方、共同研究者のカリフォルニア大グループでは同じ 試料で低温 STM 装置を使用し、局所状態密度を反映す る微分伝導度(dI/dV)をバイアス電圧に対して測定した。



図3 低温 STM を用いて、探針を微粒子の近傍、および試料の 端付近に固定し、バイアス電圧に対する微分伝導度(dI/dV) を 測定した結果。

図3中の青線に示したように、探針を微粒子の近傍のグラ フェン上に停止させて dI/dV を測定すると、[7]で報告し た値に近い、20 meV 程度のエネルギーギャップを検出し た。これは微粒子から離れると小さくなる傾向を見せてい る。そして、試料の端付近では、赤線で示したようにはっ きりギャップが閉じていることがわかる。これらはすべて、 グラフェンに SOI によるエネルギーギャップが導入され て QSH が発現し、ヘリカル端状態が生じているとして説 明されるものである。

#### 4 今後の課題

以上、散々様々な方法を試した結果、意外なことに大変 原始的な方法でようやくグラフェンを TI 状態にすること ができた。当然ながら、非常に乱雑性が大きく、量子ホー ル効果状態で局在ポテンシャルの周りに沢山の端状態が生 じているのと同様、試料の端だけではなく、微粒子の周り などに沢山のヘリカル端状態が生じていると考えられる。 何とか、より洗練された、一様性の良い手法を開発したい と考えている。

また、冒頭に述べたように、試料を部分的に TI 状態に して界面効果を見る、超伝導近接効果を加えてトポロジカ ル超伝導状態を探す、更に、我々の得意とするところであ るナノメッシュによる強磁性体化[11]を施し、異常 QSH 効果を調べる、など、非常に多くの課題が考えられ、胸躍 る日々を送らせていただいている。

本研究は、新学術領域研究ナノスピン変換科学―電気的 スピン変換の援助を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] M. Kohmoto, Ann. Phys. 160, 343 (1985).
- [2] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. 95, 226801 (2005).
- [3] M. König et al., Science 318, 766 (2007).
- [4] Y. Ando, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 102001 (2013).
- [5] J. Balakrishnan et al., Nat. Phys. 9, 284 (2013).
- [6] T. Nakamura, J. Haruyama, and S. Katsumoto, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 105002 (2016).
- [7] T. Namba et al., Appl. Phys. Lett. 113, 053106(2018).
- [8] E. Hatsuda et al., Sci. Adv. 4, eaau6915 (2018).
- [9] J. Hu, J. Alicea, R. Wu, and M. Franz, Phys. Rev.Lett. 109, 266801 (2012).
- [10] M. Büttiker, Phys. Rev. Lett. 57, 1761 (1986).
- [11] T. Shimizu et al., Nat. Nanotech. 6, 45 (2011).

# 超高速・超指向性・完全無散逸の3拍子がそろった 理想スピン流の創発と制御

~『弱い』トポロジカル絶縁体の世界初の実証に成功~

極限コヒーレント光科学研究センター 野口 亮、黒田 健太、近藤 猛

#### 概要:

トポロジカル絶縁体は、電子構造の非自明なトポロジー に保護された金属的なエッジ(表面)状態がバルクバンド ギャップ中に現れる物質である。3 次元では、トポロジカ ル絶縁体はそのトポロジーの違いにより「強い」トポロジ カル絶縁体 (STI) と「弱い」トポロジカル絶縁体 (WTI) の2種類に分類される[1]。これまで提唱されてきたトポ ロジカル絶縁体のほとんどはSTIあり、すべての結晶表面 にトポロジカル表面状態が出現する。STI ではこのトポロ ジカル表面状態はディラックコーン型の分散関係を持ちう るとして注目され、実際に、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>など多くの物質で角度 分解光電子分光 (ARPES) によってそのバンド構造が確 かめられてきた [2]。一方で、WTI では特定の表面のみに トポロジカルに非自明な表面状態が出現するとされ、特に この表面状態はSTIの二次元ディラックコーン型とは異な り擬一次元のバンド構造を取りうることが指摘されてきた。 しかし、これまで提案された WTI 候補物質ではトポロジカ ル表面状態の出現が劈開性のない表面に限られていたため、 ARPES によるそのバンド分散の観測は行われていなかった。

本研究で我々は、高いエネルギー分解能を持つレーザー ARPES と放射光を利用した nano-ARPES を組み合わせ ることで、擬一次元の結晶 β-Bi4I4 [3,4] において弱いト ポロジカル絶縁体相が実現していることを決定した [5]。 β-Bi4I4 はその擬一次元性を反映して上面と側面の 2 つの 表面で劈開する。この側面は幅が数 μm と非常に小さい が、高い空間分解能を持つ nano-ARPES を利用した表面 選択測定によって、WTI の特徴である側面の擬一次元ト ポロジカル表面状態を観測した。

#### 実験結果:

実験は東大物性研で開発されたレーザースピン分解 ARPES 装置 [6]と、イギリス Diamond の nano-ARPES、 イタリア Elettra の Spectromicroscopy 装置を用いて行った。  $\beta$ -Bi4I4 はブリルアンゾーンの M 点と L 点でバンドギャッ プが小さくなる半導体であり、トポロジカルに非自明な性 質をもたらすバンド分散のパリティ反転もこの 2 点で生じ る。そのため、WTI 相が実現していれば、側面である (100)面に  $\bar{\Gamma}$  点と  $\bar{Z}$  点でギャップレスとなる擬一次元ト



図 1 (a) レーザーARPES 測定の概略。(b)  $\beta$ -Bi<sub>4</sub>I<sub>4</sub> のブリルアンゾーン。(c) フェルミ準位での光電子強度分布。(d) 異なる試料回転角 ( $\theta$ )で測定した ARPES 画像。 $\theta$ =49, 72 がそれぞれ (100) 面の  $\bar{\mathbf{Z}}$  点、 $\bar{\Gamma}$  点に対応している。(e)  $\theta$ =49 で測定したスピン分解光電子強 度とスピン偏極。スピン分解は (100) 面の面内方向に行った。

ポロジカル表面状態が出現する。

図1にレーザーで測定した $\beta$ -Bi<sub>4</sub>I<sub>4</sub>の ARPES 結果を示 す。本測定で用いたレーザー光のスポットサイズは 50 µm 程度であり試料表面のドメインに対して十分に大きいため、 上面・側面の2つの面のバンド分散の重ね合わせが観測さ れる。図1(d)から、すべての角度でディラック型の分散が 観測されており、図1(c)に見られる擬一次元のフェルミ面 を構成していることが分かる。このような擬一次元のディ ラック型状態は、バルクバンドやSTIに現れるディラック コーン型の表面バンドでは説明できず、また (100) 面の  $\overline{\Gamma}$  点と  $\overline{\mathbf{z}}$  点に対応する角度でギャップレスとなっている 特徴から、WTI に現れる側面表面状態であると考えるこ とができる。そこでスピン分解 ARPES 測定を行ったとこ ろ、図 1(e) に示すように側面 (100) 面内に強いスピン偏 極が観測され、測定されたバンドが実際に側面のトポロジ カル表面状態であることが示唆された。



図 2 (a) Nano-ARPES による側面選択測定の概略。(b) 側面 (100) のフェルミ面マッピング結果。(c) 高対称点を通る ARPES 画像とフェルミ準位での運動量分散曲線 (MDC)。MDC ではディラック分散に対応する 2 つのピーク構造が確認できる。 (d) 上面選択測定の概略。(e) (001) 面の Γ 点を通るARPES画像。

しかし前述したようにレーザーARPES では上面・側面 を同時に測定しているため、放射光を利用して励起光のス ポットサイズを1 µm 以下に絞った nano-ARPES 装置を 用いることで、上面と側面の表面選択測定を行い、ディ ラック型のバンドの由来を決定した。厚さ 30 µm 程度の 薄い試料をサンプルホルダーに垂直に固定し、スコッチ テープを使って直接側面を劈開することで試料側面のみの ARPES 測定を行った(図 2(a))。測定されたフェルミ面は 一次元的な光電子強度から形成されており、(100) 面の特 徴と対応することが分かった。さらに Γ 点と Ζ 点を通 るカットで ARPES 測定を行った結果を図 2(c) に示す。 Diamond の nano-ARPES ではゾーンプレート方式でス ポットサイズを絞るため、励起光の強度が通常の測定装置 の数100分の1程度となっている。そのため、一つの角度 での光電子分布を4時間程度積算することで、十分なシグ ナルを得ることができた。運動量分布曲線から、フェルミ 準位で2つのピーク構造が形成されており、ディラック型 の分散が測定されていることが分かる。一方で(001)面 の測定も行ったところ、このような特徴は見られず(図 2e)、レーザーで測定された擬一次元状態は側面 (100) の みに出現する WTI の表面状態であることが結論できた。



図3「強い」・「弱い」トポロジカル絶縁体のイメージと概略 図。「強い」トポロジカル絶縁体では表面スピン流があらゆる方 向に拡散していくのに対して、「弱い」トポロジカル絶縁体で は、散逸の少ない擬一次元スピン流が結晶側面を流れる。

#### まとめと今後の展望:

レーザー光と放射光を組み合わせた測定によって、 β-Bi<sub>4</sub>I<sub>4</sub>で擬一次元の表面状態が側面に出現する WTI 相が 実現していることが分かった。発見した状態は WTI 相の 中でも最もシンプルな構造であり、量子スピンホール絶縁 体(2次元トポロジカル絶縁体)の3次元版と考えることが できる。量子スピンホール絶縁体では、試料の1次元エッ ジに純スピン流が流れるが、WTIでは、2次元空間である 側面に擬一次元のスピン流が流れる。そのため、これまで 見つかってきた2次元面内で拡散的なSTIの表面状態とは 大きく異なり、後方散乱の影響を受けにくい、高指向性の スピン流が高密度で存在していると考えられる(図 3)。こ れは「弱い」トポロジカル絶縁体ならでは理想的なスピン 流が実現していることを意味している。さらに Bi4I4 は、 結晶構造が異なる α相で通常の絶縁体となるという性質 も本研究により確かめられた。これは構造相転移を利用し た表面スピン流の制御が可能であることを示しており、ス ピン流を利用したトランジスタなど、新しい省エネルギー デバイスの研究に発展することが期待される。

#### 謝辞:

本研究は東京工業大学フロンティア材料研究所の笹川崇男 准教授、東京大学工学系研究科の有田亮太郎教授、大阪大 学理学研究科の越智正之博士、産業技術総合研究所の白澤 徹郎博士、東京大学物性研究所の辛埴教授、矢治光一郎助 教らとの共同研究として行われました。この場をお借りし て御礼申し上げます。

- L. Fu, C. L. Kane, and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. 98, 106803 (2007).
- [2] Y. Xia et al., Nat. Phys. 5, 398 (2009).
- [3] G. Autès et al., Nat. Mater. 15, 154 (2016).
- [4] C.-C. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 116, 066801 (2016).
- [5] R. Noguchi et al., Nature, 566, 518 (2019).
- [6] K. Yaji et al., Rev. Sci. Instrum. 87, 53111 (2016).

# 強磁場で解き明かすトポロジカル磁気相転移

-スキルミオン格子から創発磁気モノポール格子へ-

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 金澤 直也、藤代 有絵子、十倉 好紀 物性研究所 国際超強磁場科学研究施設 三田村 裕幸、三宅 厚志、松尾 晶、金道 浩一、徳永 将史

#### スキルミオン格子と創発磁気モノポール格子

量子ホール効果の発見を契機として、物質中のトポロジ カルな構造に由来した実効的な電磁場(創発電磁場)が量子 物性に大きな影響を与えていることが認識されるようにな りました[1]。スピン構造のトポロジーに目を向けると、 実空間のスピン配列やその時間変化で決まる創発電磁場分 布が現れるため、スピン構造の制御により多種多様な創発 電磁場物性を実現できる可能性を秘めています。特にナノ メートルスケールの2次元渦状磁気構造であるスキルミオ ン(図1上段右)は、外部刺激による生成や消去、そして創 発磁場を用いた高効率な検出や駆動といった制御が可能で あるため、スキルミオンを情報ビットとする磁気メモリデ バイス開発といった応用も期待されています[2]。

スキルミオンは MnSi や Fe1-xCoxSi といった B20 型遷 移金属化合物で観測されてきましたが[3,4]、同じ結晶構 造を持つ MnGe ではヘッジホッグとよばれる 3 次元の特 異なトポロジカルスピン構造が存在することが明らかに なりました(図 1 下段右下) [5]。B20 型化合物はキラルな 結晶構造であるため、反対称的スピン間相互作用 (Dzyaloshinskii-守谷相互作用、 $\propto S_i \times S_i$ )が強磁性相互 作用( $\propto S_i \cdot S_i$ )と競合し、強磁性構造が捻られた状態が現 れます。その捻り方向が複数ある場合、すなわち複数の 磁気変調にモード間結合がある場合、トポロジカルな磁 気構造が周期的に並んだ格子状態が実現します。例えば 平面上の3方向の磁気変調(q1, q2, q3)が重なり合うと、ス キルミオンが三角格子を組んだスキルミオン格子状態が 現れ(図1上段)、互いに垂直に重なり合うとヘッジホッ グ格子(3q-ヘッジホッグ格子、図1下段)が形成します。 ここでヘッジホッグがもたらす創発磁場分布は中心から 湧き出すまたは中心に吸い込まれるような構造であるた め、ヘッジホッグ格子は創発磁気モノポール格子のよう に振舞います。

同じ結晶構造を持つ MnSi と MnGe において全く異な るスピン構造のトポロジーが現れることから、それらの固 溶体である MnSi<sub>1-x</sub>Gex の特定の組成において劇的なトポ ロジカル磁気転移が生じることが期待できます。本研究で はSiとGeの組成比を変化した一連のMnSi<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>を合成 することにより、スキルミオン格子から創発磁気モノポー ル格子へと変形する過程を明らかにしました。特に、中間 組成(x=0.3-0.6)においてヘッジホッグ(創発磁気モノポー ル)と反ヘッジホッグ(反モノポール)が面心立方格子状に 配列した新しいトポロジカル磁気構造が現れ、スキルミオ ン格子とも MnGe のヘッジホッグ格子とも異なる強磁場 物性を示すことがわかりました。以下では、強磁場測定に よって明らかにできた B20型化合物 MnSi<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>における トポロジカル磁気構造の変遷と創発磁場応答(トポロジカ ルホール効果)について紹介したいと思います。



3q-ヘッジホッグ格子(3q-HL)



図1: スキルミオン格子(SkL, 上段)とMnGeに現れるヘッジホッ グ格子(3q-HL下段)。共に3つの磁気変調の重ね合わせ状態で記 述できるが、それぞれ磁気変調方向が同一平面上であるか(SkL)、 互いに直交するか(3q-HL)でスピン構造のトポロジーが異なって くる。

### 相転移の狭間に出現する新たな創発磁気モノポール 格子

スピンがどのように捻れて配列しているかを大まかに示 唆してくれる物理量に強磁性転移磁場があります。直感的 には、2 次元方向にスピンが捻れて配列しているスキルミ オンよりも3次元のあらゆる方向に捻られたヘッジホッグ の方が、強磁性状態へとスピンを揃えるのにより大きな外 部磁場が必要になってくるため、強磁性転移磁場の大きさ はスピン構造のトポロジーを表す良い指標となる訳です。 実際に  $MnSi_xGe_x$ の磁化の強磁場測定を行い、磁化が飽 和するときの磁場(強磁性転移磁場)を見てみると、最低温 において組成0  $\leq x \leq 0.25$ では1T程度の強磁性転移磁場 が、中間組成0.3  $\leq x \leq 0.6$ において10T程度となり、 0.7  $\leq x \leq 1.00$  MnGeに近い領域では20Tを超えるとい う明確な2段階磁気転移が現れています。このように組成に よってその大きさや温度依存性が大きく異なり、スピン構 造に劇的な変化が起きていることが予想できます(図2上段)。



図 2: MnSi<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>における磁気相図の変遷(上段)と中間組成領域 に現れた新しいヘッジホッグ格子(4q-HL,下段)。

磁気構造の詳細を明らかにするため小角中性子散乱実験 を行うと、MnSi 側の Ge 低ドープ領域( $0 \le x \le 0.25$ )では スキルミオン格子形成に特有の磁気散乱パターンが観測で き、Ge 高ドープ領域( $0.7 \le x \le 1.0$ )においては MnGe に 現れるヘッジホッグ格子形成に見られるパターンが現れま した。さらに中間組成においては、これまでにない磁気散 乱が観測され、図2下段に示した4つの磁気変調の重ね合 わせ状態で記述される新しいヘッジホッグ格子(4q-ヘッ ジホッグ格子)が発現している可能性が見出されました。 (詳細は[6]参照。)

実際に相境界においてどのようにトポロジカル磁気構造 が変形し磁気転移を示すのかは明らかになっていませんが、 MnGeのヘッジホッグ格子から MnSiのスキルミオン格子 ヘ転移する際に、一度ヘッジホッグ位置の組み替えが生じ ることは、スピン構造のトポロジーという幾何学的な観点 からも興味深い現象であるように思えます。

### ロングパルス磁場を用いた精密トポロジカルホール 効果測定

MnSi<sub>1-x</sub>Gex に現れる 3 つの異なるトポロジカル磁気構 造(SkL, 3q-, 4q-HL)は、それぞれの構造を反映した創発 磁場分布によって、トポロジカルホール効果と呼ばれる伝 導電子の運動方向の偏向現象が引き起こされます。磁場印 加に伴うトポロジカル磁気構造の解け方がそれぞれ異なる ことに対応して、各磁気相においてトポロジカルホール効 果も特徴的な磁場依存性を示すようになります。

大きさの予測が難しいトポロジカルホール効果は、測定 されたホール抵抗率のうち正常ホール効果(α磁場H)・異 常ホール効果(∝磁化M)では説明できない寄与として見積 もられます。そのためこれらの通常の寄与をトポロジカル ホール効果が現れない状態、すなわち強磁性状態で見積も る必要が出てきますが、磁化測定で明らかになったように、 3次元ヘッジホッグスピン構造を強磁性状態へと解くため には強磁場が必要となります。特に 3q-ヘッジホッグ格子 相である Ge 高ドープ領域(0.7 ≤ x ≤ 1.0)においては、強 磁性転移磁場が最大で 23 T にも達しています。パルス強 磁場下における低抵抗バルク金属物質の微小なホール抵抗 測定は測定精度の観点から通常困難ですが、フライホイー ルを用いた非破壊型長時間パルス(ロングパルス)と数値位 相検波法を用いることによって数μΩ程度の高精度でホー ル抵抗を測定することに成功したので、ここでは例として x = 0.8 におけるトポロジカルホール効果について紹介し ます。



図 3: MnSi<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x = 0.8)におけるホール抵抗率(左)、見積もったトポロジカルホール抵抗率(中央)、トポロジカルホール抵抗率の温 度・磁場依存性(右)。100 K 以上の温度では PPMS を用いて測定している。微小なホール抵抗率も高精度で測定できていることを強調し たい。

図3左に示した各温度におけるホール抵抗率の磁場依存 性を見ると、強磁性転移磁場以下の領域でホール抵抗率が 非単調に変化していることが分かり、複雑な創発磁場分布 によるトポロジカルホール効果の存在が示唆されます。実 際に正常・異常ホール効果の寄与を見積もると強磁性状態 でホール抵抗率を再現するような曲線となり(図3左の細 線)、有限のトポロジカルホール効果が観測できました(図 3左網掛け、網掛け部分を抜き出した図3中央)。見積もっ たトポロジカル抵抗率を温度-磁場平面にプロットすると、 低温低磁場では負の寄与となっているが、常磁性・強磁性 転移に近づく高温高磁場において正の寄与へと符号変化し ています。この符号変化は磁場や温度によって誘起された スピン構造のダイナミクス(とそれに伴う創発電磁場)と関 連している可能性があり、今後詳細な機構解明が望まれて います。

#### まとめ・展望

キラル磁性体 MnSi<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> において、スキルミオン格子 から異なる2つのヘッジホッグ格子へと多段階に転移する 様子を解明しました。SiとGeの組成比制御は格子定数の 変化に対応するため、同様に格子定数を変化させる外部圧 力によってもスピン構造のトポロジー自体を制御できるか も知れません。一方で磁場によってもスピン構造を解く、 すなわちトポロジカル磁気転移を引き起こすことが可能で、 密に配列したヘッジホッグ格子状態をはじめとして複雑に 絡み合った様々なトポロジカル磁気構造[7]に対して多角 的な強磁場測定の威力が発揮されると期待されます。

#### 謝辞

本研究における強磁場測定は物性研究所国際超強磁場科学 研究施設共同利用による成果です。また JSPS 科研費 (15H05456, 18K13497)ならびにJST 戦略的創造研究推進 事業 CREST(JPMJCR16F1)の助成を受けて行われました。

- K. v. Klitizng, G. Dorda, and M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.* 45, 494 (1980).
- [2] 金澤直也, 于秀珍, 賀川史敬, 十倉好紀, 固体物理 50, 721 (2015).
- [3] S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, and P. Böni, *Science* 323, 915 (2009).
- [4] X. Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J. H. Park, J. H. Han, Y. Matsui, N. Nagaosa, and Y. Tokura, *Nature* 465, 901 (2010).
- [5] N. Kanazawa, Y. Nii, X.-X. Zhang, A. S. Mishchenko, G. De Filippis, F. Kagawa, Y. Iwasa, N. Nagaosa, and Y. Tokura, *Nature Commun.* 7, 11622 (2016).
- [6] Y. Fujishiro, N. Kanazawa, T. Nakajima, X. Z. Yu, K. Ohishi, Y. Kawamura, K. Kakurai, T. Arima, H. Mitamura, A. Miyake, K. Akiba, M. Tokunaga, A. Matsuo, K. Kindo, T. Koretsune, R. Arita, and Y. Tokura, *Nature Commun.* 7, 11622 (2016).
- [7] P. Sutcliffe, J. Phys. A: Math. Theor. 51, 375401 (2018).

# 異なるタイプのスピン分裂バンドの共存

極限コヒーレント光科学センター 矢治 光一郎、小森 文夫 九州大学工学院 ビシコフスキー アントン、田中 悟

### 【はじめに】

非磁性体の表面や界面において強いスピン軌道相互作用 によりスピン偏極した電子に関する研究が盛んに行われて いる。ラシュバ型スピン分裂を示す表面はその代表例とし てよく知られている[1]。理想的な二次元自由電子ガスを 用いたラシュバモデルでは、スピンの方向は電子の運動量 と表面垂直方向の両方に対して直交する。固体単結晶表面 でもこのようなスピン方向が観測される場合もある一方で、 電子のスピンの方向が結晶構造の対称性に大きく影響を受 けることもある[2]。例えば三回対称な表面結晶構造をも つ物質の K 点では、その対称性が鏡映反転を含まない C3 の場合は、エネルギー方向にスピン縮退が解け、面直方向 のスピンをもつゼーマン型のスピン分裂バンド構造になる [3]。一方、K 点の対称性が鏡映反転面を含む C<sub>3v</sub>であれば、 面内方向スピンが渦状となるラシュバ型スピン分裂バンド になる[4]。これらの系の K 点は時間反転対称性を有して いないが、後者においては結晶構造の対称性からラシュバ 型のスピンテクスチャをもつ[2,5]。このことから、電子 のスピンテクスチャは結晶対称性によって決まると考えら れてきた。しかしながら最近我々は、三回対称な結晶構造 をもつスズ(Sn)単原子層のK点において、この考えでは説 明できないラシュバ型とゼーマン型の両方のスピンテクス チャが共存していることを見出した[6]。

#### 【実験内容と結果】

試料は、Sn 原子をグラフェンとシリコンカーバイド (SiC)基板の界面にインターカレーションすることにより 作製した(図1)[7]。このSn単原子膜では、Sn原子はSiC 基板のT1サイトに吸着し、三角格子のネットワークで形 成される結晶構造をとっている。また、最表面のグラフェ ンはSn/SiC(0001)の結晶周期に対して30度傾いている。 以下、この試料を簡単のためSn/SiC(0001)と呼ぶ。

本研究では、Sn/SiC(0001)の電子状態を角度分解光電 子分光(ARPES)およびスピン・角度分解光電子分光 (SARPES)を用いて詳細に調べた[6]。実験は、東京大学物 性研究所の極限コヒーレント光科学研究センターで開発さ



図 1. グラフェン/Sn/SiC(0001)の結晶モデル側面図(a)と上面図 (b)、及びそのブリュアンゾーン(c)。上面図ではグラフェン層を 省略している。Sn 原子は SiC 基板上で三角格子(上面図中の点 線)を形成している。(c)実線は Sn/SiC(0001)-(1×1)、点線は再表 面のグラフェンのブリュアンゾーン。



図 2. (a) Sn/SiC(0001)のΓK<sub>sic</sub> 方向で測定された ARPES 強度 図。実曲線はオリジナルバンド、点曲線はグラフェンの周期で 折り返されたバンド。(b) K<sub>sic</sub> 点における S<sub>1</sub>の z 成分スピン分解 光電子スペクトル。(c) S<sub>2</sub>の SARPES 図[6]。

れた三次元的にスピンベクトルを解析できる高分解能 SARPES 装置を用いて行われた[8]。

Sn/SiC(0001)の Ksic 方向[図 1(c)]の ARPES 測定を行う と、Ksic 点近傍において二つの Sn 由来のバンド(S1, S2)が 観測された[図 2(a)]。S1 は結合エネルギー1.5 eV 付近でエ ネルギーギャップをもち S1 と S1'を形成している。また SARPES より S1, S1'それぞれは Ksic 点において面直方向 のスピンをもっていることがわかった[図 2(b)]。したがっ て、S1 は Ksic においてゼーマン型にスピン分裂したバン ドである。一方、S2 はフェルミ準位近傍において運動量 方向に分裂しており、Ksic 点においてスピン縮退し、Ksic 点を挟んでスピン偏極が反転していることがわかった[図 2(c)]。したがって S2 はラシュバ型にスピン分裂したバン ドである。

これまでは結晶の対称性とスピン分裂バンド構造は一対 ーで対応すると考えられていた[2,5]にもかかわらず、こ の Sn/SiC(0001)では、一つの K<sub>Sic</sub> 点においてゼーマン型 とラシュバ型両方のスピン分裂バンドが共存している。 Sn/SiC(0001)においてSiC基板も含めた結晶構造を考える と、K<sub>Sic</sub> 点は鏡映面を含まないため、その対称性は C<sub>3</sub> で ある。したがって、ゼーマン型スピン分裂は結晶対称性を 考慮することにより矛盾なく説明できる。一方、ラシュバ 型のスピン分裂は従来の結晶構造の対称性を用いた考え方 だけでは説明できない。

このメカニズムを解明するために第一原理電子状態計算 を行った[6]。計算においても、K 点においてゼーマン型 とラシュバ型両方のスピン分裂バンドが現れており、実験 結果とよく一致する[図 3(a,b)]。そこで、K 点における電 荷密度分布の対称性を調べてみた。まず、S1の K 点にお ける電荷密度分布を図 3(c)に示す。電荷密度分布の鏡映面 が単位格子ベクトルに対して垂直になっていることがわか る。したがって、S1の電荷密度分布は平面群 p3m1 に属 し、K 点の対称性は C3 である。これは基板も含めた Sn/SiC(0001)の結晶の対称性と同じである。したがって、 電荷密度分布も S1 のゼーマン型のスピン分裂と矛盾しな い。次に S2 の電荷密度分布を図 3(d)に示す。S2 の電荷密 度分布では、その鏡映面と単位格子ベクトルが平行になっ ている。よって S2の電荷密度分布は平面群 p6m に属し、 その場合は K 点の対称性は C3v である。この電荷密度分布 の対称性は Sn/SiC(0001)の基板も含めた対称性とは異な り、この対称性からはラシュバ型のスピン分裂バンドが誘 起されてよい。

同じ K 点であるにも関わらず電荷密度分布の対称性が

異なる原因は、それぞれの電子状態が感じる結晶ポテン シャルの違いに起因する。S<sub>1</sub>の電荷密度分布[図 3(c)]には、 SiC 基板の二層目のC原子の真上の位置に空孔が存在して いる。これはS<sub>1</sub>電子がSiC 基板の結晶ポテンシャルの影 響を強く受けていることを意味している。この場合、結晶 の対称性と電荷密度分布の対称性が同じになる。一方、 S<sub>2</sub>はSn原子とSiC 基板最上層のSi原子との間の結合状 態であり、SiC 基板の二層目のC原子より下(つまりバル ク)の結晶ポテンシャルの影響を受けていない。最上層の Sn-Si 結合の原子配列のみに注目すると、その結晶格子の 平面群は p6m になっており結晶構造と電荷密度分布の対 称性は一致している。すなわち、表面電子状態が基板の結 晶ポテンシャルの影響を受けるかどうかで、電荷密度分布 の対称性だけでなくそのスピン分裂バンド構造も変化する ことがわかった。



図 3. (a,b) 第一原理計算によって得られた Sn/SiC(0001)のバン ド構造。緑-白-紫で面直方向のスピン偏極度、赤-白-青で面内 方向のスピン偏極度をあらわす。(a)は面直スピン成分、(b)は面 内スピン成分をあらわす。(c,d)  $S_1$ および  $S_2$ それぞれの K 点にお ける電荷密度分布。実線は単位格子、点線は電荷密度分布の鏡映 面をあらわす[6]。

#### 【まとめと展望】

本研究では、SiC 基板上の Sn 単原子膜が大きくスピン 偏極した電子状態をもつことを発見した。さらに、K 点に おいて原子膜面直方向のスピンを持ちゼーマン型にスピン 分裂した電子バンドと面内方向のスピンを持ちラシュバ型 にスピン分裂した電子バンドが共存していることを発見し た。従来の結晶の対称性のみを取り入れた考え方ではこの 結果は説明できないが、電荷密度分布の対称性まで考慮に 入れるとこの結果をよく理解できる。またここまでは考慮 してこなかったが、この Sn 単原子膜の表面はグラフェン で覆われている。グラフェンはとても頑丈で安定な物質で あるため、この試料は大気中でも安定である。グラフェン を保護膜として用いることで、これまで真空中でしか取り 扱えなかったスピン偏極電子材料を大気中に取り出して利 用することが可能となる。

#### 【謝辞】

本研究は、東京大学物性研究所の辛埴、飯盛拓嗣、黒田健 太、及び九州大学工学院の林真吾、梶原隆司の各氏との共 同研究により行われました。本研究は JSPS 科研 費 15K17675, 26287061, 18K01146, 18K03484の助成 を受けて行われました。

### 【参考文献】

- [1] K. Yaji et al., Phys. Rev. B 98, 041404(R) (2018).
- [2] T. Oguchi *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **21**, 092001 (2009).
- [3] K. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 096805 (2009).
- [4] K. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 156801 (2009).
- [5] K. Nakajin et al., Phys. Rev. B 91, 245428 (2015).
- [6] K. Yaji et al., Phys. Rev. Lett. 122, 126403 (2019).
- [7] S. Hayashi et al., Appl. Phys. Exp. 11, 015202 (2018).
- [8] K. Yaji et al., Rev. Sci. Instrum. 87, 053111 (2016).

# 日本中性子科学会ポスター賞を受賞して

### 中性子科学研究施設 益田研究室 博士後期課程1年 長谷川 舜介

この度、2018年12月に開催された日本中性子科学会第 18回年会にて「マルチフェロイクスにおける磁気モーメ ントの特異な電場・温度依存性」という題目で講演を行い、 ポスター賞を受賞する栄誉に恵まれました。中性子科学会 年会は中性子を用いた研究者を中心とした研究会で、100 件以上のポスター発表があり、その中から4件にポスター 賞が贈られました。以下、研究内容について簡単にご紹介 します。

マルチフェロイクスとは(反)強磁性と(反)強誘電が共存 するような物質群を指します。このマルチフェロイクスで は電気磁気効果と呼ばれる、電場(磁場)印加による磁性 (誘電性)の変化が強く表れます。そのため、非共役な物理 量の交差相関を研究する良い舞台となっています。

本研究の対象物質である Ba2MnGe2O7は T=4K でスピンが ab 面内を向いたコリニア反強磁性秩序を示します[1]。 我々は当該物質の磁気励起が軌道と強く混成し、磁気異方 性が非自明な温度依存性を示すことを明らかにしました。 また磁気秩序と同時に、各 Mn サイトに c 軸方向の電気分 極が生じ、反強誘電秩序が発現します。それぞれの秩序状 態は非共役な外場によって制御されることがバルク物性実 験研究により報告されました[2]。そこで我々は、電場下 中性子回折実験により、電場による磁気秩序の変化とその 温度依存性を調べました。

実験で得られた中性子回折強度は印加電場に応じて変化 することがわかりました。詳細な解析により、スピンはコ リニアな反強磁性秩序を維持したまま、その向きだけを回 転させていることがわかりました。3.3K より低温では、 電場の増大に伴いスピンの回転角も単調に増大し、最大回 転角は 2.9K において 21 度となりました。コリニアな磁 気 秩序における電場による局所的スピン制御は Ba2CoGe2O7に続いて二例目ですが、その最大回転角を 6 度から 3.5 倍も大きくすることに成功しました。3.3K 以 上では、スピンの向きが電場によって変化しない領域の存 在が確認されました。この領域では磁気異方性が電場に よって増大し、スピンの向きの変化を妨げている可能性が 考えられます。 本講演を行うにあたり、益田隆嗣先生、浅井晋一郎博士、 林田翔平博士、Romain Sibille 博士をはじめ、多くの方々 にお世話になりました。この場を借りて深く感謝申し上げ ます。

T. Masuda *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 100402 (2010).
 H. Murakawa *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 174106 (2012).
 M. Soda *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 094418 (2016).

余談ですが、益田研 HP にてブログをはじめました。 https://masuda.issp.u-tokyo.ac.jp/lab-diary.html



写真 授賞式の様子

# 第13回日本物理学会若手奨励賞(領域5)を受賞して

玉谷 知裕

この度日本物理学会において、第 13 回日本物理学会若 手奨励賞(領域 5)を受賞致しました。受賞対象になった研 究は、主に、私が京都大学理学研究科光物性研究室にポス ドクとして着任していた時期に行われたものです。まず初 めに本研究の遂行にあたり、田中耕一郎教授をはじめとす る共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。

本受賞の対象となった研究は「固体における高次高調波 発生機構の解明」でした。高次高調波発生とは、気体や固 体といった物質に強い光が当たると、入射した光の整数倍 の周波数を持った光が放射されるという現象です。本現象 は物質が一種の周波数変換装置として機能することを示し ており、実際この特性を利用することで高周波帯域の光源 開発が行われてきました。現在までこれらの研究は主に原 子気体を対象にして行われてきましたが、近年、半導体を 初めとする固体においても可能になってきたというのが本 研究の背景になります。原子における高次高調波の発生機 構はトンネルイオン化(図1(a))を基礎とした3ステップ模 型と呼ばれる簡単な模型によって理解されています。しか しながらこの3ステップ模型は原子1つを対象とした模型 であり、多数の原子から構成されている固体でそのまま用 いることはできません。そのため固体を用いた高次高調波 の発生機構を如何なるものかということが現在盛んに論じ られている状況です。

固体物理学では原子の集合的な性質はブロッホの定理と 呼ばれる考え方に基づいて処理されます。この定理は簡単 に言えば、固体中のある原子で起こっている出来事は隣の 原子でも同様に起こっているはずだ、と主張するものです。 この考え方を用いることで固体は「バンド構造」と呼ばれ る概念に基づいて理解でき、その結果金属や絶縁体、半導 体といった分類が可能になります。我々はこの定理を再考 して、光と物質の相互作用を取り入れてからブロッホの定 理を適用するという新しい方式の理論を構築しました。本 理論に基づけばこのとき定義されるバンド構造は時間と共 に変化することになります。この「時間と共に変化するバ ンド構造」の概念を用いることによって、固体における高 次高調波の発生機構はバンドギャップエネルギーと外場強 度の比によって決定できるということを示しました。そし て近年の実験で観測されている高次高調波の性質は、ゼ ナー効果(図1(b))を基礎とした3ステップ模型で記述でき るということも示しました[1]。

更にこの理論に基づけば、より高強度の外場によって発 生する高次高調波は原子分子気体でも観測されていない新 しい特性を示すことになります。特にこの新しい性質は、 固体から発生する高次高調波の楕円率依存性に現れるであ ろうことを予言しました。具体的には外場強度がバンド ギャップエネルギーに比べ小さい領域では、高調波の楕円



図 1(a): 原子におけるトンネルイオン化の模式図。(b): 半導体におけるゼナー効果の模式図。双方の図より現象論的類似性が確認できる。

率依存特性は原子分子気体と同様の傾向を示すことになり ます。ところがより高強度の領域では、これらの性質が一 変することになります。そしてこの特性は、狭ギャップ半 導体やゼロギャップ半導体であるグラフェンを用いた高次 高調波の実験で検証可能であることを予言しました[2]。

以上の考えを基礎にグラフェンを用いた高次高調波の実 験を行った結果、上記の予言通り高次高調波が原子気体の 示す性質とは大きく異なることを確認しました[3]。さら に比較のため同じ光源を用いて有限のバンドギャップエネ ルギーを持つ半導体で高次高調波の実験を行ったところ、 原子気体と同様の性質を示すことを確認しました。このよ うに固体における高次高調波の発生機構が、バンドギャッ プエネルギーと外場強度の大きさの比で決定できることを 示したのが今回受賞対象となった一連の研究成果となりま す[4]。

以上の成果は私一人の力では到底なし得ることができな いものでした。特に私の理論提案を面白がって下さり、多 忙な中実験して頂いた田中教授を初めとする光物性研究室 の皆様には心より感謝申し上げます。本研究はまだまだ発 展途上であり、物質科学への拡張はもちろん、基礎的な側 面においても3ステップ模型では説明できない様々な物理 が内包されていると考えています。今後共、自身にも他人 にも面白いと思って頂けるような研究を心がけ、日々楽し く精一杯研究活動に打ち込む所存です。

#### 参照文献

- T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, and K. Tanaka, Phys. Rev. Lett, **116**, 016601 (2016).
- [2] T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, and K. Tanaka, Phys. Rev. B 94, 241107(R) (2016).
- [3] N. Yoshikawa, T. Tamaya, and K. Tanaka, Science 356, 736 (2017).
- [4] 玉谷知裕,「固体における高次高調波の発生機構」,日本 物理学会 vol **73**, No. 9, pp. 658-63 (2018).

# 第24回日本物理学会論文賞を受賞して

### 理学系研究科物理学専攻(元物性研・瀧川研特任研究員) 北川 健太郎

2019年3月の日本物理学会第74回年次大会におきまし て、片山尚幸氏(元物性研・大串研特任研究員、現名古屋 大工学研究科准教授)、大串研也氏(元物性研特任准教授、 現東北大理学研究科教授)、吉田誠氏(元物性研・瀧川研助 教、現マックスプランク固体物理学研究所研究員)、瀧川 仁教授と連名で、日本物理学会の第24回(2019年)論文賞 を受賞しました。この賞は日本物理学会が刊行する英文学 術雑誌に発表された論文の中から、「独創的な論文によ り物理学に重要な貢献をした功績を称えるために(中略) 贈る。」とのことで、Journal of the Physical Society of Japan 誌に 2008 年 11 月掲載された論文、"Commensurate Itinerant Antiferromagnetism in BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>: <sup>75</sup>As-NMR Studies on a Self-Flux Grown Single Crystal", JPSJ 77, 114709 が評価されたものです。本研究を私が代表して本 稿で紹介させて頂きますが、共著者の皆様に感謝致します。 それとともに、この研究が物性研究所内での素晴らしい共 同研究により実現した研究であることを強調させていただ きます。

10年以上前ですので、経緯からご説明致します。2008 年は、鉄ヒ素系化合物で高温超伝導と呼べる現象が発見 されたエポックメイキングな年ですが、2月に LaFeAsO 1-xFx(Tc=26 K)が東工大細野グループより報告されてから すぐに、5月には、122系と呼ばれる BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の Ba の一 部を K に置き換えてホールドーピングした物質において も38Kの超伝導が報告されています。最初の系は1111系 と呼ばれていますが、伝導(と超伝導性)を担う FeAs 層と LaO1-xFx 電荷供給層に別れている 4~5 元系です。単結晶 が極めて作成しにくいという問題があり、単結晶を用いた 物性研究は 3~4 元系でかつ一致溶融の 122 系でスタート しました。余談ですが、単結晶研究はその後発見された 111 系の LiFeAs(Tc=17 K)や、11 系の FeSe (Tc=8 K)で より盛んになりました。実はこれらは半世紀以上前から既 知の物質ですので、誰かが測る気になっていたとすれば 10 分程度の実験でマイスナーシグナルが観測されたはず で、鉄化合物では超伝導がないはず、という先入観を打ち

<sup>1</sup> 私事ですが、これを扱った論文は私が瀧川研に PD を志望した きっかけにもなっています。 破った一連の研究はやはり偉大だと言うべきです。

本研究は、この122系の自己フラックス法純良単結晶を 用いた最初期の研究として、代表的な母物質 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の 基礎物性を核磁気共鳴法(NMR)で調べたものです。122 系のノンドープの母物質は斜方晶から単斜晶への構造一次 相転移とストライプ型と呼ばれる反強磁性を同じ温度で起 こすのですが、この相転移について単結晶 NMR で磁性と 構造相転移の両方についてスペクトル解析を緻密に行い データ解析法を示した点が、特に評価されたものと思って います。他方では、常磁性状態での反強磁性ゆらぎの緩和 時間に対する影響も議論しており、鉄系超伝導におけるス トライプ型反強磁性ゆらぎの重要性も示唆しました。

意外性についてもう少し説明致します。NMR 測定は ローカルな測定ですので長距離であろうと短距離であろう と磁性を見逃すことが本来はないのですが、例外として、 磁性元素間のブリッジサイトで NMR を行った場合は両隣 からの磁性がキャンセルしてしまいます。このことは昔、 銅酸化物超伝導での17O-NMR 測定で問題になったことが あり、NMR業界では鬼門のようなものです<sup>1</sup>。翻って鉄系 超伝導体では、反強磁性だと Fe-As-Feのブリッジサイト である As サイトには内部磁場が殆ど生じないはず、とい うことが期待されてしまいます。実際には 4Fe-As のピラ ミッドを組んでおり直線状では無いためにキャンセルしな いのですが2、このことを複数の磁場方向から測定を行い、 ストライプ型反強磁性の場合には辻褄が合うということを 対称性からの議論と数式で示すということを行いました。 そして、従来の先入観を崩したという意義が評価されたも のだと思います。

もう一点、10 年強前の本研究が評価された理由としま しては、先に触れた構造相転移と反強磁性転移の関係を泥 臭く調べた、という点もあります。<sup>75</sup>As の単結晶 NMR(*I*=3/2)では、中心線を用いた磁性転移の観察と同時 に電気四重極分裂を用いた構造相転移の観察が *in-situ* に 可能です。122 系は自己フラックス合成でないと中々良い 試料が出来ないのですが、本研究では純良単結晶を用いて

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ただし、主要な超微細相互作用である、フェルミ接触相互作用 は等方的な為やはりキャンセルします。

高い精度で同時に両転移が起きていることを示しました。 この構造相転移は近年、電子ネマティック不安定性として 話題になっているのですが、その際、面内歪やドープなど でエンハンスされて観測されます。本研究は<sup>75</sup>As-NMR を用いた電子ネマティック研究の対照リファレンスとして も引用されて、現時点までに200弱と少なくない引用数を 頂いております。

ところで、物理学会の受賞理由では、「多くの研究者が 超伝導状態の解明に注力し激しい競争を繰り広げていた。 それに対して著者らは、そこから一歩引いて母物質の磁性 に焦点を当て、鉄系超伝導体の物性研究の基礎を築いた点 で…」とユニークな紹介をされており若干気恥ずかしい です。鉄系超伝導の研究全体を富士山に例えると、裾野の 一部として評価されたということですが、「基礎を築いた」 ということで今回栄えある賞を頂きました。著者全員を代 表して物性研究所の皆様に深く御礼申しあげます。



(2019年3月16日、九州大学伊都キャンパス椎木講堂にて)

# 第13回日本物理学会若手奨励賞を受賞して

### 量子物質 酒井 明人

この度、第74回日本物理学会年次大会において第13回 日本物理学会若手奨励賞(領域8)を受賞する栄誉に恵まれ ました。推薦して下さった中辻先生および対象研究の共同 研究者の方々に厚く御礼申し上げます。以下に対象研究の 背景や研究内容を簡単に紹介させて頂きます。

電子相関の強い系の物理を理解する上で重要な概念の一 つに「量子臨界現象」があります。通常、相転移は温度を 変化させることで生じますが、磁場や圧力などを変化させ ることでも基底状態を変化(量子相転移)できます。特に磁 気秩序を抑制して生じる磁気量子臨界点近傍では、スピン の量子ゆらぎによる非フェルミ液体や重い電子超伝導と いった様々な異常物性(量子臨界現象)が発見されてきまし た。この磁気量子臨界点は伝導電子が局在スピンを遮蔽す る近藤効果と局在スピン間に働く RKKY 相互作用の拮抗 によって生じると理解されているます。これまでの私自身 の研究では、磁気量子臨界現象の枠組みを越えた新しい物 性の探索を行ってきました。特にその中で受賞対象となり ました3つのトピック(1)多極子系の量子臨界現象[1]、 (2) フラストレート磁性金属における量子臨界現象[2]、 (3) ワイル磁性体の量子臨界現象[3]について紹介致しま す。

#### (1) 多極子系の量子臨界現象

f 電子における軌道自由度は(電気)四極子として知られ、 古くから研究が行われてきました。その中でも「四極子近 藤効果」は通常のスピンの場合とは異なり非フェルミ液体 が理論的に期待されていましたが[4]、実験的な確証は得 られていませんでした。我々は  $\Pr Tr_2Al_{20}$  (Tr = Ti, V)の単 結晶合成を初めて行い、低温物性測定から *cf* 混成の強い 四極子系であることを見出しました[5]。さらに希釈冷凍 温度での実験から、 $\Pr Ti_2Al_{20}$  が強四極子秩序相内で超伝 導を示すことも発見しました[1]。これらの発見を契機に、  $\Pr Ti_2Al_{20}$ の高圧下で超伝導転移温度が 1K の重い電子超伝 導転が発見されるなど[6]、その後の研究の発展に大きな 寄与を果たしました。

(2) フラストレート磁性金属における量子臨界現象 近藤格子に幾何学的フラストレーションを導入すると、 スピン液体との競合による新しい量子臨界現象が理論的に 期待されています[7]。しかし多くのスピン液体候補物質 は絶縁体であり、実験が進んでいないという困難がありま した。CePdAl は金属でありながら幾何学的フラストレー ションによる部分反強磁性秩序を示す物質として知られて います[8]。我々はNi置換系CePd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>Alの極低温比熱・ 磁気熱量効果の詳細な測定により、 $x_e \sim 0.15$  で磁気秩序が 抑制され量子臨界点になることを明らかにしました[2]。 2次元的な量子臨界性が見えていることや、臨界点を超え ても磁気熱量効果のブロードな異常が現れていることなど、 フラストレートした Ce スピンの影響が表れた新しい量子 臨界点です。

#### (3) ワイル磁性体の量子臨界現象

近年トポロジーが物性に重要な役割を果たす物質群に注 目が集まっております。中でもワイル磁性体はフェルミ面 近傍のワイル点(時間反転対称性の破れたディラックコー ン)間の巨大なベリー曲率による巨大応答が期待され、実 際カイラル反強磁性体 Mn<sub>3</sub>X (X = Sn, Ge)などで異常ホー ル効果や異常ネルンスト効果が発見され大変注目を集めて います[9-11]。我々は Co2MnGa の電気・熱輸送特性を詳 細に測定することにより、巨大異常ネルンスト効果を室温 で示すワイル磁性体であることを発見しました[3]。さら に理論家とも協力してこの増大が Type-I から Type-II へ のワイル点の量子相転移によるものだと明らかにしました。 この発見は強相関・トポロジカル磁性分野で学術的に大変 価値があるのみならず、熱電応用やスピントロニクス分野 への波及効果もあると考えられます。

本研究は東京大学物性研究所の中辻知教授、冨田崇弘氏、 辻本真規氏、石井梨恵子氏、浜根大輔氏、アウグスブルク 大学の P. Gegenwart 教授、V. Fritsch 氏、バンドゥン工 科大学の A. A. Nugroho 教授、R. Sihombing 氏、大阪大 学の水田耀ピエール氏、理化学研究所の有田亮太郎氏、是 常隆氏、鈴木通人氏、竹森那由多氏、久我健太郎氏、メ リーランド大学の P. Goswami 氏、マックルプランク研究 室の松本洋介氏、O. Stockert 氏、S. Lucas 氏、カールス ルーエ工科大学の H. v. Löhneysen 教授、との共同研究に より得られました。また、東大物性研究中辻研究室の皆様、 アウグスブルク大学 Gegenwart 研究室の皆様には日頃か ら有益なご討論ご助言をいただきました。本研究の一部は 科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 チーム 型研究(CREST)「微小エネルギーを利用した革新的な環 境発電技術の創出」研究領域における研究課題「トポロジ カルな電子構造を利用した革新的エネルギーハーヴェス ティングの基盤技術創製」、文部科学省科学研究費補助金 新学術領域「J-Physics:多極子伝導系の物理」における 研究計画班「A01:局在多極子と伝導電子の相関効果」の 一環として行われました。また、日本学術振興会(JSPS) には特別研究員制度でご支援いただきました。関係者各位 に深く御礼申し上げます。

- A. Sakai, K. Kuga, and S. Nakatsuji, J. Phys. Soc. Jpn., 81, 083702 (2012).
- [2] A. Sakai, S. Lucas, P. Gegenwart, O. Stockert, H. v. Löhneysen, and V. Fritsch, Phys. Rev. B 94, 220405(R), (2016).
- [3] A. Sakai, et al., Nature Physics, 14, 1119–1124 (2018).
- [4] D. L. Cox, Phys. Rev. Lett., 59, 1240 (1987).
- [5] A. Sakai and S. Nakatsuji, J. Phys. Soc. Jpn., 80, 063701 (2011).
- [6] K. Matsubayashi, T. Tanaka, A. Sakai, S. Nakatsuji,
  Y. Kubo, and Y. Uwatoko, Phys. Rev. Lett., 109, 187004 (2012).
- [7] Q. Si, Physica B 378–380, 23 (2006).
- [8] A. Dönni, G. Ehlers, H. Maletta, P. Fischer, H. Kitazawa, and M. Zolliker, J. Phys.: Condens. Matter 8, 11213 (1996).
- [9] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, T. Higo, Nature 527, 212-215 (2015).
- [10] K. Kuroda, T. Tomita et al., Nature materials 16, 1090-1095 (2017).
- [11] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani and S. Nakatsuji, Nature Physics 13, 1085-1090 (2017).



# 外国人客員所員を経験して

### Natalia DRICHKO Johns Hopkins University

My scientific interest in physics of strongly correlated electronic systems of both organic and inorganic chemical origin results in a large overlap with a number of groups in ISSP. I know one of my hosts, Prof. Mori, since the time of my PhD, and even before coming to ISSP enjoyed great discussions on physics of organic conductors and Mott insulators with her when we met at conferences. The last year in my lab in the Johns Hopkins University we started to work on using Raman spectroscopy to get a deeper understanding of the spinliquid candidate Cat-H<sub>3</sub>(EDT-TTF)<sub>2</sub> synthesized in Prof. Mori's lab. More recently I have developed an active collaboration with Prof. Nakatsuji, when he was visiting the Johns Hopkins University. In my group in JHU we did studies of materials discovered in his group, such as proving dynamic Jahn-Teller distortion for Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>. During the 6 months of my stay in ISSP we had many experimental works done in the groups of both of my hosts, Prof. Mori and Prof. Nakatsuji. In addition I have started many new collaborative projects with other groups in the University of Tokyo.

One of the main aims of my stay in ISSP was to understand magnetic properties of molecular-based quantum dipole liquid ĸ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Hg(SCN)<sub>2</sub>Br and other molecular materials with a close structure and chemical composition. We performed measurements of magnetic properties in collaboration with Prof. Mori and Prof. Yamashita, and Prof. Uji's group at NIMS. In this half a year we made a lot of progress, discovering a possible spin liquid state in another molecular-based Mott insulator κ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Hg(SCN)<sub>2</sub>Cl. We determined an unexpected ferromagnetic response in the quantum dipole liquid, which we now work on understanding.

Collaboration with Prof. Nakatsuji during my visit resulted in our thorough understanding a spin ferronematic state in NiGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>. Also, we started new work on Mn<sub>3</sub>Sn synthesized and studied in Prof. Nakatsuji's group. We found a possible way to do an easy characterization of quality of the samples using Raman scattering spectroscopy system at the optical lab in ISSP. This is also a preparatory work for Raman studies of this material we will carry on in my lab in JHU.

As a whole, these 6 months were very productive. I enjoyed the atmosphere in ISSP, which provided many interesting seminars, and discussions with my hosts and members of their groups. It was great to be a part of ISSP community and to enjoy New Year Celebrations. I would like to thank both of my hosts, as well as many other members of ISSP, with whom I was working during this half a year.

# 物性研究所談話会

標題:ポルフィリンの磁気的性質を利用した光物性と光機能~磁気キラル二色性とビタミン C 検出用蛍光プローブを 中心に~

日時:2019年7月24日(水) 午後1時30分~

場所:物性研究所本館6階 大講義室(A632)

講師:石井 和之

所属:東京大学生産技術研究所

#### 要旨:

新規電子構造の発見と解明は、新領域の開拓につながるだけでなく、新しい機能を開発する上で重要である。我々は、 光合成のクロロフィルやヘモグロビンのヘムの基本骨格であるポルフィリンや、青色・緑色の染料・顔料、コピー機の電 荷発生剤などとして利用されているフタロシアニンを対象とし、錯体化学・超分子化学を光化学・分子磁性と融合するこ とで、新規分野の開拓、新機能創出を目指した以下の研究を展開している。

#### ① 磁気キラル二色性 [1,2]

磁気キラル二色性(光学活性分子の光吸収が磁場の方向によって変化する現象)は、磁場中の光化学反応により片方の鏡 像異性体の過剰を生み出すことができるため、生命のホモキラリティー起源の候補、光不斉合成法等として注目されてい る。我々は、大きなp電子軌道角運動量を有するポルフィリン分子同士が捻れた配置となるキラルJ会合体を用いること で、有機化合物における磁気キラル二色性を観測することに初めて成功した。さらに、光合成で光を捕集するクロロゾー ムのモデル化合物においても磁気キラル二色性観測に成功し、光合成における新規磁場効果の可能性を示した。

#### ② ビタミンC検出用蛍光プローブ [3-6]

必須栄養素の一つであるビタミン C(アスコルビン酸)は、近年、副作用の無い抗がん剤としても注目されている。我々は、 光励起三重項色素と二重項ラジカルから構成される光励起多重項状態を発見・解明してきたが、このスピン科学を蛍光プロー ブ開発に活用し、がん細胞内、及びマウス内におけるビタミン C を蛍光バイオイメージングすることに初めて成功した。

談話会では、上記研究に加え、我々が開発した放射性セシウム除染布や新学術領域「ソフトクリスタル」に関する研究 成果も含めて、幅広く紹介する。

#### [参考文献]

(1) Y. Kitagawa, H. Segawa, K. Ishii, Angew. Chem. Int. Ed., 50, 9133 (2011).

- (2) Kitagawa, T. Miyatake, K. Ishii, Chem. Commun., 48, 5091 (2012).
- (3) Ishii, J. Fujisawa, Y. Ohba, S. Yamauchi, J. Am. Chem. Soc., 118, 13079 (1996).
- (4) Ishii, J. Fujisawa, A. Adachi, S. Yamauchi, N. Kobayashi, J. Am. Chem. Soc., 120, 3152 (1998).
- (5) Ishii, K. Kubo, T. Sakurada, K. Komori, Y. Sakai, Chem. Commun., 47, 4932 (2011).
- (6) Yokoi, T. Otani, K. Ishii, Sci. Rep., 8, 1560 (2018).

#### 【講師紹介】

石井和之先生は、錯体化学を基軸として様々な有機・無機複合体を光科学・スピン科学の観点から探求されています。 物性研における量子物性、生体・分子機能、光科学、またそれらの融合研究との関連性も深く、大変興味深いお話しが伺 えると思います。

# 物性研究所セミナー

標題:理論セミナー:Geometry and Topology in two-dimensional Chiral Liquids 日時:2019年4月1日(月) 午後4時~午後5時 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615) 講師:Prof. Hans Hansson 所属:Stockholm University 要旨:

I will explain in simple terms what are two-dimensional chiral liquids, and why they are interesting objects to study. I quickly specialize to Quantum Hall liquids and topological superconductors and explain the concept of orbital spin and how it can be related to observable quantities.

I will then introduce "Majorinos" or "half fermions" that are signatures of odd pairing topological phases, and discuss a couple of amusing thought experiments where geometrical effects play an important role.

The talk is aimed at a general theoretical physics audience.

# 標題:ナノサイエンスセミナー:機能物性セミナー:Controlled organic functionalization of silicon surfaces 日時:2019年4月15日(月) 午後4時~午後5時 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615) 講師:Prof. Michael Dürr 所属:Institute of Applied Physics, Justus Liebig University Giessen, Germany 要旨:

The adsorption of organic molecules on silicon has been the subject of intense research due to the potential applications of organic functionalization of silicon surfaces in semiconductor technology. The high reactivity of the silicon dangling bonds towards almost all organic functional groups, however, presents a major hindrance for the first basic reaction step of such a functionalization, i.e., chemoselective attachment of bifunctional organic molecules on the pristine silicon surface. Due to this high reactivity, the final adsorption products typically consist of a mixture of molecules adsorbed via different functional groups. For the preparation of well-ordered organic layers on silicon, it is thus important to learn how to control the reactions of the single functional groups.

Using various spectroscopic techniques, such as XPS, UPS, and nonlinear optics, in combination with scanning tunneling microscopy and molecular beam techniques, we investigated in detail the reaction mechanisms, kinetics, and dynamics of different functional groups on Si(001). Our main strategy for the controlled organic functionalization of Si(001) is then based on functionalized cyclooctynes: cyclooctyne's strained triple bond is associated with a direct adsorption channel on the Si(001) surface, in contrast to almost all other organic molecules, which adsorb via weakly bound intermediates [1,2]. As a consequence, cyclooctyne derivatives with different functional side groups react on Si(001) selectively via the strained cyclooctyne triple bond while leaving the side groups intact. This second functional group is then used for the covalent attachment of further organic reagents on the road to well-defined molecular architectures on Si(001).

Electronic excitation [3] and hyperthermal energy distributions of the incoming molecules [4] are investigated as further means of control.

- [1] M. Reutzel, et al., J. Phys. Chem. C 120, 26284 (2016).
- [2] C. Länger, et al., J. Phys.: Condens. Matter 31, 034001 (2019).
- [3] G. Mette, et al., Angew. Chemie Int. Ed. 58, 3417 (2019).
- [4] T. Lipponer, et al., Surf. Sci. 651, 118 (2016).

標題:理論セミナー:Active dynamics of chromosome kicked by enzymatic force-dipoles 日時:2019年4月23日(火) 午後4時~午後5時 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615) 講師:坂上 貴洋 所属:青山学院大学 要旨:

Inspired by recent experiments on chromosomal dynamics, we introduce an exactly solvable model for the interaction between a flexible polymer and a set of motor-like enzymes. The enzymes can bind and unbind to specific sites of the polymer and produce a dipolar force on two neighboring monomers when bound. We study the resulting nonequilibrium dynamics of the polymer and find that the motion of the monomers has several properties that were observed experimentally for chromosomal loci: a subdiffusive mean-square displacement and the appearance of regions of correlated motion. We also determine the velocity autocorrelation of the monomers and find that the underlying stochastic process is not fractional Brownian motion.

#### Reference:

S. Put, T. Sakaue, and C. Vanderzande, Phys. Rev. E 99, 032421 (2019).

標題:量子物質セミナー:フォノン磁気カイラル効果 日時:2019年5月10日(金) 午後1時~午後2時30分 場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615) 講師:野村 肇宏 所属:物性研究所・国際超強磁場科学研究施設

### 要旨:

物質における非相反物性は、ダイオードやサーキュレーターといった機能性に結びついていることから、近年益々の注 目を集めている。磁気カイラル効果は、カイラルな物質に磁場を印加した際に、磁場に並行と反平行で異なる輸送特性を 示す現象である。この非相反物性は輸送粒子(準粒子)の偏光状態に依存しないことから、全ての輸送現象で期待される。 これまでにフォトン、エレクトロン、マグノンで報告例があったのに対し、フォノン、すなわち格子物性では観測例が無 かった。我々はカイラルフェリ磁性体 Cu2OSeO3 に着目し、超音波音速測定からフォノンの磁気カイラル効果を実証す ることに成功した[1]。本セミナーではこれまでの研究を振り返るとともに、今後の展開について考察する。

#### [1] T. Nomura et al., PRL 122, 145901 (2019).

標題:理論セミナー: Cross correlations and anomalous magnetic- field effects in F3 quadrupole systems 日時: 2019 年 5 月 17 日(金) 午後 4 時~午後 5 時

- 場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)
- 講師:Kazumasa HATTORI
- 所属: Tokyo Metropolitan University

#### 要旨:

Orbital orders in correlated electron systems have attracted great attention in condensed matter. Recently, Pr-based materials (PrT2X20; T=Ti, V, etc., X=Al, etc.) have intensively studied, since they show orbital orders, non-Fermi liquids, and superconductivity. Their low-energy physics is attributed to the Γ3 non-Kramers crystalline-electric-field ground state doublet well separated from the excited states and have E quadrupole and A2 octuple moments in Td symmetry.

In this talk, we discuss two topics related to quadrupole orders. The first is magneto-electric (current) effects under antiferromagnetic quadrupole (AFQ) orders in a diamond structure [1]. Since the Pr ions form the diamond structure in the Pr-based materials, when AFQ takes place, the inversion symmetry is broken, which leads to finite magnetic response when electric field is applied and vice versa. This can be useful for identifying the order parameters, since the response strongly depends on the order parameters. In addition, we briefly discuss the way to generate (Kramers) Weyl points under the AFQs. The second is about unusual FQ order under magnetic fields in PrTi2Al20 [2]. Usually, when magnetic field is applied in z direction, 3z2-r2 type FQ domain is stabilized. However, this is not the case in this material [2]. We point out that magnetic-field induced quadrupole-quadrupole interactions are important for explaining the observed unusual FQ state in this compound and this situation is clear contrast to that in magnetic systems.

#### **References:**

[1] T. Ishitobi and KH, arXiv: 1903. 01103.

[2] T. Taniguchi et al., arXiv: 1903. 10215.

標題:極限コヒーレント光科学セミナー:赤外極短パルスが駆動する強相関電子系の光誘起相転移と光強電場効果 日時:2019年5月20日(月) 午前10時30分~午後0時

場所:物性研究所本館6階 第一会議室(A636)

#### 講師:川上 洋平

#### 所属:東北大学大学院理学研究科 物理学専攻

#### 要旨:

電子間のクーロン反発や交換相互作用、電子-格子相互作用などによって、超伝導や強磁性、強誘電性などのエキゾ チックな電子状態が現れるのが強相関電子系の特徴である。これらの多彩な電子状態を、光パルスを用いて超高速に制御 することが、光科学の目標のひとつである。我々のグループではこれまでに、有機伝導体(電荷秩序絶縁体 1)、ダイマー モット絶縁体 2))や遷移金属酸化物(モットハバード絶縁体)における光誘起絶縁体-金属転移を報告してきた。電子の移 動積分 t やクーロン相互作用 U、V、格子振動の振動周期に匹敵する時間幅の極短パルスを用いた実験によって、光照射 によって引き起こされる超高速な電子状態の変化や格子変位を、時間軸上で直接追跡することができる。さらに最近は、 瞬時電場強度が 10 MV/cm におよぶ単一サイクル赤外パルスを用いた実験から、光の高周波・瞬時強電場が駆動する新奇 な現象として、有機金属における電荷局在 3)や有機超伝導体における非線形電荷振動 4)を捉えている。我々がこれま でに報告してきた、光誘起相転移の超高速ダイナミクスと光強電場効果について議論したい。

#### Reference:

S. Iwai, Y. Kawakami et al., Phys. Rev. Lett. 98, 097402 (2007), S. Iwai, Y. Kawakami et al., Phys. Rev. B 77, 125131 (2008), Y. Kawakami et al., Phys. Rev. Lett. 105, 246402 (2010).

2) Y. Kawakami et al., Phys. Rev. Lett. 103, 066403 (2009).

T. Ishikawa, Y. Kawakami et al., Nature Commun. 5, 5528 (2014), Y. Naitoh, Y. Kawakami et al., Phys. Rev. B 93, 165126 (2016), Y. Kawakami et al., Phys. Rev. B 95, 201105(R) (2017), Y. Kawakami et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 51, 174005 (2018).

4) Y. Kawakami et al., Nature Photon. 12, 474 (2018).

標題:機能物性セミナー:水素移動が寄与する物性および反応の理論的解析:プロトン伝導とメタン水酸化反応

日時:2019年5月22日(水) 午後1時~

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:堀 優太

#### 所属:筑波大学 計算科学研究センター

要旨:

水素移動は物性・化学反応の基本要素として多くの化学現象に現れるため、その反応の理解は広範囲にわたる化学現象 の理解につながる。水素移動は高速反応であり、多くの場合、実験による直接観測が困難であることから理論計算による 解析が有用となる。本セミナーでは、水素移動が関わるプロトン伝導やメタン水酸化反応を取り上げ、伝導機構および反 応機構の理解に向けた理論計算による解析について紹介する。プロトン伝導機構の解明に向けて、伝導物質中の分子間の プロトン移動と分子運動について、量子化学計算および分子動力学計算を用いた解析について紹介する。また、量子化学 計算による電子状態の精査と遷移状態探索をもとに、メタン水酸化反応の反応機構の解析について紹介する。

標題:量子物質セミナー:Publishing physics in Science: an editor's perspective

日時: 2019年5月28日(火) 午後2時~

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:Jelena Stajic

所属: American Association for the Advancement of Science (Senior Editor)

要旨:

Scientific publishing is a competitive endeavor, and the best tool we have to select among the many high-quality submissions is peer review. I will talk about the intricacies of peer review at Science magazine and will address the complementary roles of authors, referees and editors in that process. Crucial aspects of successful submissions to Science will be discussed.

標題:ナノサイエンスセミナー: Revealing Majorana bound states properties with electronic transport in three terminal devices

日時:2019年6月3日(月) 午後4時~午後5時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:Thibaut Jonckheere

所属: Centre de Physique Théorique - CNRS - Aix-Marseille University - France

要旨:

Majorana bound states are quasiparticles with exceptional properties, which should appear at the boundaries of onedimensional topological superconductors wires. The clear-cut experimental identification of these Majorana bound states in transport measurements still poses experimental challenges. In this talk, I will show that using three terminal devices out-of-equilibrium, and measuring transport properties like current and noise allow getting original signature demonstrating the Majorana bound states properties. I will first consider a junction where a topological superconductor (TS) wire is connected to two biased normal leads and show that the sign of the current correlations is directed related to the presence of a Majorana bound state. Then I will consider a similar junction made of three TS wires. There I will show that the effective zero-energy Majorana state formed at the junction of the three TS wires is directly responsible for giant shot noise amplitudes, in particular at low voltages and for small contact transparency.

Refs. :

- T. Jonckheere, J. Rech, A. Zazunov, R. Egger, and T. Martin, Phys. Rev. B 95, 054514 (2017).

- T. Jonckheere, J. Rech, A. Zazunov, R. Egger, A. Levy Yeyati, and T. Martin, Phys. Rev. Lett. 122, 097003 (2019).

### 標題:極限コヒーレント光科学セミナー:レーザー光電子分光によるエネルギー・時間・空間的に微細なスケールの電子 構造研究

日時: 2019年6月5日(水) 午前10時~午後0時

場所:物性研究所本館6階大講義室(A632)

講師:岡崎 浩三

所属:東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター

#### 要旨:

角度分解光電子分光(ARPES)は、物質中の電子構造を直接観測できる強力な実験手法であり、電子構造の精密測定から 物性の発現機構を明らかにする事ができる。いわゆる非従来型超伝導体においては、高分解能 ARPES を用いることで クーパー対形成に伴う超伝導ギャップを運動量空間における異方性も含めて観測できる事から、対形成機構の理解に大き な寄与を果たしてきた。講演者もこれまで極低温超高分解能レーザーARPES 装置を用いてそのような報告をしてきてい る[1]。一方、フェルミ面の有無から金属か絶縁体かが判別できるように、超精密 ARPES によって逆に電子構造から物性 を予言する事も可能になる。一般に非平衡状態における物性を知る事は実験的に難しいが、講演者は高次高調波レーザー 時間分解 ARPES を用いることで非平衡状態における電子状態を観測し、そこで発現し得る物性予測なども行っている[2]。

近年、鉄系超伝導体や銅酸化物高温超伝導体における常伝導状態において、電子系が自発的に回転対称性を破る液晶的 な電子状態、「電子ネマティック」状態が実現されることが明らかになってきている。このような電子状態はこれまで知 られていなかった全く新しい状態であり、新しいエネルギー・時間・空間のスケールが現れると期待される。エネル ギー・時間スケールの解明には極低温超高分解能レーザーARPES と高次高調波レーザー時間分解 ARPES が力を発揮す るが、空間スケールの解明には大強度連続波レーザーを用いた光電子顕微鏡(PEEM)が適している。実際、電子ネマ ティック状態において PEEM 像の線二色性を取ることで、その回転対称性の破れを直接捉えることに成功し、これによ り鉄系超伝導体における電子ネマティック状態に特異なドメイン構造が存在することがわかってきた。講演ではより詳細 と今後の展望などについて議論したい。

#### Reference

- [1] K. Okazaki et al., Science 337, 1314 (2012), Y. Ota, K. Okazaki et al., Phys. Rev. Lett. 118, 167002 (2017), T. Hashimoto, K. Okazaki et al., Nat. Commun. 9, 282 (2018)など
- [2] K. Okazaki et al., Phys. Rev. B 97, 121107(R) (2018), K. Okazaki et al., Nat. Commun. 9, 4322 (2018), T. Suzuki, K. Okazaki et al., arXiv:1905.12138 など

標題:理論セミナー:Gapless Kitaev Spin Liquid to Loop and String Gases through Tensor Networks 日時:2019年6月10日(月) 午後4時~

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師: Dr. Hyun-Yong Lee

所属: ISSP, The University of Tokyo

#### 要旨:

Kitaev honeycomb model (KHM) is one of the rare examples of the exactly solvable quantum many-body model [1]. It hosts two distinct phases, the Z2 topologically ordered phase, which is adiabatically connected to the toric code state, and the gapless Kitaev spin liquid (KSL) phase exhibiting the low energy Majorana excitations [1]. In particular, the fact that the KSL phase can be driven into the non-Abelian topological phase by breaking the time-reversal symmetry attracts lots of interests in experimental and theoretical studies. In this talk, we try to understand the KSL from a new perspective, i.e., the loop gas (LG) and string gas (SG) states which are efficiently and compactly defined in the tensor network representation[2].

One can show in a local tensor level that the LG and SG states, which we propose, not only respect the symmetries of KSL but also satisfy the vortex-free condition [2]. Also, those are critical states characterized by Ising CFT and have the Z2 gauge redundancy which allows us to create and move the vortex excitations exactly. Furthermore, accurate variational energy for the KHM is obtained with only two variational parameters [2], which ensures that our ansatze represent quantitatively as well as qualitatively the KSL. We discuss their physical properties, relation to classical statistical mechanics and topological properties in details.

[1] A. Kitaev, Annals of Physics 321(2006) 2-111

[2] H.-Y. Lee, R. Kaneko, T. Okubo and N. Kawashima, arXiv: 1901. 05786

標題:理論セミナー:汎関数くりこみ群に基づいた密度汎関数理論

日時:2019年6月14日(金) 午後4時~午後5時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:横田 猛

#### 所属:高エネルギー加速器研究機構

#### 要旨:

汎関数くりこみ群に基づいた密度汎関数理論(FRG-DFT)は、汎関数くりこみ群のアイデアを用いることで密度汎関数 理論を微視的に定式化する試みである。この手法は、エネルギー密度汎関数の非経験的構築といった密度汎関数理論の長 年の課題に対する新たなアプローチとなることが期待されている。この手法の定式化は 2000 年代前半に提唱されたが、 量子多体系の簡単なトイモデルへの応用はここ数年に始まったばかりである。本講演では、FRG-DFT の基礎、および最 近の発展についてレビューする。特に、我々のグループによって行われた一様連続物質での定式化[1]、一次元フェルミ オン系の基底状態、励起状態の解析[1, 2]、及び2次元一様電子ガスへの応用[3]について紹介する。

[1] T. Yokota, K. Yoshida, and T. Kunihiro, Phys. Rev. C 99, 024302 (2019).

[2] T. Yokota, K. Yoshida, and T. Kunihiro, Prog. Theor. Exp. Phys (2019) 011D01.

[3] T. Yokota and T. Naito, Phys. Rev. B 99, 115106 (2019).

標題:ナノサイエンスセミナー:量子物質セミナー:Topological charge and heat transport in Weyl semimetals 日時:2019 年 6 月 18 日(火) 午後 4 時~午後 5 時 場所:物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室(A615) 講師:Dr. Binghai Yan 所属:Weizmann Institute of Science, Israel 要旨:

Topological Weyl semimetals provide fascinating platforms to examine exotic transport phenomena such as the chiral anomaly and the anomalous Hall effect. In the ordinary (longitudinal) transport, the Wiedemann-Franz law links the ratio of electronic charge and heat conductivity to a fundamental constant. It has been tested in numerous solids, but the extent of its relevance to the anomalous (transverse) transport remains an open question. I will introduce recently-discovered magnetic Weyl materials Mn3Sn and Mn3Ge. Their noncollinear chiral spin structure induces huge anomalous Hall effect and thermal Hall effect in a Kagome-type lattice. In collaboration with experiment, we reveal a finite temperature violation of the Wiedemann-Franz correlation. This violation is caused by the Berry curvature distribution, rather than the inelastic scattering as observed in ordinary metals.

標題:理論インフォーマルセミナー:Shaping Nanostructures Using Molecules 日時:2019年6月21日(金) 午後4時~午後5時 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615) 講師:Dr. Shih-Hsuan HUNG 所属:ISSP, The University of Tokyo 要旨:

Metallic nanoparticles are widely used for technological applications in catalysis, data storage and solar energy. However, the performance of nanoparticles is usually determined by the shape of nanoparticles. Therefore, understanding the morphology and composition of the metallic nanoparticles changed by environment is important. In this presentation, we will discuss the external factors, such as adsorbed molecules and substrate material, on nanoparticle using density functional theory (DFT) calculations. First, we present the morphology changing of L10 ordered FePt epitaxial growth on Mg (1-x)TixO substrates [1]. Second, we demonstrate the investigation on Ti nanoparticles oxidation, strain and oxygen penetration [2]. Next, we investigate the atomic arrangement of TiPt nanoparticles under different oxygen adsorption [3]. Finally, we study the strong metal-support interaction (SMSI) between Au nanoparticles and ZnO substrates and partly explain the enhanced catalytic reaction (CO oxidation) by the ZnO encapsulation. The investigations show computational calculations can be used to model modification of nanoparticles by adsorbed molecules or supports, and study the properties changing, such as morphology, energy barrier, atomic arrangement and catalytic performance. In summary, the study demonstrates the functional characteristics of nanoparticles highly depend on their nanostructures.

- [1] S-H. Hung and K. P. McKenna, Phys. Rev. Materials 1, 024405 (2017).
- [2] S-H. Hung and K. P. McKenna, J. Phys. Chem. C 122, 3107 (2018).
- [3] S. Gholhaki, S-H. Hung, D. J. H. Cant, C. E. Blackmore, A. G. Shard, Q. Guo, P. McKenna and R. E. Palmer, RSC Adv. 8, 27276 (2018).

標題:量子物質セミナー:Unconventional superconductors under uniaxial stress 日時:2019年6月24日(月) 午前10時30分~午後0時 場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615) 講師:Prof. Clifford HICKS 所属:Max Planck Institute for Chemical Physics of Solid 要旨:

By directly driving anisotropic changes in lattice parameter, uniaxial stress is a qualitatively different probe of correlated electron systems from hydrostatic stress. By using piezoelectric actuators to apply thestress, and with careful sample preparation, elastic strains in excess of 1% are routinely achievable. This is sufficient to drive strong qualitative changes in the electronic properties of many compounds. The typical correlated electron material is a highly complicated object, and the ability to place materials on continuous axes over which their properties are strongly tuned can provide much more information on the key processes in a material than study of the single fixed point represented by the unstressed compound alone.

In this seminar, I will discuss the unconventional superconductors Sr2RuO4 and YBa2Cu3O6.67. Through strong uniaxial compression along its c axis, the main Fermi surface of Sr2RuO4 can be driven through two simultaneous topological transitions, changing from an electron-like to a hole-like Fermi surface. Thismirrors the evolution of the cuprate Fermi surface across the superconducting dome, however in a system where interactions are weaker and potentially easier to understand. In-plane uniaxial compression strongly influences both systems: Sr2RuO4 is driven through a strong peak in its superconducting critical temperature, while strong uniaxial stress applied to YBa2Cu3O6.67 induces static 3D charge density wave order, which competes with and strongly suppresses the superconductivity.

標題:理論セミナー:Magnetoelectric effect in band insulator-ferromagnet heterostructures 日時:2019年7月5日(金) 午後4時~午後5時 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615) 講師:岡田 健 所属:東京大学物性研究所 要旨:

Electric generation and control of magnetization have been a central topic in the field of spintronics for decades. The Edelstein effect refers to a current-induced magnetization effect in noncentrosymmetric metals [1] and recently has been harnessed for magnetization control in metal-ferromagnet heterostructures [2]. Towards practical applications, however, Joule heating by a large amount of electric current could become a significant issue. In this talk, we present a theoretical study of an electric field-induced magnetization in band insulators, which is free from Joule heating by definition [3]. We reveal that this magnetoelectric (ME) effect could appear in common situations when band insulators are employed in a heterostructure with a ferromagnet. We calculate the ME tensor on a simple model of a generic two-dimensional band insulator attached to a ferromagnet by the linear-response theory. In this model, the electrons in the band insulator are subject to the Rashba spin-orbit coupling due to the heterointerface as well as the exchange coupling with the magnetic moment in the ferromagnet. We reveal that the ME effect generally appears without specific parameter tunings. Lastly, as a specific example, we estimate the magnitude of the ME effect in the case of a hybrid halide perovskite semiconductor and discuss its characteristics and novelty by comparison with other types of ME effect in metals or multiferroic insulators.

[1] V. M. Edelstein, Solid State Commun. 73, 233 (1990).

[2] I. M. Miron et al., Nat. Mater. 9, 230 (2010).

[3] K. N. Okada, Y. Kato, and Y. Motome, PRB 99, 134442 (2019).

標題:理論インフォーマルセミナー:二成分密度汎関数法による金属表面の陽電子状態の研究

日時:2019年7月8日(月) 午後1時~30分~午後2時30分

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:萩原 聡

#### 所属:量子科学技術研究開発機構 高崎研 (元)

#### 要旨:

陽電子は電子の反粒子であり、電子と同じ質量、電荷(ただし、符号は電子の逆)、スピンをもつ。陽電子が電子と出会 うと、電子-陽電子対消滅を起こし、y線を放出する。この放出y線を調べることで対消滅相手の電子の情報を知ること が可能である。電子-陽電子対消滅を利用した分光法は陽電子消滅法と呼ばれ、材料中の格子欠陥や磁性の検出などに利 用されている[1]。

陽電子は、物質最表面の電子状態や磁性状態を調べる強力なプローブとしても知られている。低速で陽電子を物質中に 入射すると、入射陽電子の一部は熱拡散により物質表面に戻る。表面に再帰した陽電子は次にあげるいくつかの特徴的な 過程を辿ることが知られている:負の仕事関数によって真空へ再度放出する過程、表面電子と結合しポジトロニウム(Ps) を形成し、真空へ再放出する過程、表面ポテンシャルに捕獲され表面状態を形成した後に電子と対消滅する過程など。こ の陽電子に特有な Ps の再放出過程や表面電子との対消滅過程を利用することで、表面における電子状態や磁性状態の研 究が行われている[2]。

一方、表面電子と陽電子の微視的な相互作用の理解はいまだに未解明な部分が多いため、第一原理計算のような現実の 表面電子状態や原子配列を反映した理論研究が必要となる。我々は二成分密度汎関数法[3]を用いた表面における陽電子 状態計算手法の開発を行い、実際の問題に対して応用を行ってきた。セミナー当日は特に、Fe(001)表面における陽電子 状態および再放出 Ps のエネルギースペクトル計算結果などについて紹介する。

[1] F. Tuomisto and I. Makkonen, Rev. Mod. Phys. 85, 1583 (2013).

[2] C. Hugenschmidt, Surf. Sci. Rep. 71, 547 (2016).

[3] M. J. Puska and R. Nieminen, Rev. Mod. Phys. 66, 841 (1994).

標題:理論インフォーマルセミナー: Andreev and Majorana Weyl crossings in multi-terminal Josephson junctions

日時:2019年7月9日(火) 午前11時~午後0時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:Manuel Houzet

所属: INAC/PHELIQS, CEA and Grenoble Alpes University

要旨:

We analyze the Andreev spectrum in a four-terminal Josephson junction between conventional and topological superconductors. We find that a topologically protected crossing in the space of three superconducting phase differences can occur between the two Andreev bound states with lower energy. We discuss the possible detection of this crossing through the nonlocal conductance quantization between two voltage-biased terminals.

物性研だより第 59 巻第 2 号 30

標題:理論インフォーマルセミナー: Embedding the flat bands of Lieb, kagome, and checkerboard lattices into new structures: Tight-binding models to real materials

日時:2019年7月9日(火) 午後4時~午後5時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師: Dr. Chi-Cheng LEE

所属: Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

要旨:

The studies of dispersion-less bands revealed in electronic and photonic systems have caught great attention recently. Many exotic quantum phenomena, for example, the high-transition-temperature superconductivity associated with the infinitely large density of states of the flat bands, are proposed. In this talk, I will begin with an introduction to the flat bands using Wannier functions. Then I will introduce three tight-binding models, namely the Lieb, kagome, and checkerboard lattices, by considering only the nearest-neighbor hopping parameters and demonstrate that the recognized flat bands associated with the three lattices can be ideally embedded into new structures, respectively [1]. Finally, I will provide several examples for the appearance of nearly flat bands realized in two-dimensional materials with long-range hopping beyond the simplified tight-binding models based on our first-principles calculations for the systems composed of Ge atoms.

Our study clearly demonstrates that the flat bands given by the well-known lattices, namely the Lieb, kagome, and checkerboard lattices, can be ideally embedded into the new structures that cannot be recognized as the original ones. Therefore, the amount of materials that can give interesting flat-band physics could be much larger.

[1] Chi-Cheng Lee et al., arXiv:1904.07048 (2019).

標題:理論インフォーマルセミナー: Quasiparticle and optical properties of potential 2D materials

日時:2019年7月10日(水) 午後4時~午後5時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師: Prof. Hung-Chung Hsueh

所属: Department of Physics, Tamkang University, Taiwan

要旨:

Quasi-2D atomically thin materials display a number of unique properties not found in their bulk counterparts, such as large self-energy and excitonic effects due to the quantum confinement and reduced screening with layer number close to the 2D limit. These atomically thin layer structures demonstrate rich physics and pave the way for emerging fields, such as excitonics and valleytronics, with great potential for applications in next-generation devices. To probe the dimensionality effects, we use ab initio GW+BSE methods based on many-body perturbation theory (MBPT) to explain and predict the quasiparticle and optical properties of potential quasi-2D semiconductors: monolayer group VI monochalcogenides (Ge,Sn/S,Se) and transition metal dichalcogenides (MoSe2 and Janus MoSSe). Significant exciton binding energy, layer-controlled bandgap, anisotropic optical response [1], and possible valley polarization [2] serve as a convenient and efficient method for engineering the excited-state properties of quasi-2D systems.

Hung-Chung Hsueh, Jia-Xuan Li, and Ching-Hwa Ho, Adv. Optical Mater. 6, 1701194 (2018).
 Ang-Yu Lu, et.al, Nature Nanotechnology 12, 744 (2017).

標題:理論セミナー:Spin current and noise at an interface between a metal and a ferromagnetic insulator 日時:2019年7月12日(金) 午後4時~午後5時 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615) 講師:加藤 岳生 所属:東京大学 物性研究所

#### 要旨:

It is known that measurement of electrical current noise through a device provides useful information about electron transport. For example, nonequilibrium current noise under a high voltage bias, so-called shot noise, can be used for determining the effective charge of a quasiparticle. As expected from fruitful physics of the current noise, fluctuation of the pure spin current, that is, spin-current noise has a potential to provide important information on spin transport in a spintronics device.

We theoretically investigate the fluctuation of a pure spin current induced by the spin Seebeck effect and spin pumping in a normal-metal–(NM-)-ferromagnetic-insulator(FI) bilayer system. Starting with a simple FI-NM interface model, we derive general expressions of the spin current and the spin-current noise at the interface within second-order perturbation of the exchange coupling at the interface, and estimate them for a yttrium-iron-garnet–platinum interface. We show that the spin-current noise can be used to determine the effective spin carried by a magnon. In addition, we show that it provides information on the effective spin of a magnon, heating at the interface under spin pumping, and spin Hall angle of the NM. We also discuss spin transport at the interface between a FI and a superconductor.

```
標題:極限コヒーレント光科学セミナー:二酸化炭素の分子振動が駆動する固体表面での化学反応
```

日時: 2019年7月30日(火) 午前10時30分~午後0時

場所:物性研究所本館6階 第一会議室(A636)

講師:近藤 剛弘

```
所属:筑波大学 数理物質系 物質工学域、東京工業大学 元素戦略研究センター (兼任)
```

要旨:

これまで、気体分子の振動エネルギーや並進エネルギーが固体表面上での分子の解離反応に影響を及ぼすことは報告さ れてきました。また、気相分子が固体表面上の吸着種と直接衝突する会合反応においては、気体分子の並進エネルギーが 反応性に影響を与える例が示されてきました。しかしながら、気体分子の振動エネルギーが駆動する化学反応は報告例が ありませんでした。

本研究では、気体分子の並進、振動、回転エネルギーを系統的に制御可能な超音速分子線技術を用いることで、銅触媒 表面上での二酸化炭素の水素化反応(CO2 + 1/2 H2 → HCOOa、「a」は吸着種を表します)を調べました。この結果、 反応速度は二酸化炭素の振動エネルギーと共に大きく増加し、表面温度とは無関係であることが示され、分子振動で駆動 する反応であることがわかりました[1]。本セミナーではこれらの実験結果について詳しく紹介します。

 Jiamei Quan, Fahdzi Muttaqien, Takahiro Kondo, Taijun Kozarashi, Tomoyasu Mogi, Takumi Imabayashi, Yuji Hamamoto, Kouji Inagaki, Ikutaro Hamada, Yoshitada Morikawa, Junji Nakamura, ature Chemistry (in press).



#### 【研究部門等】

〇令和元年5月1日付け

(採用)

氏	名	所 属	職	名	備考
永田	崇	機能物性研究グループ	助	教	大阪市立大学大学院理学研究科特任講師より

#### 〇令和元年6月1日付け

(配置換)

氏	名	所 属	職	名	備	考
藤 野	智 子	凝縮系物性研究部門	助	教	東京大学大学院理学系研究科	助教より

### (兼務)

氏	名	所 属	職 名	備考	
中 辻	知	量子物質研究グループ	特任教授	本務:東京大学大学院理学系研究科	教授

### 〇令和元年6月5日付け

(採用)

氏 名	所 属	職 名	備考
CHENG JINGUANG	附属物質設計評価施設	特任教授	中国科学院物理研究所教授より

〇令和元年6月30日付け

(辞 職)

氏	名	所 属	職	名	備考
石 井	順 久	附属極限コヒーレント光科学研究 センター	助	教	量子科学技術研究開発機構・関西光化学研究所 主幹研究員へ

〇令和元年7月1日付け

(採用)

氏 名	所 属	職 名	備	考
Kang Woun	凝縮系物性研究部門	特任教授	梨花女子大学校物理学部	教授より

### 【事務部】

〇令和元年7月1日付け

(昇 任)

	氏	名		所 属	職名		備	考
矢		隆	紀	物性研究所	上席係長 (兼:総務係長)	物性研究所	総務係長より	
村	本	洋	子	物性研究所	上席係長 (兼:予算·決算係長)	物性研究所	予算・決算係長。	より

# 物性研究所研究員(若手)の公募について

このたび、東京大学物性研究所では、下記の要領で若手研究員を公募いたします。

つきましては、関係各位に広くお知らせいただくとともに適任者の推薦および応募について、よろしくお取り計らいく ださるようお願いいたします。

記

- 1. 公募職種:特任研究員
- 2. 公募人員:若干名
- 3. 職務内容:物性科学における実験的または理論的研究
- 4. 応募資格:次の3条件を満たしている者
  - (1)博士号取得後5年程度までの者、ただし着任時までに博士号取得が確実に見込まれる者も含む
  - (2) 着任予定時に主たる職、あるいは大学院生および研究生等の身分を有しないこと
  - (3)希望する物性研究所内研究室の所員(教授または准教授)と密な連絡をとり研究計画等の作成を行うこと。事前 に希望する所員の受け入れ許可がない場合には応募は受け付けない。
- \* なお複数の研究室にまたがる研究テーマに取り組む方も歓迎するが、主たる受け入れ所員は指定すること。
- 5.任期:原則として2年間 その後再応募も可(但し、1年間)
- 勤務態様・手当・給与等:
  - 週5日、裁量労働制(週当たり38時間45分相当)
  - 雇用保険・文部科学省共済組合に加入、通勤手当有

給与は「東京大学年俸制給与の適用に関する規則」に定める第4条、第5条及び第6条による(年額約430万円程度)

- 7. 選考方法:原則として書類選考とし、場合によっては面接を行う
- 8. 提出書類:
- (1)履歴書

(下記 URL より東京大学統一履歴書フォーマットをダウンロードのうえ、作成すること) https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html

- (2) 発表論文リスト
- (3) 主な論文別刷り(3編以内)
- (4) これまでの主な業績のまとめ(2000字以内)
- (5) 受け入れ研究室での期間内での研究計画(2000字以内)
- (6) 指導教員または推薦者による本人に関する意見書
- 9. 公募締切: 2019年9月30日(月)必着
- 10. 採用予定日:2020年4月1日から2020年9月末日までに着任すること
- 11. 書類提出方法:
  - 郵送又はメール送付
    - 郵送「物性研究所研究員(〇〇研究室(連絡をとった所員名を記載\*記載が無い場合には応募不可)」と朱書し、 簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること。
    - メール 件名は「物性研究所研究員(○○研究室応募\*記載が無い場合には応募不可)」とし、総務係までメール を送付すること。総務係から書類送付先フォルダを連絡するので、そちらに応募書類一式を保存すること。
- 12. 書類提出先:

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号

東京大学物性研究所総務係

- 電話 04-7136-3501 e-mail:issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp
- 13. その他:

東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。なお、お送りいただいた応募書類等は 返却いたしませんので、ご了解の上お申込み下さい。また、履歴書は本応募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理 由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

# 東京大学物性研究所教員公募について

下記により准教授の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

記

- 研究部門名及び公募人員数 極限コヒーレント光科学研究センター 准教授1名
- 2. 研究内容

本学が高輝度放射光施設 SPring-8 に整備したビームライン BL07LSU において、現スタッフと協力して共同利用実験の支援および次世代高輝度放射光源に向けた要素技術開発を行う。機能物性・量子物質の各横断型研究グループ等との所内連携や、所外連携を積極的に推進する若手研究者を希望する。特に新分野を積極的に開拓・先導するアイディアとバイタリティを持っていれば、現在の研究分野・手法は問わない。

3. 応募資格

博士修了又は修了見込の方。

4.任 期

満56歳に達する年度の初めに任期制に入り、任期は5年とし再任は1回を限度とする。なお、任期制の詳細については下記問い合せ先までお尋ねください。

5. 公募締切

令和元年10月15日(火)必着

- 6. 着任時期
- 採用決定後なるべく早い時期を希望する。
- 7. 提出書類
  - ○履歴書(略歴で可)
  - ○業績リスト(特に重要な論文に○印をつけること)
- ○主要論文の別刷(5編程度、コピー可)
- ○研究業績の概要(3000字程度)
- ○研究計画書(3000字程度)
- ○推薦書または意見書(作成者から書類提出先に直送すること)
- 8. 書類提出方法 郵送又はメール送付
  - 郵 送:「極限コヒーレント光科学研究センター准教授応募書類在中」、又は「推薦書在中」の旨を朱書し、簡易書留 等配達状況が確認可能な方法で送付すること。
  - メール:件名は「極限コヒーレント光科学研究センター准教授応募」とし、総務係までメールを送付すること。総務 係から書類送付先フォルダを連絡するので、そちらに応募書類一式を保存すること。
- 9. 書類提出先

**〒277-8581** 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号 東京大学物性研究所総務係

電話 04-7136-3207 e-mail:issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

10. 本件に関する問い合わせ先

東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 軌道放射 物性研究施設 教授 原田慈久 e-mail:harada@issp.u-tokyo.ac.jp

11. 選考方法

東京大学物性研究所教授会で審査決定いたします。ただし、適任者のない場合は、決定を保留いたします。

12. その他

東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。お送りいただいた応募書類等は返却いた しませんので、ご了解の上お申込み下さい。また、履歴書は本応募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理由なく第三 者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

.....

令和元年7月9日(火)

東京大学物性研究所長 森 初果

# 東京大学物性研究所教員公募について

下記により特任助教の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

記

- 研究部門名等および公募人員数 極限コヒーレント光科学研究センター(小林研究室) 特任助教1名
- 2. 研究内容

附属極限コヒーレント光科学研究センター小林研究室では、最先端レーザー開発やその応用研究を行っている。本公 募では、レーザー開発、レーザー加工における光と物質に関する物理過程の解明、AIを取り入れた新たな学理フレー ムワークの構築、精密分光等に取り組む研究者を募集する。実験・理論および経験は問わない。広く学内外の大学、国 立研究所や産業界とも連携し、学生の指導にも意欲のある人材が望ましい。

3. 応募資格

修士課程修了、またはこれと同等以上の能力を持つ方。

4.任 期

2025年3月31日まで。任期期間内の更新は年度ごとに行う。 ただし、プロジェクトの進捗状況により最終任期を延長する場合がある。

- 5. 公募締切
  - 2019年10月31日(木)必着
- 6. 着任時期

採用決定後できるだけ早く

7. 提出書類

○推薦書または意見書(作成者から書類提出先に直送すること)

- ○履歴書
- ○業績リスト(主要論文に○印をつけること)
- ○主要論文の別刷(3編程度、コピー可)
- ○研究業績の概要(2000字程度)
- ○研究計画書(2000字程度)
- 8.書類提出方法 郵送又はメール送付 郵 送:「小林研究室 特任助教応募書類在中」と朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること。 メール:件名は「小林研究室 特任助教応募」とし、総務係までメールを送付すること。総務係から書類送付先フォ ルダを連絡するので、そちらに応募書類一式を保存すること。
- 9. 書類提出先

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号 東京大学物性研究所総務係 電話 04-7136-3207 e-mail:issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

10. 本件に関する問い合わせ先

東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 教授 小林 洋平

- e-mail : yohei@issp.u-tokyo.ac.jp
- 11. 選考方法

東京大学物性研究所教授会の議を経て、審査決定します。ただし、適任者のない場合は、決定を保留します。

12. その他

東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。なお、お送りいただいた応募書類等は 返却いたしませんので、ご了解の上お申込み下さい。また、履歴書は本応募の用途に限り使用し個人情報は正当な理由 なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

令和元年7月31日

東京大学物性研究所長 森 初果

# 編集後記

この物性研だよりの研究紹介では、プレスリリースなどを行った成果を主体に報告させて 頂いております。一方で、やはり基礎研究においては、これらの成果に対して直ぐに評価が 上がるものではありません。

来年度に大学法人評価の中間評価が行われることは、大学関係者の方はご存じかと思いま す。その評価には研究業績もあるのですが、優れた成果の証明として客観的な評価を添える ことが条件になっています。ただ、中間評価となると、この4年の間で評価まで上がってい る成果をとなり、物性研だよりでご紹介している成果でも間に合うケースは少なくなりま す。担当者としては口惜しいところで、現状の評価のタイムスケールでは、依然として基礎 研究においてはハンデが大きいです。

最後に、個人的なことでもあり恐縮ですが、談話会記事で紹介されている講師の東大生産 研の石井教授は、私の学生時代のサッカー部の同期です。ちなみに、彼はキーパーで、私は 試合中に後ろから良く怒鳴られました。今後は、強磁場での共同研究が進む予定です。全く 予期していなかったこともあり、縁というのは不思議なものと感じるこの頃です。

鈴木博之