

物性研だより

BUSSEIKEN DAYORI

第58巻

第2号

2018年7月

「トポロジカル絶縁体に付与した光情報の持続時間を飛躍的に長くすることに成功」

分子を使った乱れ的设计により量子スピン液体を実現

π 電子とプロトンの連動による新しい量子液体状態の発見

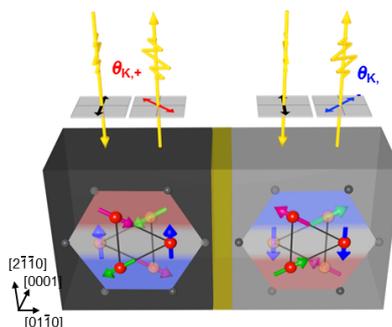
ゼロギャップ半導体における非常に強い電子間相互作用の観測

ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子ホール効果の観測

スピン流の雑音から情報を引き出す
～スピン流高効率制御に向けた新手法～

FeSeにおけるネマティックドメインにセンシティブな超伝導ギャップ異方性

反強磁性金属における巨大な磁気光学力
—効果と磁気八極子ドメインの直接観察



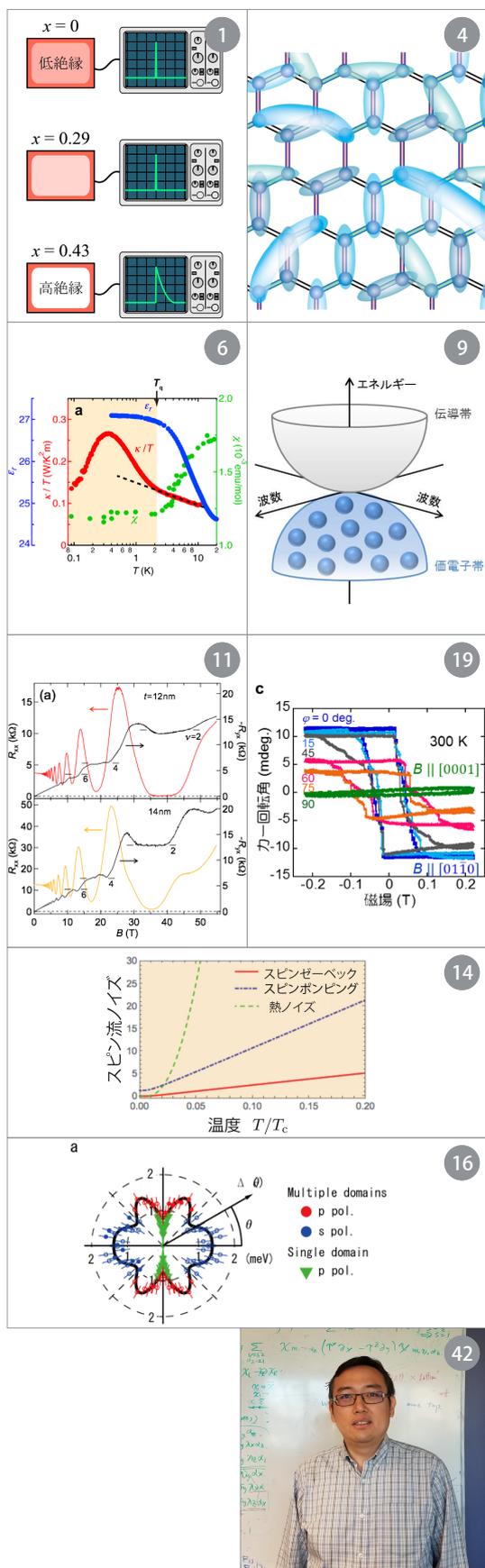
東京大学 物性研究所

THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TOKYO

Copyright ©2018 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.

ISSN 0385-9843

contents



1	「トポロジカル絶縁体に付与した光情報の持続時間を飛躍的に長くすることに成功」	石田 行章、辛 埴
4	分子を使った乱れの設計により量子スピン液体を実現	山口 博則
6	π 電子とプロトンの連動による新しい量子液体状態の発見	下澤 雅明、上田 顕、山下 穂、森 初果
9	ゼロギャップ半導体における非常に強い電子間相互作用の観測	大槻 匠、中辻 知、リップマーミック
11	ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子ホール効果の観測	打田 正輝、徳永 将史
14	スピン流の雑音から情報を引き出す ～スピン流高効率制御に向けた新手法～	加藤 岳生
16	FeSe におけるネマティックドメインにセンシティブな超伝導ギャップ異方性	岡崎 浩三
19	反強磁性金属における巨大な磁気光学カー効果と磁気八極子ドメインの直接観察	肥後 友也、中辻 知
23	日本中性子科学会第 15 回技術賞を受賞して	益田 隆嗣
26	仁科記念賞「トポロジカル量子物性物理学の創始」、朝日賞「トポロジーの物性物理学への導入」を受賞して	甲元 真人
34	文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞して	近藤 猛
35	第 23 回日本物理学会論文賞を受賞して	酒井 明人、中辻 知
36	平成 29 年度日本化学会学術賞を受賞して	森 初果
38	第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 9) を受賞して	黒田 健太
40	平成 30 年度文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞して	廣井 善二
41	文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞して	和達 大樹
42	外国人客員所員を経験して	Ying RAN

【物性研究所短期研究会】

- 43 ○「新世代光源で切り拓く物質科学と生命科学の融合領域」の報告
- 46 ○物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」報告
- 51 ○ガラス転移と関連分野の最先端研究
- 59 ○量子情報・物性の新潮流 ー量子技術が生み出す多様な物性と情報処理技術ー

【物性研究所談話会】

【物性研究所セミナー】

【物性研ニュース】

- 76 ○人事異動

編集後記

「トポロジカル絶縁体に付与した光情報の持続時間を飛躍的に長くすることに成功」

物性研究所 石田 行章、辛 埴

トポロジカル相の分類と機能化： エッシャーの描いた階段が続く回廊は、騙し絵として広く知られている。この回廊は、全体的に見るとひねくれている。回廊を一周して元に戻ってくると、なぜか高低差が生じるように錯覚される。一般に、描かれた回廊がエッシャーの絵のようにひねくれているか否かは、回廊を一周したときの違和感(非自明な高低感)の有無で判定できよう。

このような「全体的に見たときのひねくれ具合」を用いて、物質を分類できることが知られるようになって久しい[1,2,3]。物質の電子構造にひねくれ具合を定義できて、その具合で物質を分類する方法がきちんと存在するのである。非磁性絶縁体を例にとれば、そのバンド構造のひねくれ具合を表す Z_2 の値(0 ないし 1)に従って 2 種類(自明な絶縁体と非自明なトポロジカル絶縁体)に分別できる[3]。

非自明なトポロジーをもつ物質相の面白みは、その相が空間的に途切れたところに表れる[4]。中がひねくれてい

ると、そのしわ寄せが端に出る、とも理解できる。トポロジカル絶縁体の場合、その端すなわち表面は、必ず金属になる。表面を覆う金属層はスピン偏極した質量ゼロのディラック電子状態から成り、薄くしすぎたり磁性を持たせたりしない限り、削っても汚してもとり除くことはできない。この特異な金属層が、トポロジカル絶縁体に出する「しわ寄せ」に相当する。

以上より、トポロジカル物質の研究では「端を見て物質のトポロジカル相を知る」というアプローチや、「特異な端を利用した新しい機能を探索する」という展開が出てくる。標題は昨年広島大学と共同で行ったプレス発表のタイトルであり、その内容は後者すなわち機能創出に資する研究に分類される[5]。以下にこれを概説する。要は光パルスで瞬間的にトポロジカル絶縁体を叩いたら、その影響が思いのほか長続きすることがある、という結果に基づいた議論である。

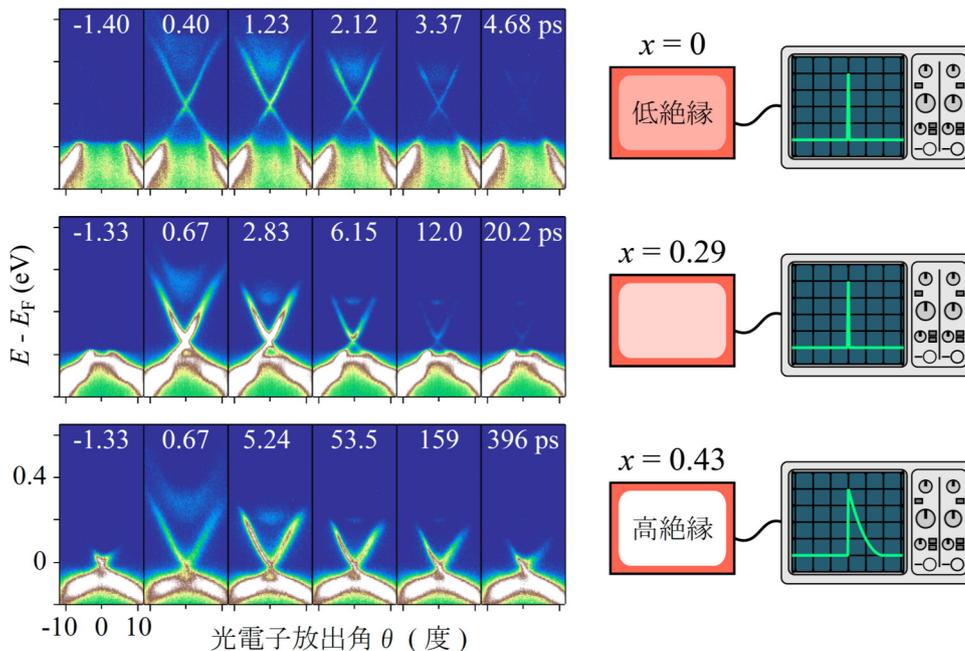


図1：ナノ秒に迫る表面ディラック電子励起の持続。トポロジカル絶縁体(Sb_{1-x}Bi_x)₂Te₃において Bi の含有量を $x = 0$ から 0.43 まで増やすと、励起の持続時間は 400 ps を越えた。応答を電気的に検出することも、いよいよ視野に入ってきた。

- [1] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, M. den Nijs: Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982).
- [2] M. Kohmoto: Ann. Phys. **160**, 343 (1985).
- [3] C. L. Kane and E. J. Mele: Phys. Rev. Lett. **95**, 146802 (2005).
- [4] Y. Hatsugai: Phys. Rev. Lett. **71**, 3697 (1993).
- [5] K. Sumida, Y. Ishida, S. Zhu, M. Ye, A. Pertsova, C. Triola, K. A. Kokh, O. E. Tereshchenko, A. V. Balatsky, Shin, A. Kimura: Sci. Rep. **7**, 14080 (2017).
- [6] 石田行章, 辛埴: 固体物理 **53**, 233 (2018).



図2のようなハニカム格子が形成されていると予想された。さらに、A-type と B-type の分子の存在と分子間の対称性を考慮することで、各磁気相関には3つのパターンが存在していると考えられた。結果として、ハニカム格子を形成する磁気相関には9(=3×3)パターンが存在して、それらがランダムにつながることで磁気相関にランダムネスが構築される。

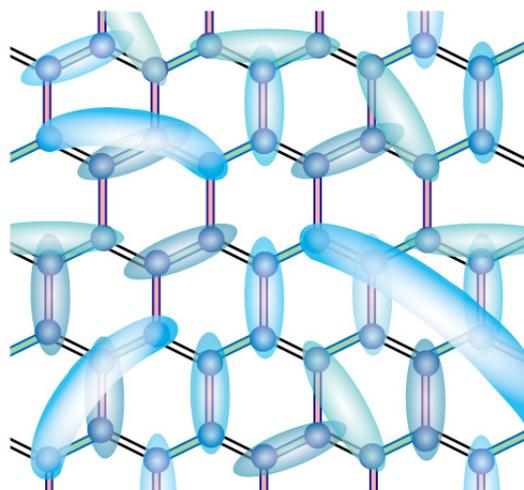


図2 : $Zn(hfac)_2(A_xB_{1-x})_3$ のハニカム格子上的ランダムシングレット状態。囲まれたスピンはシングレットを表す。高次の反強磁性磁気相関によって、空間的に離れたスピンスピン対でもシングレットが形成される。

スピン 1/2 が反強磁性的に結合した場合には、量子的なシングレット状態が形成されてスピンの消失する。本系におけるハニカム格子上のランダムな磁気相関においては、温度低下に伴って強い反強磁性相関を持つスピンのペアから順次シングレットを形成していく。その際、シングレットを形成して消失したスピンスピン対を飛び越えた高次の反強磁性相関も有効になる。従って、ハニカム格子をつくる磁気相関は9パターンであるが、シングレットを形成する磁気相関のエネルギーはほぼ連続的に分布することになる。この乱れによって形成されるランダムシングレット(valence bond glass)においては、図2に示すようにそれぞれのスピンスピンが空間的にランダムにシングレットを組み、ギャップレスの非磁性状態となっている。それ故に量子スピン液体として報告されている振る舞いと同等な物性が観測されると予想されている。非常に弱い高次の反強磁性相関によってシングレットを組んでいるスピンは、有限の磁場でトリプレット状態へと励起されるため、低温での磁化率には常磁性的なスピンの寄与が現れる。また、連続的なエネルギー準位の分布を反映して、磁化曲線は線形的になり、磁気比

熱は低温で温度に比例した振る舞いを示す。本研究では乱れの大きな $x = 0.64$ と 0.79 の試料の合成に成功し、低温での物性検証を進めた。その結果、磁化率、磁化曲線、磁気比熱の全ての実験結果において、明瞭にランダムシングレットで予想されている量子スピン液体的な振る舞いが再現された。

3. 今後の展望

乱れを導入することによって実現した量子スピン液体は、従来の量子スピン液体のモデルとは異なる発現機構を備えている。現実の物質で観測されている量子スピン液体の理解に一石を投じるとともに、その本質に迫る重要な知見となった。さらに、空間的に離れたシングレットを持つランダムシングレット状態では長距離のスピン輸送も期待できる。反強磁性絶縁体をベースとしたスピンドバイスの開発につなげていきたい。

我々が取り組んできた有機ラジカルを用いた一連の物質開発では、無機物による磁性体の合成と比較すると、圧倒的に早いペースで多種多様な新規磁性体を生み出すことが可能である。分子の自由度を活用した量子磁性体のデザインは、量子物性の制御を可能にし、新たな量子現象を取り込んだ新材料の開発にもつながる。

謝辞

本研究成果は、東京大学物性研究所の河野洋平研究員、橘高俊一郎助教、榊原俊郎教授、大阪府立大学の岡田将孝氏、岡部俊輝氏、岩崎義己研究員、細越裕子教授との共同研究によるものです。

参考文献

[1] H. Yamaguchi, M. Okada, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, T. Okabe, Y. Iwasaki, and Y. Hosokoshi, *Sci. Rep.* **7**, 16144 (2017).

あるが、プロトンが極低温まで動的に揺らいだ状態を維持し続けているのかどうかは定かではない。仮にそうだとし、プロトンの揺らぎが量子スピン液体にどのような影響を与えているか全く解明されていなかった。

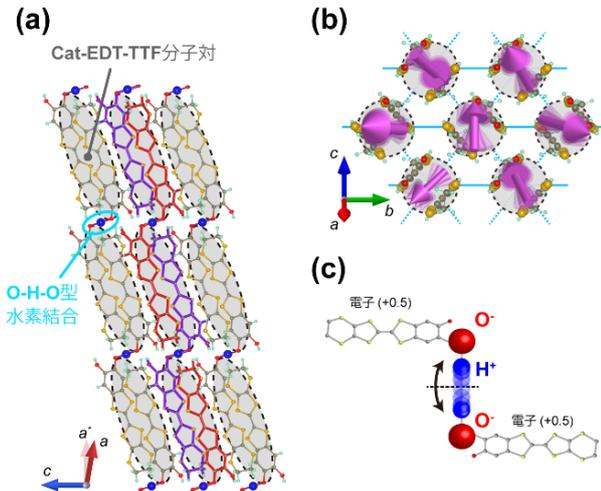


図2 H-Catの結晶構造。(a)電子を担うCat分子同士が、誘電性を担う[O-H-O]⁻¹型の水素結合で連結されている。この構造がH-Catの最も特徴的な点である。(b)2次元(bc面)におけるCat分子の配列。点線で囲んだ2つのCat分子が対を作り、そこに1つのスピン(紫の矢印)が存在する。このスピンは、三角格子上に配列している。(c)[O-H-O]⁻¹型の水素結合の拡大図。図2(a)の赤色もしくは紫色で示したものに対応する。水素結合上のプロトンが動くことで、試料に電荷の偏りが現れて誘電性が生じる。

実験結果と議論

本節では、プロトンダイナミクスとスピン励起を直接的に観測可能な誘電率と熱伝導率を極低温まで測定して、H-Catで実現しているスピン液体の背後にあるプロトン- π 電子結合の効果を多角的に調べた。誘電率測定は、物質中の水素結合系のダイナミクスを調べる有力な手段のひとつであり、KH₂PO₄ (KDP)をはじめとした水素結合型強誘電体の研究において多くの蓄積がある。この知見に基づいてH-Catのプロトンダイナミクスを解析する。

図3(青線)に、H-Catに対して得られた誘電率の温度依存性 $\epsilon_r(T)$ を示す。H-Catの誘電率は、温度を低下させると急激に増大するが、 ~ 7 K以下で飽和する傾向が現れ、2 K以下ではほぼ一定値になる。このH-Catの誘電率とよく似た振る舞いは、ペロブスカイト型酸化物 SrTiO₃ などの量子常誘電体において見られる。量子常誘電状態は、(反)強誘電転移が格子振動の量子揺らぎによって抑制されることで実現する。それ故、熱揺らぎが支配的な高温領域

の誘電率は、通常の Curie-Weiss 則に従って温度低下と共に増大するが、量子効果が顕在化する低温領域では、誘電率の増大が抑制されて一定の値に落ち着く振る舞いを示す。このような誘電率の温度依存性を、量子常誘電状態を記述する Barrett の式を用いて解析したところ、反強誘電的な相互作用が働く電気双極子が揺らぎ続けていることが分かった。この反強誘電的な相互作用の起源は、H-Catの重水素置換体である D-Catの相転移の際の重水素の変位様式から推察できる。D-Catの場合、結晶全体で水素結合部の極性を打ち消しあうように重水素が変位し、結果として反強誘電的な相互作用を持つ電気双極子が生じる。この反強誘電的な相互作用はH-Catにおいても存在するが、プロトンには強い量子揺らぎが存在することで、反強誘電的な秩序化を回避して量子常誘電性が実現していると考えられる。

次にプロトンのダイナミクスが量子スピン液体に及ぼす効果を調べるために、H-Catの誘電率と熱伝導率の結果を、先行研究による磁化率[4]の温度依存性と比較する(図3)。H-Catの熱伝導率測定から、スピンによる熱伝導が支配的となる温度領域は2 K以下と考えられるが、これは誘電率から見積もられるプロトンの量子揺らぎが熱揺らぎに対して支配的になる温度($T_q \sim 2$ K)と一致している。さらに図3に示すように T_q は、量子揺らぎが発達して磁化率がほぼ一定の値になる温度、すなわち量子スピン液体が発現する温度ともほぼ一致している[4]。これは驚くべき事実であり、プロトンの量子揺らぎが π 電子とカップリングすることで新しい量子スピン液体 — 絶対零度まで電気・磁気双極子が揺らぎ続ける量子常誘電性と量子常磁性の共存した量子液体状態 — が安定化していることを意味

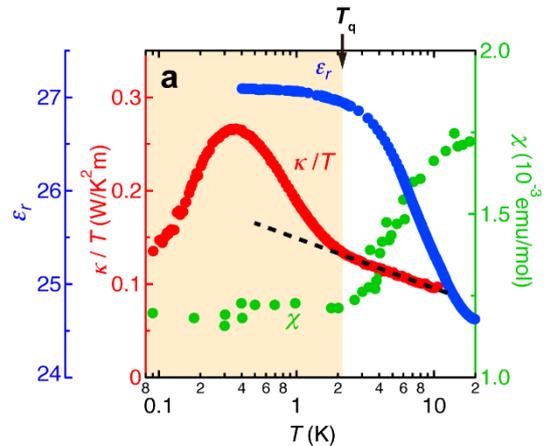


図3 H-Catの誘電率(青色)、熱伝導率(赤色)および磁化率(緑色)の温度依存性。黒色の破線はガイド線を示す。 T_q 以下の影付きの領域では、量子常誘電状態と量子スピン液体が同時に出現している。

ゼロギャップ半導体における非常に強い電子間相互作用の観測

量子物質研究グループ 大槻 匠、中辻 知
ナノスケール物性研究部門 リップマー ミック

はじめに

物性物理学の分野では、新奇な物理的性質を示す物質の探索が精力的に行われている。その中でも、高い移動度や量子ホール効果などのトポロジカルな機能のために、近年世界的に注目されている物質群が、ゼロギャップ半導体である。例えば、グラフェン [1] のように価電子帯と伝導帯が接する点近傍で線形のパンド構造を持つ物質においては、電子はあたかも質量がゼロであるかのように振る舞い、新しい現象が次々に発見され、2010 年のノーベル物理学賞の対象となった。ゼロギャップ構造に潜んでいる物理は非常に興味深いが、これまで理解が進んできたのは一般的には電子間の相互作用が弱い場合においてである [2]。

他のゼロギャップ構造の例として、図 1 に示すように、2 つのバンドが接する点近傍でパンド構造が放物線的である **quadratic band touching** を持つラッティンジャー半金属と呼ばれる状態がある。ラッティンジャー半金属では、線形のエネルギー分散が交差する場合は異なり、状態密度が急激に増加するために電子間の相互作用が強く、通常の電子の概念が破綻するような新しい金属状態が現れる、ということが 40 年以上前に予測されていた [3,4]。この **quadratic band touching** という状態にある物質の具体例として、古くから α -スズ(α -Sn) [5] やテルル化水銀 (HgTe) [6] が知られているが、これらの物質内では電子の有効質量が小さいために、電子間の相互作用も弱く、その効果を実験的に明らかにすることは困難であった。

実験内容と成果

そこで本研究では、強い電子間相互作用の効果を明らかにするために、プラセオジウム (Pr) とイリジウム (Ir) からなるパイロクロア型酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ [7] を研究対象とした。角度分解光電子分光の実験によると [8]、この物質は、(1) **quadratic band touching** を持つラッティンジャー半金属であり、イリジウムの $5d$ バンドからなるそれぞれ 2 重縮退した価電子帯と伝導帯が Γ 点においてフェルミ準位上で接し、(2) 電子の有効質量は真空中の自由電子に比べて約 6 倍重たい (α -Sn に比べて約 300 倍大きい [5]) ことが分かっている。

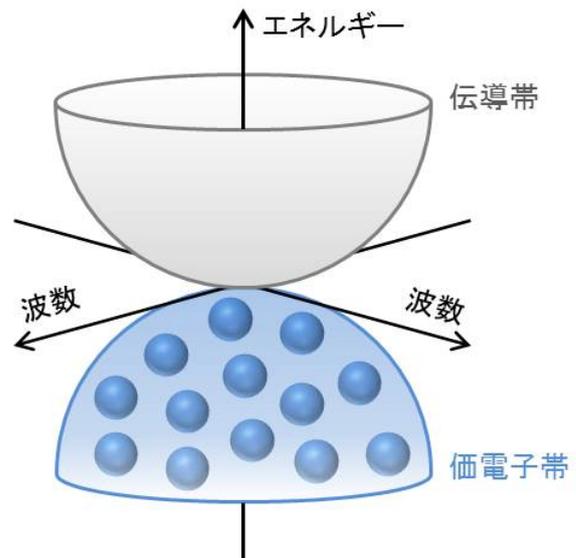


図 1. ゼロギャップ半導体のひとつで、2 次分散バンドが一点で接した「ラッティンジャー半金属状態」のパンド構造。電子(青い球)で満たされた価電子帯と空の伝導帯は、3次元の放物線型をしており、両者はフェルミ準位上の一点で接している。

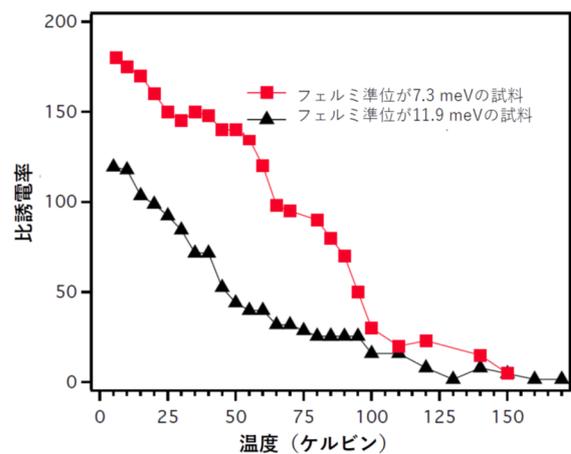


図 2. 比誘電率の温度依存性。低温でこれまで知られているゼロギャップ半導体(たとえば α -Sn や HgTe)の値の数倍以上大きな値を示す。価電子帯と伝導帯が接するエネルギーから測ったフェルミ準位が小さいほど、低温で大きな誘電率を示す。

ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子ホール効果の観測

東京大学大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 打田 正輝
物性研究所 国際超強磁場科学研究施設 徳永 将史

はじめに

トポロジーの概念は、物質における新たな量子相探索の指針として益々注目を集めている。その概念に立脚した観点は、トポジカル絶縁体やそれに続くトポジカル結晶絶縁体・トポジカル半金属・トポジカル超伝導体などの新たな量子相の提案・発見にもつながった。これらのトポジカル相については、トポジカルに保護された特有の量子現象の研究も精力的に展開されている。特に、トポジカル相に典型的に内在するディラック電子系は、高い移動度やスピン・運動量ロッキングによる長いスピン緩和長などの性質を持ち、次世代の省エネルギーデバイスの有力な材料候補として期待されている。

その中で、本稿では、トポジカルディラック半金属 Cd_3As_2 に焦点を当てて、高品質な薄膜の実現によって明らかになってきた強磁場中の量子輸送特性について報告する。トポジカルディラック半金属は、グラフェンの3次元版とも呼ぶべき特異な電子状態を持つ[1]。これらの電子構造は理論提案直後に角度分解光電子分光等により直接観測されたが[2,3]、その量子輸送現象の研究はまだまだ途上段階にある。特に、3次元のディラック点は波数空間中でモノポールが存在する状態に等しく、それに付随した新しい物理現象を発現する可能性を秘めており、カイラル異常やワイル軌道と呼ばれる新たな量子輸送現象はいずれもこの3次元ディラック点が起源となっている。また、トポジカルディラック半金属は、トポジカル絶縁体・ワイル半金属・量子スピンホール絶縁体をはじめとした他のトポジカル相へ相転移できる母物質に相当しており、トポジカル相転移現象の研究舞台としても期待されている。

Cd_3As_2 は古くから高移動度半導体としても知られてきた物質であるが、高品質な薄膜作製が非常に困難であった。これは、 Cd_3As_2 自体が非常に高い蒸気圧をもち、成膜がごく低温に限られてきたためである。また、As 欠損による電子ドーピングによってフェルミレベルがディラック点から大きく離れてしまうという問題点もあった。このような状況において、我々は、パルスレーザー堆積法と高温アニール法を組み合わせる手法によって高い移動度と結晶性をあ

わせもつ高品質な Cd_3As_2 薄膜の作製に成功し[4,5]、量子ホール効果をはじめとする強磁場輸送現象の研究の端緒を開いた[4,6]。

実験結果

キャップ層を最適化することによって、薄膜の蒸発を防ぎながら非常に高温での Cd_3As_2 薄膜のアニールが可能となった。図1の透過電子顕微鏡像に示すように、既報のバルク試料を超える非常に高い結晶性をもつ薄膜試料が作製できるようになった。得られた薄膜試料のキャリア濃度はバルクで報告されている最低キャリア濃度に匹敵するほど低く、その移動度は低温で $30,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ にも及び、同じキャリア濃度で比較してバルクと同程度に十分高いことも明らかになった。

輸送測定では、まず高移動度に由来する Shubnikov-de Haas 振動が低磁場から観測された。加えて、図2に示すように、55Tまでの高磁場下での輸送測定において、量子ホール状態が観測された。また、これらの数十 nm 程度以下の膜厚の試料では、振動の回転磁場中測定によって二次元的なフェルミ面が実現していることが確認された。これは、薄膜の膜厚を変えることによって、フェルミ面の次元性を制御し、量子閉じ込め効果が効いた2次元の電子構造が容易に実現できることを示している。

特に、12, 14nm という薄い試料と 16, 23nm という厚い試料では量子ホール状態の見え方及び縮退度が全く異なっていることが分かる。詳細な量子輸送解析により、この急激な量子ホール状態の変化は、非常に速いディラック分散に由来するスピン縮退度の変化に由来していることが明らかになった。また、その非常に速いディラック分散のために、かなり厚い膜厚まで量子ホール状態が残って現れ、特に 23nm ほどの膜厚ではディラック点の内側に閉じ込められたバンドが形成されることで量子スピンホール絶縁体状態が実現していることも分かってきた。これはまさに、 Cd_3As_2 薄膜の厚みの変化によって、トポジカルディラック半金属からのトポジカル相転移を引き起こし、トポジカルな性質と非散逸な量子伝導状態が制御できることを示している。

現在は、化学置換によりキャリア濃度を制御し、量子ホール状態をより低磁場で実現することにも成功している[6]。Cd₃As₂ に対して Zn₃As₂ を混合してアニールすることにより、結晶化と同時に (Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ の固溶体が作製できることを見出し、キャリア濃度依存性を系統的に調べることが可能となった。Zn のドーピング量に対して効果的にキャリア濃度が低減しており、トポロジカルに非自明な領域に留まりながら低キャリア濃度が達成されている。

今後の展開

今後、三次元的な電子状態が実現する厚い膜厚について、高い平坦性と結晶性をもった Cd₃As₂ 薄膜試料を作製し強磁場中の輸送特性を測定することで、表面状態に由来した量子輸送現象を解明することが出来るようになることが期待される。また、種々のドーピングの手法と組み合わせることにより、よりディラック点に近づいていく領域におけるカイラル異常・ワイル軌道などのトポロジカル半金属特有の量子輸送現象や、トポロジカル絶縁体・磁性トポロジカル絶縁体へのトポロジカル相転移における輸送特性の変化も明らかにできるようになると期待される。

謝辞

本研究は、東京大学の中澤佑介、西早辰一、小塚裕介、川崎雅司、東京大学物性研究所の秋葉和人、三宅厚志、理化学研究所創発物性科学研究センターの M. Kriener、田口康二郎、永長直人、十倉好紀、各氏をはじめとした多くの方々との共同研究によるものである。なお、本研究は、科学技術振興機構 CREST (No. JPMJCR16F1) 及び日本学術振興会科学研究費 (No. JP24226002、JP15K05140、JP15H05425、JP16H00980) の支援の下に行われた。

REFERENCES

[1] S. Murakami, *New Journal of Physics* **9**, 356 (2007).
[2] Z. Wang, H. Weng, Q. Wu, X. Dai, and Z. Fang, *Physical Review B* **88**, 125427 (2013).
[3] Z. K. Liu, J. Jiang, B. Zhou, Z. J. Wang, Y. Zhang, H. M. Weng, D. Prabhakaran, S-K. Mo, H. Peng, P. Dudin, T. Kim, M. Hoesch, Z. Fang, X. Dai, Z. X. Shen, D. L. Feng, Z. Hussain, and Y. L. Chen, *Nature Materials* **13**, 677-681 (2014).

[4] M. Uchida, Y. Nakazawa, S. Nishihaya, K. Akiba, M. Kriener, Y. Kozuka, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, N. Nagaosa, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *Nature Communications* **8**, 2274 (2017).
[5] Y. Nakazawa, M. Uchida, S. Nishihaya, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, and M. Kawasaki, *Scientific Reports* **8**, 2244 (2018).
[6] S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, M. Kawasaki, *Science Advances* **4**, eaar5668 (2018).



有効磁化の情報が得られる。スピン非保存の過程が重要になると、スピン保存・非保存過程の混合により有効磁化は増加する。またスピンプンピングの実験では強磁性体へのマイクロ波照射によってスピン流を生成させるが、同時に強磁性体の温度上昇も引き起こすため、スピンゼーバック効果も同時に生じる。スピン流だけの情報でこの2つの寄与を峻別することは難しく、長年問題となっていた。しかし、非平衡スピン流ノイズを測定すると、この2つの寄与を峻別することが可能である。スピン保存過程のみが生じる系では低温のファノ因子が \hbar になることがわかるが、これを逆に校正標準として利用し、金属での逆スピンホール効果によるスピン流-ホール電圧の変換効率(ホール角)の情報を得ることもできる。

2015年に開催された物性研究所滞在型ワークショップでは、大谷所員とともに企画・運営を行ったが、その主目的はメゾスコピック分野とスピントロニクス分野の交流であった。本研究がこの2つの分野をつなぐ架け橋となることを期待して、この原稿を終えることにしたい。

謝辞 本研究は、松尾衛氏(現・中国科学院大学カブリ理論科学研究所)、大沼悠一氏(現・中国科学院大学カブリ理論科学研究所)、前川禎通氏(現・理化学研究所上級研究員)との共同研究として行われました。また本研究遂行にあたり、竹井聡さん(クイーンズ大学)、新見康洋さん(大阪大学)との議論がたいへん有益でした。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. Kamra et al., Phys. Rev. B, **90**, 214419 (2014).
- [2] A. Kamra and W. Belzig, Phys. Rev. Lett. **116**, 146601 (2016); S. Takei and M. Mohseni, Phys. Rev. B **97**, 014427 (2018).
- [3] M. Matsuo, Y. Ohnuma, T. Kato, and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. **120**, 037201 (2018).
- [4] Y. Ohnuma, M. Matsuo, and S. Maekawa, Phys. Rev. B **96**, 134412 (2017).



楕円形の互いに 90 度回転したフェルミ面が存在する事がわかる。さらに、p 偏光では k_y 方向に伸びた楕円形のフェルミ面の強度が、s 偏光では k_x 軸方向に伸びたフェルミ面の強度が強い事がわかる。この偏光依存性は、FeSe では構造相転移温度 T_s で正方晶から斜方晶に転移する際に双晶ドメインが入り、斜方晶の a 軸と b 軸が混在してしまうこと、それぞれのドメインでは、図 1a に示すように、図 1b 中の検出器のスリットを含む YZ 平面に対して奇対称な軌道、もしくは偶対称の軌道によってフェルミ面が構成されていることから理解できる。同時に、p 偏光と s 偏光を切り替えることによって、双晶試料であってもどちらかのドメインのフェルミ面のみを切り分けて測定出来ることがわかった。図 1d, 1e は p 偏光で測定した図 1c 中の線#1 に沿った ARPES 強度のエネルギー-運動量分布とその運動両方向での 2 階微分、図 1g, 1h は s 偏光で測定した図 1f 中の線#2 に沿った ARPES 強度のエネルギー-運動量分布とその運動両方向での 2 階微分であるが、p 偏光では楕円形のフェルミ面の長軸方向のバンド分散を捉えているのに対し、s 偏光では短軸方向のバンド分散を捉えていることがわかる。

双晶 FeSe の超伝導ギャップ構造

偏光を切り替えることで双晶試料であってもどちらか一方のドメインのフェルミ面を捉えることが出来ることがわかったため、これを利用して双晶試料での BZ 中心周りのフェルミ面の超伝導ギャップ異方性を測定した。これをフェルミ面角と呼ばれる各フェルミ波数の偏角に対して超伝導ギャップの大きさを極座標表示でプロットしたのが図 2a の赤い点、及び青い点である。それぞれ p 偏光、s 偏光を用いて測定した結果であり、p 偏光では楕円形のフェルミ面の長軸方向に対応するフェルミ面角 ± 90 度方向、s 偏光では短軸方向に対応する 0 度、および 180 度方向の近傍が測定できる。フェルミ面の形状も二回対称である事に対応して、超伝導ギャップの異方性も四回対称とは大きく異なっている事がわかった。特に、四回対称であれば等価な点であるはずの 0 度、180 度方向と ± 90 度方向とは超伝導ギャップの大きさがかなり異なっており、0 度、180 度では極大になっているのに対して、 ± 90 度方向では逆に極小となっている。

シングルドメイン FeSe の超伝導ギャップ構造

双晶ドメインが存在しない、シングルドメインの試料で測定するには、通常デツインと呼ばれる、一軸性の応力を

かけながら T_s 以下にする操作が必要である。しかしながら、デツインを行った試料で光電子スペクトルを測定するには、そのためのデバイスが必要になるが、これを用いると超精密測定である超伝導ギャップの異方性の測定は不可能になってしまう。一方で、デツインを行わなくても、デツインを行った場合と同様のフェルミ面の偏光依存性が測定出来る場合があることがわかった。これは、ドメインサイズがレーザースポットのサイズ(直径 $\sim 200\mu\text{m}$)と同程度になる場合があるためと考えられる。シングルドメインの試料でフェルミ面角 90 度付近での超伝導ギャップの異方性をプロットしたのが図 2a の緑の点である。双晶試料と比べて、極小となっていた 90 度付近での超伝導ギャップの大きさがさらに小さくなることがわかった。

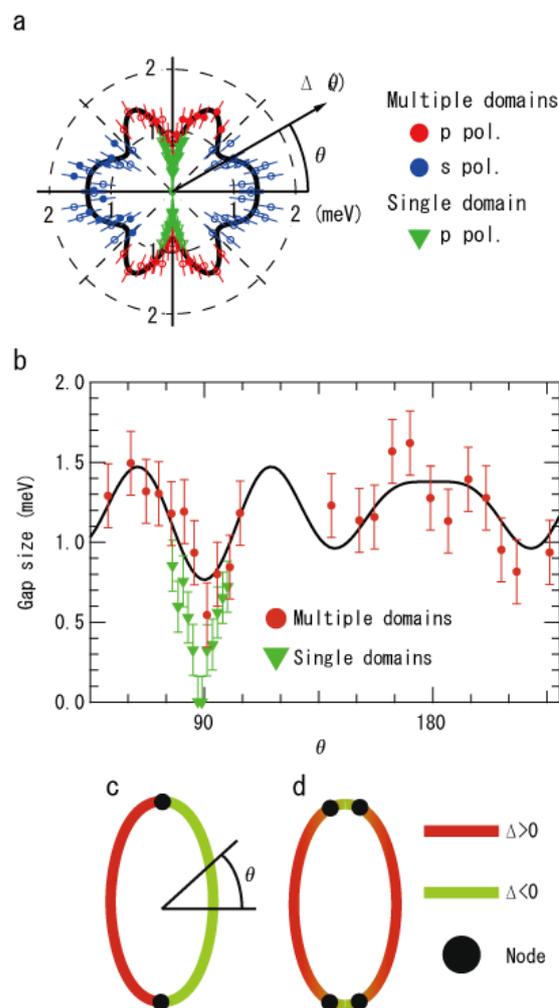


図 2. FeSe の超伝導ギャップ異方性 a. マルチドメイン試料, シングルドメイン試料での結果を極座標表示でプロットしたもの. b. マルチドメイン試料, シングルドメイン試料での超伝導ギャップ異方性を直交座標でプロットしたもの. c., d. 考えられる超伝導ギャップノードの位置と超伝導ギャップの符号.

反強磁性金属における巨大な磁気光学カー効果と磁気八極子ドメインの直接観察

ナノスケール物性研究部門 (量子物質研究グループ併任)

肥後 友也

量子物質研究グループ

中辻 知

研究の背景

磁気光学カー効果(ファラデー効果)は、直線偏光した光を磁性体に照射した際にその反射光(透過光)の偏光面が回転する現象である。これらの線形磁気光学効果は、光磁気ディスクや通信線路などで用いられる光アイソレータ等の磁気光学素子の原理であるほか、磁気特性や電子状態といった基礎物性や磁気ドメインを非破壊・非接触で、かつ、簡便に測定する手段として基礎~応用研究に広く用いられている。一般に、これらの線形磁気光学効果は、マクロな磁化とスピン軌道相互作用により生じると考えられており、磁化を持つ強磁性体やフェリ磁性体において精力的に研究が行われてきたが、一方で、磁化がゼロの反強磁性体ではその検出が困難であると考えられてきた。

しかし、最近の研究の進展により、磁気光学効果は異常ホール効果と同様の対称性の議論からその振る舞いを考察することが可能であり、つまり、時間反転対称性が巨視的に破れ、有限のベリー曲率を運動量空間に有する系では、磁化を持たない反強磁性体においても巨大な磁気光学カー効果が現れることが理論的に明らかになってきた[1]。

本研究では、反強磁性体において初めて異常ホール効果が観測された非共線スピン構造を持つ反強磁性金属 Mn_3Sn において、巨大な磁気光学カー効果や反強磁性ドメインを観測することを目的に実験を進めてきた。以下では、その結果について紹介する。

実験結果

反強磁性体 Mn_3Sn は図 1(a)に示すように、空間群 $P6_3/mmc$ に属する六方晶の系で、磁性元素 Mn からなるカゴメ格子が ABAB の順序で積層した構造を持ち、逆 120 度構造と呼ばれる非共線スピン構造が $T = 430 K$ という高温から現れる[2]。この反強磁性スピン構造は、磁化ゼロの状態においても強磁性秩序の場合と同様に巨視的に時間反転対称性が破れた状態を実現するが、これは図 1(b)に示すように、2 層のカゴメ格子に 3 つの副格子からなるスピンを 6 つ配置されたスピン構造(クラスター磁気八極子[3])を秩序変数とした際に、この磁気八極子が強的に秩序していることから理解できる。実際の系では、対称性から許される強磁性体の $1/1000$ 程度の微小なキャント磁化

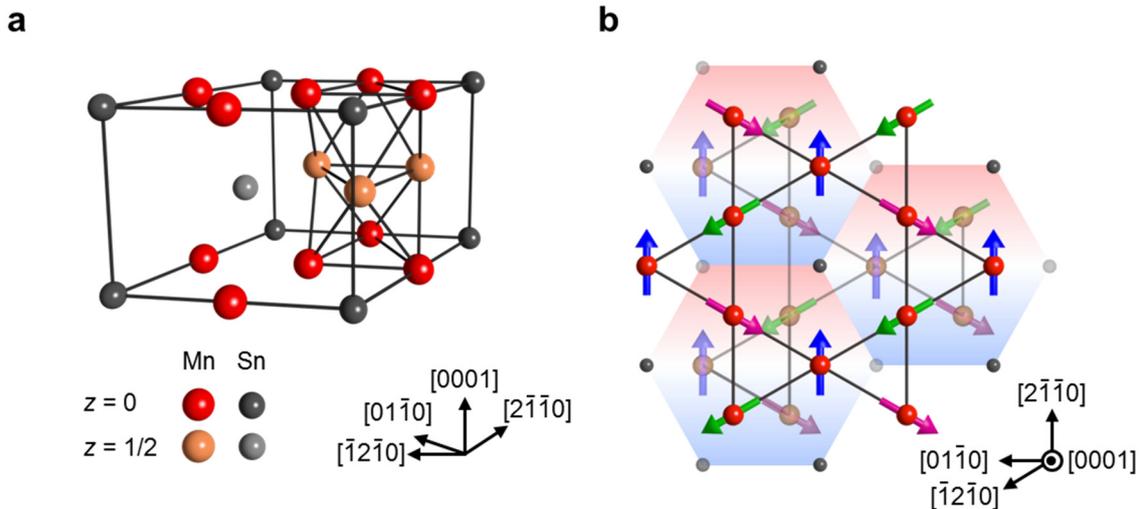


図 1 反強磁性金属 Mn_3Sn の結晶構造(a)と磁気構造(b)。(a) $[0001]$ 方向に二層のカゴメ格子が積層した構造をもち、磁性元素 Mn は正三角形の頂点に配置されている。(b) Mn のスピンは各カゴメ格子の層で逆 120 度構造というスピン構造をとる。二層のカゴメ格子上の 6 つのスピンをしてみると、六角形で囲まれているように、クラスター磁気八極子と呼ばれるスピン秩序のユニットを持っていることがわかる。

磁気光学カー効果が見れないと考えられていた無磁場かつ磁化ゼロの反強磁性状態においても巨大なカー回転が見れることを明らかにした。

さらに、磁気光学顕微鏡を用いて観察することにより、磁気八極子を持つ反強磁性ドメイン(≒カー回転角の正負の符号)の反転に伴ったコントラストの変化をイメージングすることに初めて成功した(図3(a)と3(b))。コントラストを示す2つの反強磁性ドメインは巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果の起源である符号の異なる100 Tの仮想磁場を持つ磁気八極子ドメインに対応していると考えられる。

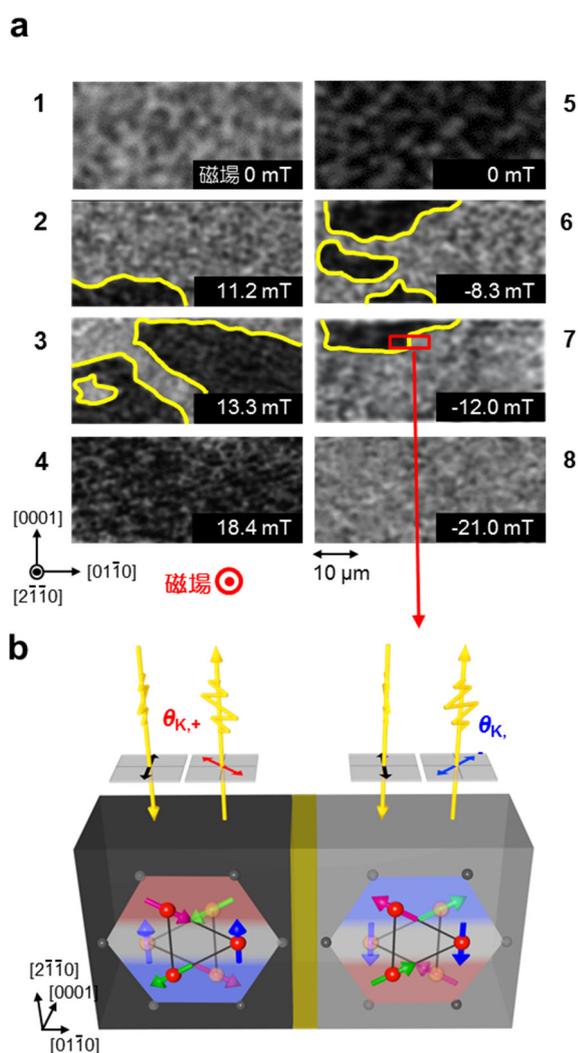


図3 反強磁性金属 Mn_3Sn の磁気光学カー効果による磁気八極子ドメインの直接観察像。(a)室温での試料表面の観察像。1-8の番号は図2(a)中での各点における測定に対応している。面直方向へ加えられる外部磁場によりコントラストが変化(灰色⇄黒色)している。黄色部分は磁壁を示している。(b)コントラストに対応した磁気八極子ドメインの概要図。

今後の展開

現在、漂遊磁界がゼロ・高速応答が可能な不揮発性磁気メモリ等の磁気デバイス開発への期待から、機能性反強磁性体に関する研究が盛んに行われている。中でも、強磁性体に匹敵する巨大な電気-磁気応答・熱-磁気応答・光-磁気応答特性の開拓に特に注目が集まっており、これらの特性を創出する起源と考えられているクラスター磁気多極子秩序の機構解明とその観測・制御方法の確立が望まれている。本研究において行われた反強磁性体 Mn_3Sn での磁気八極子由来の巨大な磁気光学効果の観測や反強磁性ドメインのイメージングは、反強磁性体を用いたデバイス研究への広範囲な応用展開が可能である。通常、反強磁性体の磁気ドメインの可視化には中性子散乱や放射光実験が行える巨大施設が必要だが、テーブルトップで、かつ、試料を非破壊・非接触で測定可能な磁気光学カー効果による反強磁性ドメインのイメージングは、我々が現在精力的に研究している異常ネルンスト効果を用いた磁気熱電デバイス等の反強磁性体を用いたデバイスの特性を評価する上でも非常に有用な技術であり、本手法を用いた研究が急速に進んでいくことが期待される。

謝辞

本研究は、東大物性研の H. Man 氏、M. Ikhlas 氏、理研 CEMS の是常隆氏(現：東北大)、鈴木通人氏(現：東北大)、有田亮太郎氏、米国 NIST の R.D. Shull グループ、UCB の J. Orenstein グループ、U.S. NRL の O.M.J. van't Erve 氏、JHU の C.L. Chien グループとの共同研究、大谷義近氏、H. Chen 氏をはじめとする数多くの方々との議論を通して得られた成果である。

また、本研究は、JST-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(研究総括：谷口研二、研究副総括：秋永広幸)課題番号 JPMJCR15Q5(研究代表者：中辻知)、文科省 科研費 新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」課題番号 15H05882(研究代表：播磨尚朝)、課題番号 15H05883(研究代表：中辻知)、日本学術振興会 戦略的国際研究交流推進事業「頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム」における事業課題「新奇量子物質が生み出すトポロジカル現象の先導的研究ネットワーク」(主担当者：瀧川仁)の一環として行われた。

- [1] H. Chen, Q. Niu, and A.H. MacDonald, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 017205 (2014); W. Feng, G.-Y. Guo, J. Zhou, Y. Yao, and Q. Niu, *Phys. Rev. B* **92**, 144426 (2015).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, *Nature* **527**, 212 (2015).
- [3] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, *Phys. Rev. B* **95**, 094406 (2017).
- [4] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji. *Nat. Phys.* **13**, 1085 (2017).
- [5] H. Yang, Y. Sun, Y. Zhang, W.-J. Shi, S.S.P. Parkin, and B. Yan, *New J. Phys.* **19**, 015008 (2016).
- [6] K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A.A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo, and S. Nakatsuji. *Nat. Mater.* **16**, 1090 (2017).
- [7] T. Higo, H. Man, D.B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O.M.J. van 't Erve, Y.P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M.-T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C.L. Chien, R. Arita, R.D. Shull, J. Orenstein, and S. Nakatsuji, *Nat. Photon.* **12**, 73 (2018).

日本中性子科学会第 15 回技術賞を受賞して

中性子科学研究施設 益田 隆嗣

2017 年 12 月 2-3 日に福岡大学で開催された日本中性子科学会第 17 回年会において、中性子科学研究施設の皆様および高エネルギー加速器研究機構の皆様と共同で、第 15 回中性子科学会技術賞を受賞する榮譽に恵まれました [1]。受賞テーマは、「高分解能チョッパー分光器 HRC の建設と中性子ブリルアン散乱法の実装」でした。高分解能チョッパー分光器(High Resolution Chopper Spectrometer, HRC)は、東京大学と高エネルギー加速器研究機構が共同で J-PARC MLF に建設し、2010 年 5 月にビーム実験が開始されました。meV から eV にわたる広いエネルギー領域の中性子を高分解能で利用し、物質のダイナミクスを幅広い波数-エネルギー空間で効率的に測定を行い、詳細な研究を行うことが可能となっています。

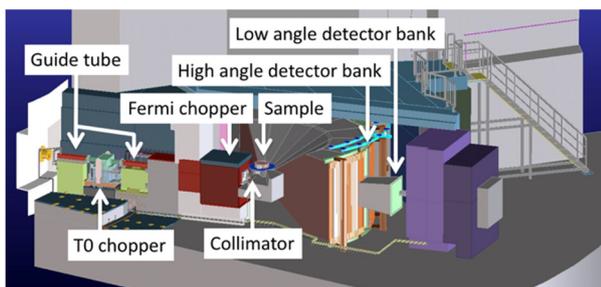


図 1 : HRC 分光器の概念図

HRC 分光器では、試料位置を中心とした半径約 4m 中心角 90 度の弧上に、直径 3/4 インチ高さ約 3m の細長い位置敏感型検出器が設置されています [2]。これにより、3 次元波数 q 空間において検出器がカバーする 2 次元面上での測定を一度に行います。図 2(a)に紺色の領域が示されていますが、これは、試料を回転させることにより、弧状の検出器が 2 次元逆格子空間を掃引した様子を示しています。(0, -1.5)に赤いスポットがありますが、これは磁気ブラッグピークです。このように、チョッパー分光器では q 空間を効率的に測定することができますが、それだけではありません。熱中性子 25.3 meV の中性子の速度は秒速 2.2 km 程度であるため、ミリ秒の飛行時間と飛行距離を測定することにより、中性子の速さ、すなわちエネルギーを決めることができます。飛行距離は、試料位置から検出器までの距離で固定されているので、

実験では飛行時間を記録することでエネルギーが決定されます。したがって、エネルギー方向にも幅広い領域を測定することになります。図 2(b)-2(d)は各々 1 meV、2 meV、3 meV の励起スペクトルを表していますが、これらは図 2(a)と同時に測定されたデータです。(0, -1.5)からスピン波が立ち上がっている様子が分かります。さらに、測定データの切り口を、波数-エネルギーにすると、図 2(e)、2(f)のような分散関係が得られます。このようにして、波数-エネルギーの 4 次元空間で定義される動的相関関数を効率的に測定することができます。図 2 では、マルチフェロイック物質 $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ のスピン・モデルを決定することにより、磁気異方性の起源が Nd イオンの結晶場であることが明らかとなりました [3]。この実験では、試料の入射中性子エネルギー(E_i)を 10 meV としており、0.4 meV 程度の高いエネルギー分解能で実験を行うことができたため、磁気 Γ 点での異方性ギャップの大きさを見積もることもできました。

効率的な測定が可能となった一方で、収集されるデータ量は膨大になりました。これらのデータを解析するためのソフトウェア開発に、中性子施設は大きな貢献をしました。また、測定 q 空間を広げるための検出器増設にも貢献しました。

E_i を大きくすれば、より高いエネルギーの励起を観測することもできます。図 3 は、ブリージングパイロクロア物質 $\text{Ba}_3\text{Yb}_2\text{Zn}_5\text{O}_{11}$ の中性子スペクトルです。 $E_i = 150\text{meV}$ で実験を行ったので、固有エネルギーが 68 meV, 55 meV, 38 meV の結晶場励起を観測することができました [4]。これにより、Yb イオンの基底波動関数を決定することができました。原子炉中性子では 70meV 以上の中性子を作るにはホットソースとよばれる特殊な装置が必要となるため、これまであまり実験されてきませんでした。J-PARC が稼働してから、結晶場の中性子実験が国内で簡単にできるようになりました。

HRC の特徴の一つは、0.6 度の低角まで散乱実験が可能であることです。これによりたとえば、粉末強磁性試料の Γ 点近傍のスペクトルが測定可能となり、中性子研究の幅が大きく広がりました [5]。

- [2] 弧の中心角は、現在の HRC では 90 度となっておりますが、予算に応じて、最大 120 度まで広げることが可能となっております。皆様のご支援をよろしくお願いいたします。
- [3] S. Hayashida, M. Soda, S. Itoh, T. Yokoo, K. Ohgushi, D. Kawana, H. M. Ronnow, and T. Masuda, *Phys. Rev. B* **92**, 054402 (2015).
- [4] T. Haku, M. Soda, M. Sera, K. Kimura, S. Itoh, T. Yokoo, T. Masuda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 034721 (2016).
- [5] S. Itoh, Y. Endoh, T. Yokoo, S. Ibuka, J-G. Park, Y. Kaneko, K. S. Takahashi, Y. Tokura and N. Nagaosa, *Nature Communications* **7**, 11788 (2016).
- [6] S. Hayashida, O. Zaharko, N. Kurita, H. Tanaka, M. Hagihala, M. Soda, S. Itoh, Y. Uwatoko, and T. Masuda, *Phys. Rev. B* **97**, 140405 (2018).



に話したら OK でした。彼は私のルームメイトが Gary T. Horowitz なのではちょうど良いと言っていました。Gary は Chicago で最初に会った同級生で、すぐに親友になり一緒に旅行などもしました。お前のおじさんは Vladimir Horowitz かと聞いたらそうだとっていました。彼が現在 Santa Barbara にいる著名な String, Blackhole の研究者です。そうこうしているうちに学科主任がやってきて、今度 Kadanoff という有名な人が Chicago に来るが、その人と仕事をしてはどうかと言ってくれました。私はその当時、Kadanoff という名前を知りませんでし、何をやる人だかも知りませんでした。有名ならそれでいいという程度の認識で、学生にしてもらいました。

このような経過で Kadanoff の指導を受けることになるのです。最初の問題は古典スピンモデルの相転移をくりこみ群により解析することでした。ここで見放されては大変だと思い、本当に真剣に取り組みました。3 ヶ月ぐらいで最初の論文を書くことができました[3]。その次の問題が大変でした。その当時、Sato-Miwa-Jimbo の Ising model の相関関数の理論が提案され、それが統計力学のトップの人たち、例えば Michael Fisher などに熱狂的な期待を持たれていました。それに沿って Ising Model の相関関数を計算せよという事でした。ところが Sato-Miwa-Jimbo の論文は連続してありましたが、どれも極めて難解で、どうしたら良いか解りませんでした。それでも 1 年間必死になって頑張りましたが、3 点相関関数をかろうじて計算できただけで、まるっきり行き詰まってしまいました。それで Kadanoff と共著の「SMJ's Analysis of Ising Model Correlation Function」という半分 review の論文を Annal. of Phys. に出版しました[4]。この結果は不十分でしたが、その分野の第一人者たちからは注目されました。Michael Fisher からも質問の手紙が来ました。(当時は e-mail がなかったのです。)後になって分かってきたのですが、そのような人たちは私の名前を初めて覚えてくださったようです。SMJ 理論はこの後、結果を出すことができず、忘れられることになりました。結局、Ashkin-Teller model という二次元古典スピン系の相転移、臨界現象の研究により、1981 年 Chicago 大学より Ph D を取得しました。このモデルの中には Kosterlitz-Thouless 転移もありました[5]。

この後、ポストドクとして Whashington 大学で Thouless と研究をすることになります。ここでまた自分よりはるかに優れた人と接することになるわけです。ここで

Thouless が Hofstadter 問題に興味を持っていたことが大きな幸運になりました。当時、Wannier function でよく知られている Gregory Wannier が Oregon 大学にいて、私が着任する前に Washington 大学でセミナーをしたそうです。Wannier は Douglas Hofstadter の Ph D 指導教官で、有名な Hofstadter's butterfly は博士論文によるものです。Wannier は Hofstadter 以前に重要な論文を残しています。

1980 年に量子ホール効果が発見されました。その驚異的な精度のホール電導度は、それまでの物性物理の常識の範囲を超えるものでした。このような状況の中、実際の半導体界面からはかけ離れていますが、ある意味理想的な Hofstadter におけるホール効果を調べるのは意味があることだと思いました。その研究の成果が Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs 共著の TKNN 論文です[6]。この経緯は物理学会誌に書きました[7]。

そして私は Illinois 大学へ移りますが、そこでまず大野さんと高分子のくりこみ群による研究を行い、大変な計算でしたが論文を 3 本書くことができました[8]。それから Hofstadter 問題に戻り、それを表す次元準周期 Harper 方程式の金属、絶縁体転移をスピン系の相転移との類推で調べました[9]。ここで金属相というのは、すべての波動関数が広がってる相で、絶縁相というのは、すべての波動関数が局在している相をいいます。論文を書いて提出したら、すぐに Cal Tech の数学者 Barry Simon から電話がかかってきて、お前の論文は間違っていると、まくし立てられました。それから手紙のやり取りと電話で議論をしました。結局、数学者の定義に従っているかどうかだけの問題でしたので、私にとってはどうでも良いことでした。数学者は何しろ定理を証明しなくてはいけないので、準周期そのものに正面から取り組まざるを得ません。私のような物理学者が考えるようにまず周期系を調べその極限としての準周期系を考える、そして必要なら数値計算の助けを得るという感覚は、彼らには馴染みのないことです。Simon は色々と名前をつけるのが好きで、準周期 Harper 方程式を Almost Mathieu 方程式と名付けています。これは Harper 方程式が、特殊関数論で有名な Mathieu 方程式を離散化したように見えるからです。Almost というのは、quasi periodic というところを数学者はよく almost periodic というからです。Almost Mathieu 方程式は数学者にはよく知られていて、多くの研究がなされています。



ので、その回転は仮想磁場です。仮想磁場をトーラス上で積分するので、Chern 数はトーラス内部の(符号付きの)磁気モノポールの数と考えられます。このように Dirac モノポールとのアナロジーがあります。(Dirac モノポールの底空間は球)

これらのことを詳しく記述したのが 1985 年の Ann. of Phys. 論文です[13]。この結果は、Hofstadter という一つのモデルにとどまらず、それが新しいトポロジカル量子物性のパラダイムの基礎につながったようにも思えます。

その当時私は、電子状態にねじれがありそれがトポロジー非自明であるというような考え方は、興味深いことではあることではあるが、それほど重要だと思っていませんでした。その原稿を TKNN 論文の解説ぐらいに思って、SMJ 論文の時と同じように、Ann. of Phys. に投稿しました。その原稿が Editor から漏れたようで、著名な素粒子論の研究者たちが論文を送ってきました。Roman W. Jackiw だったかもしれません。それでは少しは面白いのかという感想を持ちました。実はこの原稿を事前に Thouless へ送りました。もし彼がトポロジーの観点から量子ホール効果を見るということに同意して、それに何か付け加えることがあれば、共著にしても良いと思ったからです。彼のコメントは、液晶の texture にアナロジーがあるとのことでしたが、私にはよく解りませんでした。超電導渦、超流動渦、格子欠陥などでは、実空間でそのものが観測量になっています。量子ホール効果では波動関数がねじれています、波動関数は直接見えるものではありません。物理量としてホール伝導度が、その波動関数から、非常に非自明に求められるものです。

のちに Niu-Thouless-Wu の論文があります。これは量子ホール系の多体波動関数をひねった境界条件の元で考えています。異なる境界条件で積分する(平均化する)ことでトポロジー不変量が自然に出て来ます。この論文の受理は 1984 年 9 月 21 日で論文[14]の受理(1984 年 3 月 27 日)の半年後です。はじめ、TKNN 整数が Chern number になることを理解しなかったにも関わらず、半年以内に論文が出たのを不思議に思いました。そこで Yon-Shi Wu にその間の事情を聞きました。彼によると、彼と Thouless の学生だった Qian Niu の共同研究が始まり、その成果を原稿にしました。Thouless は不在で、彼が帰ってきたとき、Niu が許可を求めるために、Niu-Wu の原稿を渡した。そ

れに Thouless は手直したそうですが、どうして共著になったのかわかりません。その時には、Thouless が原稿を読んでトポロジカル不変量、Chern number を認めたと推察されます。

その後 10 年ぐらい経って Thouless の退職記念の会議が Seattle で盛大に行われました。そこで Thouless の講演を聞きました。主に TKNN に関してでしたが、トポロジーに言及することはなく、Nightingale と den Nijs の貢献を強調していました。

1984 年に Utah 大学に移りました。すぐ Dan Mattis がやってきて Haldane gap の話を始めました。その数年前、F. Duncan M. Haldane がまだ University of Southern California にいた頃、そこにいた真木和美さんと一緒に彼の話を聞きました。Higher spin の話ですが、私は、その頃古典スピンのことばかりやっていたし、また量子スピンは $1/2$ だと思っていたので、その重要性はまるで気がつきませんでした。それで Haldane にそれは何か実験に関係あるのかと質問しましたが、いやな顔をしていました。

真木さんをその後 Utah に招待して、講演のあとスキーなどをしました。Salt Lake City には有名なスキー場がたくさんあり、のちに冬季オリンピックの会場になりました。真木さんとは、またその後白石さん、森田さんと銅酸化物高温超伝導体の量子渦を研究することになります[14]。

そのようなことで Haldane gap にはあまり興味がなかったのですが、Mattis が Lieb-Schultz-Mattis 論文の関連する部分のコピーを持ってきて、Haldane gap が存在しないことを証明しろというのです。仕方がないので、しばらく式をいじってギャブレスの新しい状態を作りました。Mattis は喜んで早速論文を書き始めました。私はその新しい状態が基底状態と直交しなければいけないで、確かめる必要があることを Mattis に言いましたが、それは大丈夫だという答えでした。しかし心配になり、確かめてみたのですが、確かにスピンの場合は直交するのですが、整数スピンの時は直交しないのです。この場合は新しい状態というのは、基底状態そのものだということです。それでしらけてしまい、Haldane 問題を忘れてしまいました。しかしながら、よく考えるとスピンの半整数と整数の時の様子が違うことは、重要な結果です。さらに半整数



ブロッホ電子の研究を行いました。彼の主な業績は境界のある格子に磁場をかけた系を研究したことです。境界にある電子によるホール伝導度と、バルクによるホール伝導度が等価であることを示しました。現在のトポロジカル絶縁体、トポロジカル超電導などの研究において、境界における現象は、中心的な役割を果たします。初貝さんの研究はこれらの先駆けとなるものです。

押川さんとは共著の論文がありません。しかしそれに近かったことがあります。1994 年ごろ押川さんが私の研究室にやってきてカイラルフェルミオンを格子上で定義する困難性を明確にしたニールセン・二宮の定理と量子ホール効果の関連について話し始めました。その時はあまりよく解らなかったので、あとでよく教えてもらおうと思っていました。少し時間がたったある日、隣の部屋に行ってみると押川さんがパソコンの前に座って論文を書いていた。のぞいてみるとなんと著者に私の名前がのっていました。なんの貢献もしていないので、残念ながら共著を辞退しました。それが M. Oshikawa, Quantized Hall conductivity of Bloch electrons: Topology and the Dirac fermion Phys. Rev. B 50, 17357(1994)です。これは現在のトポロジーによる物性物理につながる内容を含んでいます。このようなレベルの高い論文は大変印象的でした。

佐藤さんは 1999 年に助手として来ていただきました。江口徹さんの推薦です。私が Chicago 大学の大学院生だった頃、南部先生がいらっしゃり江口さんは Assistant Professor でした。お二人とも親しくさせていただいたのですが、さすがに南部先生は恐れ多くて物理の議論はしませんでした。しかし江口さんとはよく議論させていただきました。素粒子論出身の人が物性物理において顕著な業績を上げるのは日本ではあまりないことですが、アメリカではそのような例が少なからずあります。私が直接知っているのは Yong-Shi Wu, Shoucheng Zhang, Xiao-Gang Wen などの人たちです。ですから佐藤さんに関しては期待することはあっても心配することはありませんでした。事実彼はトポロジーによる物性物理で顕著な業績を上げています。これには素粒子論のバックグラウンドも大いに役立っていると思います。それに加えて佐藤さんは、研究室で行ってきた院生の指導、研究にも力を尽くしてくれました。その例は分子モーター[16]、化学ゲル[17]、Rashba model[18]、グラフィン[19]、カントールセット中の光の伝搬[20]などです。

私が初めて Shoucheng Zhang と Xiao-Gang Wen に会ったのは、1987 年 Santa Barbara の KITP でした。当時私は準結晶のワークショップで長期滞在していました。彼らは Ph D を取り立ての若いポストドクでした。その当時は高温超伝導フィーバーが始まっていて、準結晶は少し下火になりました。ある日、廊下を歩いていたらいきなり Robert Schrieffer がやってきて彼の spin bag モデルのことをまくしたててきました。あまり良く解らなかったのでしたが、偉い先生が言うのでそれなりの理論ではないかと思っていました。これに Zhang と Wen が飛びつき共同研究が始まりました。これが彼らが物性物理に転向するきっかけになったのでしょうか。Shrieffer-Wen-Zhang の失敗作になるのです。(他のほとんどすべての理論がそうであるように。)また Zhang から Utah 大学に招待して欲しいと頼まれたので、コロキウムをしてもらいました。これが彼の初めての公式講演でした。このあと日本から Stanford 大学に数回訪問しています。

Santa Barbara では Jaques Friedel にも出会いました。あるセミナーの前、椅子に座っていたら隣に Friedel が座ってきました。偉い先生がそばに来たので敬遠したかったのですが、いきなり何を研究しているかと聞かれ、のちに議論させていただきました。RVB 状態中のホールの振る舞いを調べていたのですが、これも高温超伝導フィーバーに巻き込まれていたからです。論文を書いて彼に見せました。序文で高温超伝導では、これまで解明されていなかった強相関が本質であるとしたのですが、このことが気に入らなかったようです。彼は BCS 理論を高度に拡張することにより高温超伝導を理解できると言う立場でした。翌年パリに招待してくださり数ヶ月滞在しました。しかし Friedel は、科学アカデミーや政府の仕事などで忙しく、物理の議論はできませんでした。もっばら Gilles Montambaux と議論して、3 次元の量子ホール効果の研究を行いました[21]。日本に帰ってしばらくしてしてから Friedel との手紙のやり取りによる共同研究が始まり、それが 10 年以上続き、4 本の高温超伝導に関する論文があります[22]。しかしそれらは残念ながらあまり成功したとは言えません。しばしばパリを訪問して、2014 年に亡くなるまで非常に親しくさせていただきました。

2016 年度のノーベル物理学賞は、ワシントン大学の David J. Thouless(1/2)、プリンストン大学の F. Duncan



- lying Excitation around a Single Vortex in a D-Wave Superconductor, *Europhys. Lett.* 40, 207 (1997).
- [15] M. Kohmoto and B. Sutherland, Electronic States on a Penrose Lattice, *Phys. Rev. Lett.* 56, 2740 (1986).
- [16] H. Miki, M. Sato, and M. Kohmoto, Motion of Molecular Motor and Chemical Reaction Rate, *Phys. Rev. E* 68, 61906 (2004).
- [17] K. Ohira, M. Sato, and M. Kohmoto, Fluctuation in Chemical Gelation, *Phys. Rev. E* 75, 041402 (2007).
- [18] D. Tobe, M. Kohmoto, M. Sato, and Y.S. Wu, Distribution of Spectral-Flow Gaps in the Rash Model with Disorder: Universality, *Phys. Rev. B* 75, 245203 (2007).
- [19] K. Esaki, M. Sato, M. Kohmoto, B.I. Halperin, Zero Mode, Energy Gap, and Edge States of Anisotropic Honeycomb Lattice in a Magnetic Field, *Phys. Rev. B* 12, 5405 (2009).
- [20] K. Esaki, M. Sato, and M. Kohmoto, Wave Propagation through Cantor-set Media: Chaos, Scaling, and Fractal Structures, *Phys. Rev. E* 79, 056226 (2009).
- [21] G. Montambaux, and M. Kohmoto, Quantized Hall Effect in Three Dimensions, *Phys. Rev. B* 41, 11417 (1990).
- [22] J. Friedel and M. Kohmoto, On the Nature of Antiferromagnetism in the Co₂ Planes of Oxide Superconductors, *Euro. Phys. J. B* 30, 427 (2002).

2018 年現在、

citations: 14,000

h-index: 49

i10-index: 105.



第 23 回日本物理学会論文賞を受賞して

量子物質研究グループ 中辻研究室 助教 酒井 明人、教授 中辻 知

この度、幸いにも第 23 回日本物理学会論文賞を受賞いたしました。受賞対象となった論文は「Kondo Effects and Multipolar Order in the Cubic $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)」です。以下では研究内容を簡単に紹介したいと思います。

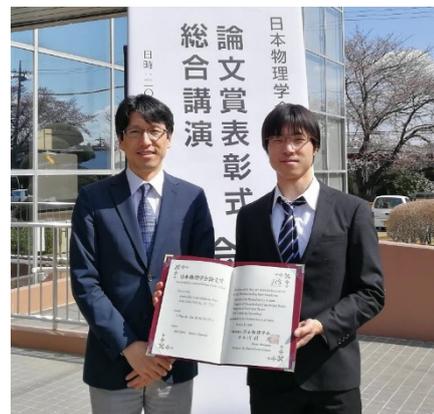
強相関 f 電子系は非フェルミ液体や重い電子超伝導など多彩な現象を示すため多くの研究がなされてきました。これらの現象には伝導電子が局在 f 電子のスピンを遮蔽する近藤効果が重要な働きをしています。一方、局在電子が軌道(電気四極子)自由度を持つ場合、通常近藤効果とは異なり、過剰遮蔽により非フェルミ液体を引き起こす四極子近藤効果(2 チャンネル近藤効果)が起きることが理論的に期待されていました。しかし現実の物質で何が起きるかは理解が進んでいませんでした。このような四極子の研究をするためには立方晶 f^2 物質で実現する、スピンを持たない非磁性 Γ_3 結晶場基底状態が最適です。これまで Pr (プラセオジウム)化合物などでこの Γ_3 状態は見つかっていましたが、混成効果が強いとはっきりわかる物質はありませんでした。また最初に理論的に実現が予言された U (ウラン)化合物では、混成は強いものの結晶場状態が明確に定まらないという問題点がありました。

$\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)は立方晶であり、 Pr を 16 個の Al が取り囲む籠状構造になっています。伝導電子を与える多くの Al が近くにいるということは、それだけ混成のチャンスが増えるため混成が強くなることが期待できます。またスピンを持たない Γ_3 状態が実現し得る立方晶物質でもあります。この物質群は結晶構造のみ知られておりましたが、詳細な物性はわかっておりませんでした。我々はフラスコ法により純良単結晶を合成し、様々な低温物性測定を行いました。その結果、 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)が非磁性 Γ_3 結晶場基底状態を持ち、かつ混成が強い初めての物質であることを明らかにしました。具体的には磁化率が低温で飽和傾向を示し(ヴァン・ヴレック常磁性)、エントロピーが $R \ln 2$ で飽和傾向を示すことから非磁性 Γ_3 二重項基底状態であること、電気抵抗率が $-\ln T$ で上昇する近藤効果を示すことから混成が強いことを示しました。さらに $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ が 2.0K で強四極子秩序を、 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ が 0.6 K で

反強四極子秩序を示すことを明らかにしました。以上の結果は後に中性子散乱、弾性定数、光電子分光、NMR など様々な実験によっても確認されています。

さらに興味深いことに $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ではフェルミ液体的振る舞いが見えているのに対し、 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ では電気抵抗、比熱、磁化などで非フェルミ液体的な振る舞いが観測されました。この違いは Ti を V に変えたことによる化学的圧力・電子数の増加により、混成が強くなったことに起因すると考えられます。実際に結晶場比熱のピークは $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ のほうがよりブロードであり強い混成を示しています。また、後に行われた $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の静水圧力下の測定では電気抵抗率が $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の常圧のものと同様の振る舞いを示すことも確認されています。

この論文の発表の後、極低温での超伝導の発見、高圧下重い電子超伝導の発見など実験的進展に加え、四極子近藤格子系の理論計算など理論の発展もありました。また最近では混成による新たな秩序状態の可能性が指摘されるなど、興味が尽きません。そもそも、強相関電子系において多極子の自由度がどのように局在状態から遍歴状態に移り変わるのかは、理論的には全く不明なことが多いのが現状です。一方で、我々の系の実験研究を通じて、その局在・遍歴の転移の過程で、新しい金属状態や超電導状態、さらには、新規多極子秩序など、エキゾチックな量子状態の宝庫であることがわかってきています。我々の発見した系の量子物性の開拓が、多極子伝導系の理解の進展に少しでも寄与できるように、ますます研究に励んでいきたいと思っております。



Kumai, H. Nakao, K. Kobayashi, Y. Murakami, and H. Mori*, Nature Commun., 4, 1344(1-6) (2013). (Web of Science: 58 回引用)



平成 29 年度日本化学会学術賞の表彰式。



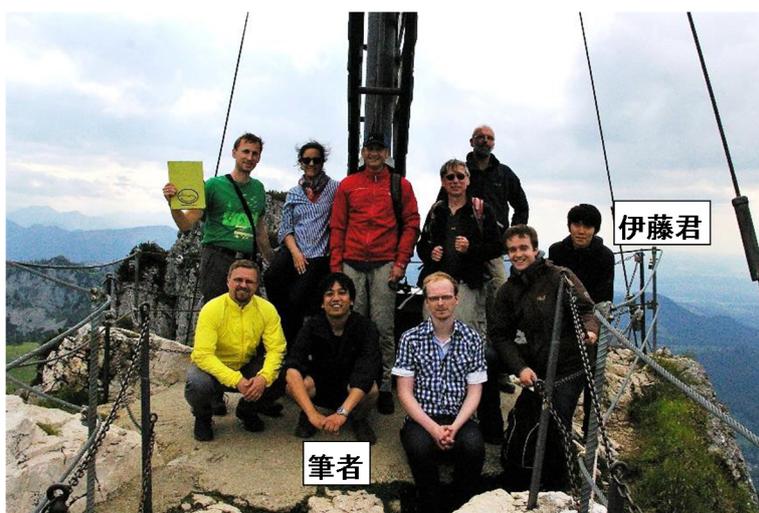
のコツは、ポンプ光を中赤外領域(MIR, ~300 meV)にして表面バンドの共鳴光学遷移を使うことでした。私の狙いは的中で、ディラック電子の光電流が発生している瞬間を非常に明瞭に捉えることに成功しました[2]。そして、MIRの偏光で光電流の制御に成功するまでに時間はかかりませんでした [Kuroda et al., PRB 95, 081103(R) (2017).]

超短パルスレーザーのドイツ修行の後、2015年4月に物性研近藤猛先生の研究室助教として着任しました。非常に丁度よいタイミングで、軌道放射施設助教の矢治さんが開発したレーザーSpin分解 ARPES(SARPES)装置が動き出していました。私は、大学院生時代に SARPES をやっていたことから、このグループに参加させていただきました。ドイツの光電流測定で、波長板をぐるぐる回してばかりやっていたので、レーザーSARPES でも波長板をたくさん回そうと思ったのがきっかけで、3番目の研究が始まりました。これも中々で、波長板をぐるぐる回すと、それに併せて光電子のSpinもぐるぐる回る姿を観測しました[3]。装置が驚くほどに安定していたので、データの質は間違いなく世界一で、そしてシンプルかつビューティフルな実験を行えました。この研究に対して、EPFLのHugo Dill先生には“I like this experiment.”と国際会議のいたるところで宣伝して頂いております。

物性研究所の助教に着任してから3年半が経ちました。今回の受賞そしてそれに至るまでの経緯から、「実験データが人を成長させる」が私に当てはまると強く思います。それには、シンプルかつビューティフルな実験データが必要で、

素晴らしい実験装置が必要でした。それができる恵まれた環境にいた、私は非常にラッキーな人間だと思います。そして今、共同利用施設のスタッフで学生指導している教員の立場になりました。是非、学生方にこれを味わって、楽しんでもらいたいと思っています。そしてそのために、私は良い装置を作らねばなりません。この願望を抱きつつ、物性研小林研が開発した10.7eV高次高調波と上記SARPESを繋いだ時間分解SARPESの装置開発を始めました。まずは、完成まで突っ走る、これが今私の最大の喜びです。

- [1] "Hexagonally Deformed Fermi Surface of 3D topological Insulator Bi₂Se₃", K. Kuroda, M. Arita, K. Miyamoto, M. Ye, J. Jiang, A. Kimura, E. E. Krasovskii, E. V. Chulkov, H. Iwasawa, T. Okuda, K. Shimada, Y. Ueda, H. Namatame and M. Taniguchi Phys. Rev. Lett. **105**, 076802 (2010).
- [2] "Generation of Transient Photocurrents in the Topological Surface State of Sb₂Te₃ by Direct Optical Excitation with Midinfrared Pulses", K. Kuroda, J. Reimann, J. Gdde, and U. Hfer, Phys. Rev. Lett. **116**, 076801 (2016).
- [3] "Coherent control over three-dimensional spin polarization for the spin-orbit coupled surface state of Bi₂Se₃", K. Kuroda, K. Yaji, M. Nakayama, A. Harasawa, Y. Ishida, S. Watanabe, C.-T. Chen, T. Kondo, F. Komori, and S. Shin, Phys. Rev. B. **94**, 165162 (2016).



2017年6月にドイツで開催された Ultrafast Surface Dynamics 10でHfer先生達と登山に行ったときの写真。下段左から二番目が筆者。一番右が、松田(巖)研学生の伊藤俊君。

上段左から4番目がHfer先生。その後ろにいるのが、マールブルグ大学滞在時にお世話になったGdde先生。

平成30年度文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞して

物質設計評価施設 廣井 善二

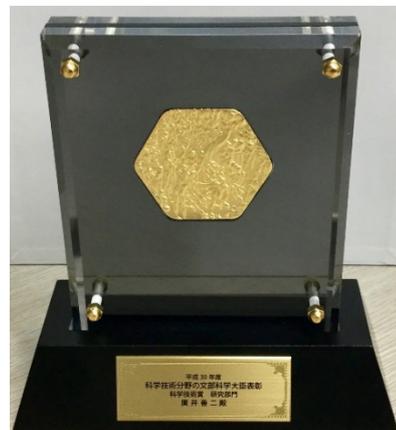
この度、研究業績「新奇超伝導体および量子磁性体の物質探索に関する研究」により、平成 30 年度文部科学大臣表彰の科学技術賞を受賞しましたので、その報告をさせていただきます。本賞は科学技術に関する研究開発、理解増進等において顕著な成果を収めた者に与えられるものであり、4 つの部門(開発部門、研究部門、科学技術振興部門、技術部門、理解増進部門)に分かれています。私が受賞したのは研究部門であり、我が国の科学技術の発展等に寄与する可能性の高い独創的な研究又は開発を行った者に与えられるものです。本年度は 137 件の応募があり、43 件が選ばれました。このような栄えある賞を頂くことは大変な光栄であり、文科省の関係者の方々や選定委員会の先生方に御礼申し上げます。

授賞式は平成 30 年 4 月 17 日に文部科学省において、林芳正文部科学大臣のご臨席のもとに行われました。写真はその時のものであり、賞状と一緒に立派な盾を頂きました。不謹慎で済みませんが、当日ちょっと面白かったのは、林大臣が壇上でお話を始めると、周りのおじさん達が一齐にスマホで写真を撮り始めたことです。皆さん、お若い。さらに式が終わると、大勢が壇上へと列をなし、各機関の広報と思しきカメラマン達による写真撮影会が始まりました。私の写真はたまたま出会った知り合いとの相互スマホ撮りです。

さて、今回の受賞には応募当時に所長をされていた瀧川先生をはじめ多くの方々のお世話になりました。特に、総務係におられた竹山牧子さん(現在は新領域創成科学研究科人事担当)には申請書類を丁寧に査読してもらい、適確なコメントを頂きました。この賞のように対象が全学問分野に渡る場合には、専門外の人に如何にアピールできるかが重要になると思われれます。その意味で、竹山さんのフレッシュな目を通して感じたことを率直に指摘してもらったことが受賞の大きな原動力となりました。感謝です。

この種の文章では受賞業績について書くべきなのですが、簡単におきます。要するに、1998 年以前の京大時代とそれ以降の物性研での新物質開発を通して得られた成果を、合わせ技で評価して頂いたものと認識しております。その全てがこれまで研究室に在籍した学生さんとス

タッフの方々、および、一緒に研究を楽しんできた共同研究者によるものです。この場を借りて心から感謝します。私の寄与ははっきり言ってほとんどありませんが、居なくなると研究室が消滅するのでゼロでもありません。定年を迎える 2026 年 3 月まであと 7 年半となり、残された時間で何をすべきか、何ができるか思案中の今日この頃です。まあ、「適当」に頑張っていく所存ですので、今後とも皆様のご協力の程、何卒よろしくお願い申し上げます。



文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞して

極限コヒーレント光科学研究センター 和達 大樹

この度、平成 30 年度文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞する栄誉に恵まれました。本受賞の対象業績となった「共鳴軟 X 線散乱による遷移金属酸化物の新しい秩序状態の研究」は、ブリティッシュコロンビア大学の研究員であった頃に開始し、現在まで継続しているものです。ここに全ての共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。

遷移金属化合物は、高温超伝導、巨大磁気抵抗効果、マルチフェロイック性、金属絶縁体転移などの興味深い性質のために、多くの興味を集めている系です。多彩な性質の背景にはほとんどの場合、電荷/スピン/軌道の秩序現象が起こっており、このような秩序現象をどのように観測するのが、現在の物性物理学において大きなテーマとなっています。X 線回折は古くから用いられてきた実験手法であり、X 線は主に物質中の電子の電荷に散乱されることから、物質の結晶構造や格子定数の決定に用いられてきました。一方で、軌道やスピンの秩序を観測するために開発されてきたのが共鳴軟 X 線回折です。

例えば、Mn 3d 状態に直接アクセスできるように、Mn の 2p から 3d の吸収端のエネルギーを用いた X 線回折が、共鳴軟 X 線回折です。Mn の 2p から 3d の吸収端のエネルギーの X 線が吸収され、Mn 2p の電子が 3d の非占有状態に遷移します。励起された Mn 3d の電子は Mn 2p に残ったホールと再結合し、X 線が放出されます。その結果、始状態と同じ状態となります。ここで、Mn 2p の内殻がスピン軌道相互作用によって 2p_{3/2} と 2p_{1/2} に 10 eV 程度分裂していることが原因で、X 線でも磁気的なシグナルが得られることとなります。

共鳴軟 X 線回折は強力な実験手法ですが、これまではよく知られた典型物質の秩序を軟 X 線で測定しなされたような研究例が多く、新しい物理的な情報には乏しい面がありました。私は、共鳴軟 X 線回折により、新しい秩序状態の観測や、新しい物理描像に到達することができました。典型的な研究例としては、巨大磁気抵抗を示す新しいコバルト酸化物 SrCo₆O₁₁ の共鳴軟 X 線散乱により詳細な磁気構造を決定しました[1]。磁化が磁場の関数として 1/3 プラトーを示すことから、3 倍周期の磁気構造のみが期待されていましたが、実際にはほとんどすべての分数のピーク

が存在し、すなわちほとんどすべての磁気周期が共存する状態であることを解明しました。これは多くの磁気周期が近いエネルギーを持つ「悪魔の階段」状態であり、3d のスピン系では初めての悪魔の階段の発見となりました。

最近では、SPring-8 にある東京大学物性研究所の軟 X 線ビームライン BL07LSU において、時間分解型の測定に取り組んでいます。例えば図 1 のように、レーザー照射により鉄白金薄膜の磁化が消える消磁のダイナミクスを明らかにしました[2]。今後は X 線自由電子レーザーを用い、ピコ秒以下の領域のさらなる時間分解能の高い測定につなげたいと考えています。

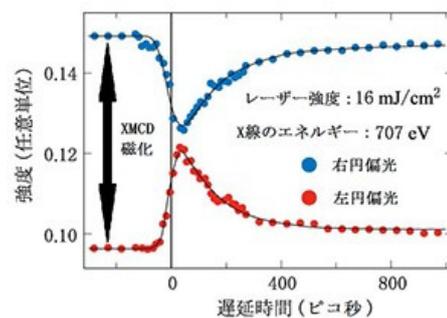


図 1: 時間分解測定で観測された鉄白金薄膜の磁化の時間変化のダイナミクス。

- [1] “Observation of a Devil's Staircase in the Novel Spin-Valve System SrCo₆O₁₁”, T. Matsuda, S. Partzsch, T. Tsuyama, E. Schierle, E. Weschke, J. Geck, T. Saito, S. Ishiwata, Y. Tokura, and H. Wadati, Phys. Rev. Lett. **114**, 236403 (2015).
- [2] “Capturing ultrafast magnetic dynamics by time-resolved soft x-ray magnetic circular dichroism”, K. Takubo, K. Yamamoto, Y. Hirata, Y. Yokoyama, Y. Kubota, Sh. Yamamoto, S. Yamamoto, I. Matsuda, S. Shin, T. Seki, K. Takanashi, and H. Wadati, Appl. Phys. Lett. **110**, 162401 (2017).

外国人客員所員を経験して

Ying RAN

Boston College, Chestnut Hill, MA 02467, USA

ying.ran@bc.edu

I met Prof. Oshikawa for the first time in 2008 when he visited UC Berkeley where I was a postdoc scholar. Of course I knew his work even before that since Prof. Oshikawa made many deep contributions in quantum condensed matter theories. These include his generalization of the Lieb-Schultz-Mattis theorem to higher dimensions and his work on one-dimensional symmetry protected topological phases. More recently, due to the fast developments in topological states of matter, I had interacted with Prof. Oshikawa in many workshops, as well as during his visit to Boston College in Fall 2017. I learned a lot of physics from numerous discussions with him and we collaborated together with Yuan-Ming Lu at Ohio State University in a work: the quantized Hall conductivity constrained by the magnetic translation symmetry.

While I visited Japan a few times previously for conferences, my stay at ISSP as a visiting professor from Jan 2018 to Apr 2018 during my sabbatical leave gave me the first opportunity to deeply interact with the scientific community in Japan. ISSP has an impressive record of contributions in quantum condensed matter physics and topological states of matter. For instance, apart from theoretical experts, experimental experts at ISSP have revealed new correlation-driven Weyl semimetal materials, for instance, Mn_3Sn (Prof. Nakatsuji's group).

My stay in ISSP had a wonderful and memorable experience in terms of both science and culture. I joined the seminars as well as the informal after-lunch discussions in Prof. Oshikawa's group. During these discussions I interacted with a lot of young talented scholars who work on various interesting projects, such

as solving the sign-problem in quantum Monte Carlo and new field-theoretical ways to view Lieb-Schultz-Mattis constraints. I had inspiring discussions and exchanged ideas with other members at ISSP, including Prof. Nakatsuji and Prof. Kawashima. In addition, I had the chance to meet with many visitors to ISSP, including scholars from other institutions in Japan, as well as international visitors. I also participated in the workshop "Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology". All these demonstrate the dynamical research environment in ISSP.

As a consequence of these interactions, together with Prof. Oshikawa and Dr. Haruki Watanabe, we initiated some exciting new projects during my stay. One project is about using optics as a probe for dynamics in novel states of matter in strongly correlated materials. Another project is on algebraic ways to diagnose and generalize Lieb-Schultz-Mattis-type constraints.

I find myself very comfortable embedded into the Japanese culture. In fact, I grew up watching many Japanese cartoons which were my favorites. I also happened to visit ISSP during the beautiful spring season: participated in two bike tours organized by Prof. Oshikawa, I witnessed the spectacular plum and cherry blossoms.

I would like to thank ISSP for giving me this wonderful opportunity. I also would like to thank Yasuhiro Tada, Masahiko Yamada, Atsuko Tsuji and Yuko Ishiguchi for their warmhearted help during my stay.

物性研究所短期研究会

「新世代光源で切り拓く物質科学と生命科学の融合領域」の報告

報告者：松田 巖（東京大学物性研究所）

期間：2017年3月7日(火)

場所：東京大学物性研究所 6階 大講義室

webpage: http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/workshop2017_3/index.html

提案代表者：松田 巖（東京大学物性研究所）

共同提案者：有馬孝尚（東京大学放射光分野融合国際卓越拠点）

原田慈久、辛 埴、小森文夫、和達大樹（東京大学物性研究所）

X線放射光分光・回折の測定技術が著しく発展し、最近では固・液・気体及び各界面における様々な現象の「その場」観測が実現してきた。新世代放射光光源ではさらにナノスケールの微小光スポットの生成やエネルギー分光の高分解能化なども同時に達成し、今後より精密かつ多角的な物性測定が可能となる。これらの先端計測技術はこれまで物質科学の先端研究を中心に利用されてきたが今後は生命科学分野にも大きな応用展開が期待される。そこで各分野の一線で活躍する研究者を招いた研究会を開催し、さらにSPring-8 BL07LSUの成果を報告するISSPワークショップ(開催日3月8日)を連日で催した。生命科学、物質科学、放射光科学の3分野の研究者が集い、融合領域にて展開すべき科学と技術を議論した。

短期研究会では「新世代光源と融合領域について」「生体関連物質」「バイオインスパイアード材料」のセッションを設けた。「新世代光源と融合領域について」のセッションでは、生命科学と物質科学の両分野で重要な「X線イメージング」と「大規模計算」が取り扱われ、さらに東北放射光計画の新たな光源性能による研究展開が提案された。「生体関連物質」のセッションでは、生体现象を分子レベルで解明する放射光実験及び量子化学計算を中心に議論が行われた。「バイオインスパイアード材料」セッションでは軟X線放射光分光と相性の良い「バイオ界面系」をメインピックとし、放射光に限らず近接場分光・プローブ顕微鏡など幅広い分野の研究者(海外招待講演者を含む)にご講演いただいた。本分野は放射光分野では比較的新しく、今後の探求すべきテーマと放射光を用いた具体的な実験アプローチが検討された。

新分野開拓を目指した珍しい短期研究会であったにも関わらず66名もの参加者が集まり、活発にご議論いただいた(図2)。本研究会後、参加者と物性研スタッフとの共同研究も開始され、実際の放射光実験もSPring-8 BL07LSUでも行われることとなった。今後、実験及び理論両方において生命科学と物質科学の融合は不可欠であり、本研究会は放射光分野における推進として大変意義高いものとなった。

最後に、本短期研究会の実施に際し、提案者らの研究室のスタッフおよび学生、さらにはSOR施設事務部の方など多くの方々からご協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。



図1 連日で行われた短期研究会(右)とISSPワークショップ(左)の報告書冊子



図2 集合写真(平成29年3月7日)

プログラム

Session 1 はじめに

【進行】松田 巖 (東大物性研)

-
- 10:20-10:25 全体趣旨説明
松田 巖 (東大物性研)

 - 10:25-10:30 所長挨拶
瀧川 仁 (東大物性研)

 - 10:30-10:35 来賓挨拶
高田 昌樹 (東北大多元研、SLiT-J-UC)

Session 2 新世代光源と融合領域について

【座長】虻川 匡司 (東北大)

-
- 10:35-11:05 光科学の新しい地平を拓く東北放射光計画
高田 昌樹 (東北大多元研、SLiT-J-UC)

 - 11:05-11:35 大規模第一原理シミュレーションが拓く機能物性研究
杉野 修 (東大物性研)

 - 11:35-12:05 X線位相イメージングの展望
百生 敦 (東北大多元研)

 - 12:05-13:10 昼食

Session 3 生体関連物質**【座長】原田 慈久 (東大物性研)**

-
- 13:10-13:40 鉄硫黄クラスターの生合成
藤城 貴史 (埼玉大)
- 13:40-14:10 生体内での一酸化窒素還元 of 分子機構
城 宜嗣 (兵庫県立大、理研)
- 14:10-14:40 イオンポンプ蛋白質に関わる量子化学計算の現状
恒川 直樹 (東大分生研)
- 14:40-15:10 光合成光化学系 II における可視光を利用した水分解の仕組み
沈 建仁 (岡山大)
- 15:10-15:25 記念撮影・休憩

Session 4 バイオインスパイアード材料**【座長】松田 巖 (東大物性研)**

-
- 15:25-15:55 複雑・生体界面の階層構造と機能
田中 求 (ハイデルベルク大、京都大)
- 15:55-16:25 DDS ナノ粒子の溶液中での精密構造解析
櫻井 和朗 (北九州市立大)
- 16:25-16:55 プローブ顕微鏡・近接場光学を用いたバイオ界面の解析
林 智広 (東工大)
- 16:55-17:25 バイオ界面のナノ構造が誘起するタンパク質吸着・細胞接着
高井 まどか (東大工)
- 17:25-17:30 閉会挨拶
豊島 近 (東大分生研)
- 17:40-19:10 懇談会物性研 6 階ラウンジにて



-----セッション 2-----

- 15:20-15:50 島村孝平 (神戸大学)
“非平衡不規則系における化学反応過程の理解を目的とした 第一原理分子動力学法の開発と応用”
- 15:50-16:20 榊原寛史 (鳥取大学)
“モデルマップ RPA 法の開発と多軌道系への適用”
- 16:20-16:50 奥村久士 (分子科学研究所)
“アミロイドペプタペプチドの凝集の分子動力学シミュレーション”
- 16:50-18:00 ポスターセッション
- 18:30-20:30 意見交換会 (ららぽーと花あかり)

2018 年 4 月 3 日 (火)

-----セッション 3-----

- 9:40-10:30 【特別講演】 溝口照康 (東京大学)
“機械学習、計算機シミュレーションおよび原子分解能計測による結晶界面解析”
- 10:30-11:00 【巻頭論文講演】 福島孝治 (東京大学)
“詳細つりあい条件を破るモンテカルロ・サンプリング法の現状”
- 11:00-11:30 中村統太 (芝浦工業大学)
“ガウスクーネル法を用いて生データから臨界点を求める、物理量を求める”
- 11:30-12:00 野村悠祐 (東京大学)
“機械学習を用いた量子多体系の基底状態計算”
- 12:00-13:00 昼食

-----セッション 4-----

- 13:00-13:30 【巻頭論文講演】 大久保毅 (東京大学)
“並列モンテカルロ法によるフラストレート磁性体におけるトポロジカル転移の探求”
- 13:30-14:00 大槻東巳 (上智大学)
“アンダーソン転移の高精度数値計算”
- 14:00-14:30 浅野優太 (ISSP)
“希薄高分子溶液のカルマン渦の分子動力学シミュレーション”
- 14:30-15:00 コーヒーブレイク

-----セッション 5-----

- 15:00-15:30 北尾彰朗 (東京工業大学)
“PaCS-MD によるタンパク質のダイナミクスと離合集散”
- 15:30-16:00 高江恭平 (東京大学)
“流体粒子ダイナミクス法の GPGPU 化”



- P-17 “GUI 支援ツール C-Tools による電子状態計算の実行経過時間の評価”
吉澤香奈子 (高度情報科学技術研究機構)
- P-18 “有限要素法を用いた解析接続によるグリーン関数の評価方法”
福田将大 (ISSP)
- P-19 “Peculiar honeycomb bonding structures in silicene and borophene revealed by the absolute binding energies of core electrons”
Lee Chi-Cheng (ISSP)
- P-20 “空間相関をもつランダム場イジング模型の臨界現象と有効次元の解析”
藤堂眞治 (東京大学)
- P-21 “OpenMX Viewer - a web-based crystalline and molecular graphical user interface program”
リーヨンティン (ISSP)
- P-22 “量子格子模型プログラムパッケージ HΦ による量子多体系の実時間発展”
山地洋平 (東京大学)
- P-23 “Kitaev の量子スピン液体の新たな広がりとは有限温度励起ダイナミクス”
山地洋平 (東京大学)
- P-24 “テンソルネットワーク法を用いた Kitaev 模型の基底状態の記述”
金子隆威 (ISSP)
- P-25 “スピン分解アンフォールディング法による表面ラッシュバ状態の解析”
山口直也 (金沢大学)
- P-26 “ハーフホイスラー化合物 CoMSb ($M=\text{Sc, Ti, V, Cr, Mn}$) における異常ネルンスト効果の第一原理的研究”
見波将 (金沢大学)
- P-27 “ Z_2 不変量の第一原理計算コードの開発と 2 原子層 $\text{Bi}(111)$ への応用”
澤端日華瑠 (金沢大学)
- P-28 “不十分な実験データを利用した結晶構造探索”
辻本直人 (東京大学)
- P-29 “スピントロニクス材料の原子構造、磁気状態、電子状態の解析”
小田竜樹 (金沢大学)
- P-30 “Potts 模型における弱い 1 次相転移の数値的診断について”
飯野隼平 (ISSP)
- P-31 “並列テンソルネットワーク法の開発と 2 次元量子スピン模型への応用”
大久保毅 (東京大学)
- P-32 “Zinc blende-like 型構造を持つ GaSe についての計算”
新田寛和 (北陸先端科学技術大学院大学)



物性研究所短期研究会

ガラス転移と関連分野の最先端研究

日時：2018年5月10日(木)～2018年5月12日(土)

場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)

研究会提案代表者：山室修(物性研)

共同提案者：田中肇(東大生産研)、金谷利治(KEK, J-PARC)、宮崎州正(名大院理)、早川尚男(京大基研)、
深尾浩次(立命大理工)、野寄龍介(北大院理)、中崎潤子(東工大物質理工)、新屋敷直木(東海大理)

ガラス転移は21世紀に残された物性物理学の最後のフロンティアと言われるほど魅力的なテーマである。それは、有限温度で液体の緩和時間が発散する(ように見える)という極めて異常な現象であると同時に、その状態に至るには無限大時間が必要というある種ロマンチックな困難さを伴うからであろう。近年、この緩和時間の問題に挑戦するいくつかの新しい方法も試みられている。実験的には蒸着法で低エンタルピー・高密度の安定ガラスを作成する方法、理論的にはランダムピンングで実効的なガラス転移温度を引き上げる方法などがこれにあたる。高温あるいは低圧からガラス転移に向かう際の顕著な変化の一つは静的・動的不均一性の成長であるが、この起源を解明するための種々の構造解析、誘電緩和測定、計算機シミュレーションなども盛んに行われている。また、蛋白質の動的転移、粉体のジャミング転移、スピングラス転移、電荷ガラス転移などの関連した現象も活発に研究されている。物質寄りに見れば、液体-液体転移などの観点で水は依然として興味深い対象であるし、イオン液体など新しいガラス形成物質も見つかっている。ガラス自身の物性としても、従来のボゾンピークなどの低エネルギー励起の問題に加え、エイジングや結晶化の問題も再注目されている。さらには材料科学や食品科学などの応用分野においても、ガラス転移の概念は重要である。

以上の様な状況において、ガラス転移に関わる実験、理論、計算機シミュレーションの研究者、さらには、蛋白質、粉体、固体物理などの周辺分野の研究者が一同に会し、現状を確認し合うとともに、将来の研究の方向について議論することは非常に有意義である。物性研では、2000年頃から3～4年に一度、国内最大のガラス関係の研究集会として、短期研究会を開催してきた。今回、3年ぶりに行う本研究会では、これまでの参加者以外にも、

新しい世代、新しい分野の研究者を加え、より包括的かつ将来に向けた議論を行うことを目的とした。

本研究会の特徴の一つは、講演者を招待講演者で固めるのではなく、世話人が推薦した一部の講演者を除き、大部分の講演者を一般募集することである。最終的に、口頭発表43件、ポスター発表45件が集まった。実験と理論の比率はほぼ半々である。できるだけ口頭発表の希望に応えるように、今回は発表時間を従来の30分から25分に短縮した。参加者数は、初日110名(学内29名、学外81名)、2日目120名(学内36名、学外84名)、3日目100名(学内26名、学外74名)であった。ガラス転移は物性研にとってはあまり馴染みのないテーマであるため、学内からの参加者が少ないことは覚悟していたが、学外からの参加者は予想以上であり、これまでのガラスの研究会で最大規模となった。ガラス分野の研究の活発さと本研究会への大きな期待が感じられた。

研究会初日は、吉信副所長挨拶と世話人代表による趣旨説明に引き続き、ガラス・過冷却液体の基本的な実験のセッションから始まった。最初に山室と辰巳氏による蒸着ガラスの構造と熱的性質に関する発表があった。蒸着法によって作成された剛体的直線分子CS₂のガラス構造が結晶に近いものであるという結果は、まだ解明されていない分子ガラスの基本構造についての強いメッセージである。猿山氏は α 緩和の緩和時間が緩和的に変化する珍しい現象について発表した。野寄氏は誘電緩和により、齋藤氏は放射光 γ 線を用いた準弾性散乱により、 β 緩和(Johari-Goldstein緩和)の特徴とその起源に関する発表を行った。続いて、液体・ガラスの理論・計算機シミュレーションのセッションが行われた。ここでは比較的ベテランの研究者がこれまで積み上げてきた手法を活かした新たな取り組みについて発表した。田中氏による

多孔体中のイオンダイナミクス(しばしば加速されるのが興味深い)に関する発表を行った。大規模な MD シミュレーションを得意とする芝氏は、長いアルキル鎖をもつイミダゾリウム系イオン液体で現れる液晶相の形成とそのダイナミクスについて発表した。本研究会の最後は、もう一度ガラス・過冷却液体に関するセッションに戻り、主にガラスにおける励起現象について講演が行われた。ガラス特有の低エネルギー励起であるボゾンピークの起源は、ガラス転移と同じく未だ良く分かっていない。小島氏は典型的なガラス形成物質であるグリセロールの低温および高压でのボゾンピークについて発表し、水野氏は MD シミュレーションにより広い周波数領域の固有振動を調べ、ボゾンピークと連続体近似領域のフォノンについて論じた。森氏はテラヘルツ分光によるフラクトン励起に関する発表を行った。本研究会の最後の演者は白井氏で、ガラスの残留エントロピーと熱力学第 3 法則に関する非常に基本的な内容で研究会を締めくくった。

初日と 2 日目の午後に行われたポスターセッションでは、口頭発表の内容に近いテーマから全く異なるテーマ(例えば強誘電一反強誘電相転移やスピン液体)まで、非常に幅広い発表が行われた。約 20 件の発表に対して 2 時間という余裕のあるプログラムであったため、口頭発表者を中心とした比較的シニアの研究者と若手研究者の間で非常に密な議論が繰り広げられた。なお、申込時に口頭発表を希望された方のうち 6 名にポスターに変更していただいた。そのことについてここでお詫びしておきたい。

以上のように、発表内容はガラス転移の基礎理論から生物系や強相関電子系の実験まで非常に多岐にわたっており、しかも物性研内部の研究テーマからはかなり異なっていたにもかかわらず、全てのセッションで休憩時間がほとんどなくなるほど活発な討論が行われた。これは、発表者の方々が専門外の聴衆に配慮した話をされたこと、逆に聴衆の方々は初歩的な質問や全く異なる立場からの質問を遠慮無くして頂いたことによる。研究会の参加者全員に心から御礼申し上げる。

2 日目の 18 時半からカフェテリアで開催した懇親会についても少し触れておく。冒頭の森所長のご挨拶に続き、食事と歓談が行われたが、今回は初めて参加される方が多く、単なるお疲れさま会ではなく、有意義な情報交換ができたと感じた。特に最近ガラス分野(特に理論分野)

で学生や若いポストドクが増えているのは何よりうれしいことである。彼らのやる気に満ちた話を聞くと、この研究会をこれからも継続していかねばと感じた次第である。懇親会でシニア代表でご挨拶をいただいた平田文男先生にもこの場を借りてお礼を申し上げたい。

最後に、本ワークショップの企画・準備・開催・報告の各段階で、多くの物性研事務局および中性子科学研究施設の方々にご協力いただいた。特に、旅費・宿泊の事務全般を一人で担当してくれた山室研秘書の本田裕子さん、ホームページ・web 登録システムの管理をしてくれた山室研大学院生の楡井真実君、プログラム・予稿集の編集を担当してくれた山室研特任研究員の秋葉宙さん、当日の受付や要旨集の作成で力を貸してくれた中性子科学研究施設補佐員室の伊東順子さんと鈴木麻理恵さんに、この場を借りて感謝したい。

以下に研究会でとった何枚かの写真とプログラムを掲載する。講演予稿集については、まだ残部がかなりあるので、世話人代表に連絡をいただければお送りします。



5月10日(木) 10:00~18:50

(20分講演 + 5分討論 = 25分/人)

10:00~10:15

副所長挨拶(吉信 淳)・趣旨説明(山室 修)

【セッション1】 10:15~12:20

ガラス・過冷却液体1

座長 深尾 浩次

- 1. 山室 修(東大物性研) 単純分子のガラスおよび過冷却液体の構造
- 2. 辰巳 創一(京工繊大) 蒸着ガラスの低温異常性に見る蒸着ガラスの不均一性
- 3. 猿山 靖夫(京工繊大) 温度変化に対する α 過程緩和時間の遅れの現象論的考察
- 4. 野寄 龍介(北大院理) 糖・糖アルコールガラスにおける副緩和過程の振舞い
- 5. 齋藤 真器名(京大複合原科研) Johari-Goldstein β 緩和の微視的な観測とそのフラジリティ指数との関係性

12:20~13:30

昼休み(世話人会)

【セッション2】 13:30~15:35

ガラス・過冷却液体2

座長 宮崎 州正

- 6. 田中 肇(東大生研) 過冷却液体における方位秩序形成と遅いダイナミクス
- 7. 小田垣 孝(科学教育総) 温度変調応答について
- 8. 吉野 元(阪大サイバー) 並進と回転自由度ガラス転移の平均場理論
- 9. 古川 亮(東大生研) fragile-strong ガラス形成液体間のレオロジーに見られる質的な違いについて
- 10. 高田 章(旭硝子) ガラスの非平衡状態を記述する分配関数の理論モデルに関する研究

15:35~17:35

コーヒーブレイク&ポスター発表1

【セッション3】 17:35~18:50

粉体・ジャミング・レオロジー1

座長 吉野 元

- 11. 早川 尚男(京大基研) 濃厚サスペンションのレオロジーの理論
- 12. 大槻 道夫(阪大基礎工) 周期剪断を受けた粉体における Shear Jamming
- 13. 川崎 猛史(名大理) ジャミング転移点近傍における粒子軌道の可逆性に関する非平衡相転移

5月11日(金) 8:45~18:15

【セッション4】 8:45~10:25

粉体・ジャミング・レオロジー2

座長 早川 尚男

- 14. 池田 昌司(東大総合文化) ジャミング転移における粘性発散と緩和時間の増大の対応関係
- 15. 桂木 洋光(名大環境) 粉体層からの棒引き抜き抵抗とシアール・ジャミング
- 16. 瀬戸 亮平(京大院工) コロイド分散系のマイクロストラクチャーと非ニュートン流動特性
- 17. 栗田 玲(首都大東京) 泡沫ダイナミクスの液体分率依存性

10:25~10:40

コーヒーブレイク

【セッション5】 10:40~12:20

水・ネットワークガラス

座長 鈴木 芳治

- 18. 金 鋼(阪大基礎工) 過冷却水において水素結合はどのように切断するのか? : 自由エネルギー曲面の鞍点を通過しない遷移経路の検出
- 19. 村上 洋(量子科学機構) ナノ拘束水の室温ガラス状態
- 20. 小野寺 陽平(京大複合原科研) ガラス・液体・アモルファス物質の回折パターン of 的系統的な理解



物性研究所短期研究会

量子情報・物性の新潮流

—量子技術が生み出す多様な物性と情報処理技術—

研究会提案者

押川正毅 (東京大学物性研究所)

佐々木寿彦 (東京大学)

富田隆文 (京都大学)

中田芳史 (東京大学)

根来 誠 (大阪大学)

2018年7月31日～8月3日の四日間に渡り、表題の研究会を開催した。本研究会では、量子物理を情報論的な観点から理解することに主眼を置き、量子情報を中心に物性物理、統計物理、高エネルギー物理等の関連する研究者を一堂に介して新たな研究交流を生み出すことを目指した。

近年、「量子と情報」という考え方は急激に物理学全体に浸透しつつあり、物理学と情報学が融合した新フロンティアの開拓に繋がっている。事実、ここ十年で、量子現象を情報という観点から捉えることで、トポロジカル秩序の理解の深化やテンソルネットワークを用いた数値計算手法の開発、量子カオスの新理解など、数多くの基礎物理の進展が得られている。その一方で、量子系を情報処理の媒体として利用するという観点から、量子コンピュータや量子暗号、量子通信などの量子技術の開発も盛んに行われている。「量子系の物理」と「量子技術開発」は、量子現象を情報の流れとして「理解」するのか「活用」するのか、という目的の差異はあるにしろ、本質的には統一的な“言語”で理解可能なものである。そのような共通言語の整備を通じて量子物理の発展は更に加速すると考えられるが、その第一歩として「量子を舞台にする様々な分野の研究者が交流し、異なる分野の研究を理解しあうきっかけを作りたい」と考え、今回の短期研究会を企画するに至った。

本研究会では、理論・実験を問わず様々な分野の研究者に招待講演をお願いし、「量子と情報」をキーワードに公募した一般講演にも多くの分野からのご応募をいただいた。異分野交流を促進するためにスコープを広くとったこともあり、分野間のバランスを保ちつつプログラムを作成するのは容易ではなかったが、結果として、講演中・講演後を問わず分野の垣根を超えるような活発な議論が交わされるなど、極めて盛況な研究会となった。本研究会では、分野横断型ということを考慮して7月31日をチュートリアルの日と設定し、量子情報基礎・量子コンピュータ・量子計

算実験・量子物性に関するご講演をいただいた。このことにより「量子と情報」に関する基礎的な視点を皆で共有することが出来たと考えている。研究会の初日は、午前は冷却原子関連の実験・理論に関して、午後は量子多体系の数値計算手法や複雑な量子多体系における情報の流れ、量子通信理論に関するコアな話題など、多様な内容に関して発表していただいた。二日目は、量子情報理論の基調講演から始まり、午前は量子情報・高エネルギー物理・量子物性を巻き込む分野横断型トピックとして注目されている量子ブラックホールと情報の話を、午後は量子計算・量子アルゴリズムを中心にした発表をいただいた。最終日は、基調講演として超伝導系を用いた量子コンピュータ実装に関して発表していただき、その後、量子暗号・量子通信など量子情報サイドのトピックスから量子熱力学に至るまで、広範囲の話題について発表・議論を行った。このように発表内容を羅列するとスコープが極めて広い研究会であったことが再認識されるが、事前に設けたチュートリアル講演やプログラム構成の工夫、また、各ご講演者のご尽力により、専門外の研究者でも理解できる発表内容が多く、講演後の活発な議論に繋がっていた。研究会後に行ったアンケート結果でも、参加者の大多数が研究会の内容に満足しており、普段はあまり耳にすることがない研究内容に触れ、今後の研究活動に活かしていくよい機会を提供できたのではないかと考えている。

その一方で、一部の研究者からは「異なる分野の発表は、研究の動機が理解しづらい」という率直なコメントもいただき、国内における量子情報と伝統的な物理のギャップは小さくないことも実感した。欧米では、すでに「量子と情報」という名の下で多くの分野が共同する下地が整いつつあるため、今後、世界的な研究潮流に後れを取らずに量子系の新たな理解・新分野の開拓へと繋げていくためには、分野横断型研究会の定期開催や滞在型研究会など、より長



【プログラム】

7月31日(火)

9:00 - 10:00	受付	
10:00 - 11:00	小芦雅斗 (東大)	量子情報理論基礎 1/2
11:00 - 11:15	休憩	
11:15 - 12:15	小芦雅斗 (東大)	量子情報理論基礎 2/2
12:15 - 13:30	昼食	
13:30 - 14:30	杉山太香典 (東大)	量子コンピュータとノイズ
14:30 - 14:45	休憩	
14:45 - 15:45	阿部英介 (慶応大)	量子計算実験基礎
15:45 - 16:00	休憩	
16:00 - 17:00	押川正毅 (東大物性研)	量子情報と物性

8月1日(水)

9:00 - 9:45	受付	
9:45 - 10:00	オープニング	
10:00 - 11:00	中島秀太 (京大)	冷却原子系を用いた量子シミュレーション
11:00 - 11:20	休憩	
11:20 - 11:50	中川賢一 (電通大)	冷却リユードベリ原子を用いた量子多体系シミュレータ
11:50 - 12:20	内野瞬 (早稲田大)	強く相互作用する冷却フェルミ原子気体におけるメゾスコピック伝導
12:20 - 13:25	昼食	
13:25 - 14:10	川島直輝 (東大物性研)	テンソルネットワーク法の情報処理
14:10 - 14:40	原田健自 (京大)	エンタングルメント分岐とその活用
14:40 - 15:00	休憩	
15:00 - 15:45	伊與田英輝 (東大)	孤立量子多体系における熱平衡化と量子情報の非局在化
15:45 - 16:30	宮寺隆之 (京大)	量子測定における同時操作不可能性
16:30 - 16:50	休憩	
16:50 - 17:20	松本啓史 (NII)	Smoothed α -Renyi divergences and divergence rates
17:20 - 17:50	東浩司 (NTT)	量子インターネットの理論限界と面積則
18:00 - 20:00	懇親会	

8月2日(木)

9:00 - 9:20	受付	
9:20 - 10:20	小川朋宏 (電通大)	量子情報スペクトル理論の発展と応用
10:20 - 10:40	休憩	
10:40 - 11:25	吉田紅 (ペリメータ研究所)	Efficient decoding for Hayden-Preskill protocol
11:25 - 11:55	若桑江友里 (電通大)	One-shot partial decoupling 定理とその応用
11:55 - 12:55	昼食	
12:55 - 13:40	大関真之 (東北大)	量子アニーリングを用いた不器用なクラスタリング
13:40 - 14:10	藤井啓祐 (京大)	Stoquastic ハミルトニアンによる断熱量子計算の量子加速
14:10 - 14:30	休憩	
14:30 - 15:15	ルガル・フランソワ (京大)	量子分散計算
15:15 - 15:45	竹内勇貴 (NTT 基礎研)	高接続性ハイパーグラフ状態の検証とその量子計算への応用
15:45 - 16:05	休憩	
16:05 - 16:35	笹川崇男 (東工大)	誤り耐性量子計算に向けたトポロジカル電子物質・物性の開拓
16:35 - 17:45	ポスタープレビュー	
17:45 - 19:45	ポスターセッション	



8月3日(金)

9:00 - 9:20	受付	
9:20 - 10:20	田淵豊 (東大)	超伝導量子コンピュータ：開発と実装
10:20 - 10:40	休憩	
10:40 - 11:10	富田章久 (北大)	量子暗号鍵配送—最近の研究開発動向
11:10 - 11:40	小布施秀明 (北大)	トポロジカル相と対称性を活用した量子状態制御：量子フォークによるアプローチ
11:40 - 12:40	昼食	
12:40 - 13:25	松枝宏明 (仙台高専)	ホログラフィック原理と情報幾何・エンタングルメント
13:25 - 13:55	白石直人 (慶応大)	量子純粋状態の熱平衡化のシナリオを巡って
13:55 - 14:15	山崎隼汰 (東大)	量子符号化・復号の非局所性の定量化
14:15 - 14:35	休憩	
14:35 - 15:05	高橋優樹 (東大)	単一イオンと光共振器の強結合
15:05 - 15:35	武田俊太郎 (東大)	大規模な光量子コンピュータをいかに実現するか
15:35 - 15:55	休憩	
15:55 - 16:25	田島裕康 (電通大)	大偏差状態の熱力学法則
16:25 - 16:45	水田郁 (京大)	空間並進による離散時間結晶
16:45 - 17:15	辻直人 (理研 CEMS)	量子状態統計における揺らぎの定理
17:15 - 17:30	クロージング	

物性研究所談話会

標題：Dark-Matter Challenges of the Solid State.

日程：2018年4月12日(木) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館 6階大講義室 (A632)

講師：Piers Coleman

所属：Center for Materials Theory, Dept Physics and Astronomy, Rutgers University

要旨：

At the turn of the 20th century, physicists faced an uncanny range of unsolved problems: simple questions, such as why hot objects change color, why matter is hard and why the sun keeps on shining, went unanswered. These problems heralded a new era of quantum physics. What was truly remarkable about discovery in this heroic era, was the intertwined nature of research in the lab and in the cosmos: solving superconductivity really did help answer why the sun keeps on shining, while looking at the stars provided clues as to why matter is hard.

The challenges facing us today, epitomized by our failure to quantize gravity and the mysteries of dark matter and energy, are not just problems facing particle physics and astronomy, but problems that challenge physics to its core. What is perhaps less well known, is that physics in the lab and cosmos remain just as intertwined as they were a hundred years ago.

I will talk today about the less well-known dark matter challenges of the solid state, epitomized by the strange metals with linear resistivity that accompany high temperature superconductivity, the recent discovery of insulators with Fermi surfaces and quantum criticality. the solid-state version of a black hole in the phase diagram. The solution of these laboratory-scale problems fundamentally challenge our understanding of emergent quantum matter, and they are no less intertwined with their cosmological counterparts than they were a hundred years ago.

I will highlight three Dark-Matter challenges that have arisen in heavy fermion physics[1-4], emphasizing their connections with other strongly correlated quantum materials and discussing some of our recent theoretical efforts to make progress on them: quantum criticality, hidden order and the possibility of new classes of broken symmetry outside the Hartree-Fock/BCS paradigm and topology, including the mystery of SmB6 and the possibility that this insulator contains a new kind of neutral, yet diamagnetic Fermi surface [5].

- [1] Piers Coleman, "Heavy Fermions and the Kondo Lattice, a 21st Century Perspective", arXiv: 1509. 05769 (2015).
- [2] Joe Thompson and Zachary Fisk, "Progress in Heavy Fermion Superconductivity: Ce115 and other materials", J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011002 (2012).
- [3] Philipp Gegenwart, Qimiao Si and Frank Steglich, "Quantum criticality in heavy-fermion metals", Nature Physics **4**, 186. 197 (2008).
- [4] Maxim Dzero et al, "Topological Kondo Insulators", arXiv 1506.05635, Ann. Rev. Cond. Matt. Phys., Volume **7**:249-280 (2016).
- [5] B. S. Tan et. al, "Unconventional Fermi surface in an insulating state", Science **349**, 287-290 (2015).



【講師紹介】

Piers Coleman 教授はこれまで物性物理の分野において様々な潮流を生む概念を提出されてきたことで世界的に知られる理論家である。さらに、東京大学物性研究所も含め世界 20 か国 75 以上の拠点を持つ International Institute for Complex Adaptive Matter(I2CAM)の所長としても活躍されている。一方、アメリカ物理学会と英国物理学会の Fellow であられ、また、これまで様々な若手の学校を開き、次世代の教育にも大きく貢献されている。

標題：平成 30 年度前期客員所員講演会

日程：2018 年 4 月 19 日(木) 午前 10 時～午後 12 時 10 分

場所：物性研究所本館 6 階大講義室 (A632)

- 10:00-10:10 所長挨拶 (森 初果：物性研究所長)
- 10:10-10:40 石井 史之 (金沢大学理工研究域数物科学系)
「第一原理計算によるスピン変換物質デザイン」
- 10:40-11:10 山口 博則 (大阪府立大学理学系研究科)
「有機ラジカル系によって実現する多彩な量子スピンモデルの低温物性」
- 11:10-11:40 撰待 力生 (新潟大学理学部)
「高圧・強磁場下での重い電子系反強磁性体 CePt_2In_7 のメタ磁性の研究」
- 11:40-12:10 松本 祐司 (東北大学大学院工学研究科)
「パルスレーザー堆積法によるナノ構造化機能性酸化物薄膜の創製」

標題：理論セミナー：Reverse engineering Hamiltonian from spectrum

日程：2018年4月20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：藤田 浩之

所属：東大物性研究所

要旨：

Handling the large number of degrees of freedom with proper approximations, namely the construction of the effective Hamiltonian is at the heart of the condensed matter physics. Here we propose a simple scheme of constructing Hamiltonians from given energy spectrum using the supervised learning technique. Taking the Hubbard model at the half-filling as an example, we show that we can find the reduced description, namely the effective spin model, of the Hubbard model in a way that the estimation bias and error are well controlled. We reproduce the effective model at $(t/U)^6$ obtained previously by arduous perturbative calculations, just by minimizing the error in the spectrum (semi-)automatically using the supervised learning algorithms. We also show that the same approach is useful to construct the entanglement Hamiltonian of a quantum many-body state from its entanglement spectrum, taking the ground states of the $S=1/2$ two-leg Heisenberg ladders, as an example. We find the qualitative difference of the entanglement Hamiltonian in the two different phases of that model which has not been known previously. Compared to the known approach based on the full diagonalization of the reduced density matrix, our approach is computationally much cheaper thus offering a way of studying the entanglement nature of large (sub) systems.

[1] H. Fujita, Y. O. Nakagawa, S. Sugiura, and M. Oshikawa, Phys. Rev. B 97, 075114 (2018).

標題：理論インフォーマルセミナー：物質・材料科学分野におけるデータ駆動型研究 – 機械学習による有効モデル推定、力場推定、ニオイセンシング解析 –

日程：2018年4月25日(水) 午後3時～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：田村 亮

所属：物質・材料研究機構/東京大学

要旨：

現在、物質・材料科学分野ではデータ駆動型研究が注目されている。物質・材料科学には、構造データ、実験測定データ、第一原理計算データといった様々な種類のデータが存在している。これらのデータの取得には長時間測定や長時間シミュレーションが必要な場合が多く、簡単にデータを収集することが困難である。そのため、既知データを機械学習のトレーニングデータとすることで未知データを推定し、物質・材料開発の高速化を目指す研究が、材料科学におけるデータ駆動型研究である。講演者は、物質・材料科学分野の様々な部分の高速化及び、物質・材料開発に重要な情報の抽出を目指し、様々な種類のデータを対象としたデータ駆動型研究を実施している。本講演では、実験測定データを入力としたベイズ統計による有効モデル推定や、第一原理計算結果を入力としたガウシアンプロセス回帰による力場推定、ニオイの特徴を抽出するためのニオイセンシング解析など講演者が携わったいくつかの事例を紹介し、物質・材料科学と機械学習の融合研究の可能性について議論する。

参考文献

[1] T. Suzuki, R. Tamura, and T. Miyazaki, Int. J. Quant. Chem. 117, 33 (2017).

[2] R. Tamura and K. Hukushima, Phys. Rev. B 95, 064407 (2017).

[3] K. Shiba, R. Tamura, G. Imamura, and G. Yoshikawa, Sci. Rep. 7, 3661 (2017).

[4] R. Tamura and K. Hukushima, PLoS ONE 13, e0193785 (2018).

標題：理論インフォーマルセミナー：Numerical Evidence of Emergent Symmetry in Spin-1/2 Heisenberg Chain

日程：2018年4月27日(金) 午後5時～午後6時

場所：物性研究所本館6階第5セミナー室 (A615)

講師：Pranay PATIL

所属：Department of Physics, Boston University

要旨：

The antiferromagnetic Heisenberg chain is expected to have an extended symmetry, $[SU(2) \times SU(2)] / Z_2$, in the infrared limit, whose physical interpretation is that the spin and dimer order parameters form the components of a common 4-dimensional vector. Here we numerically investigate this emergent symmetry using quantum Monte Carlo simulations of a modified Heisenberg chain (the J-Q model) in which the logarithmic scaling corrections of the conventional Heisenberg chain can be avoided. We show how the two- and three-point spin and dimer correlation functions approach their forms constrained by conformal field theory as the system size increases and numerically confirm the expected effects of the extended symmetry on various correlation functions.

This talk will be based on work presented in arXiv:1803.02041.

標題：理論セミナー：固体における高次高調波の発生機構

日程：2018年4月27日(金) 午後2時～午後3時

場所：物性研究所本館6階第5セミナー室 (A615)

講師：玉谷 知裕

所属：東京大学物性研究所

要旨：

原子分子気体における高次高調波発生は紫外から X 線領域におけるアト秒パルス光源としての有用性から現在までに盛んに研究されて来た[1]。それに対して近年、高強度 THz 光の発生が可能となり半導体を初めとする凝縮系を用いた高次高調波発生が注目されている[2]。これは THz 光における光子エネルギーが半導体の典型的なバンドギャップエネルギーと比較して非常に小さく、さらに安定した電場波形を形成できることから高次高調波発生に対する高効率な制御が実現できると期待されるためである。しかしながら、このような実験的進歩にも関わらず高強度 THz 光照射下での凝縮系における高次高調波の理論は未だ十分ではない。何故なら、高強度 THz 光照射下のキャリアダイナミクスは非摂動的非線形光学過程であるのみならず、非断熱的過程をも包括する必要があるからである。以上の状況を踏まえ、本講演では、半導体に高強度 THz 光を照射した際のキャリアダイナミクスを非摂動的かつ非断熱的に記述し、それによって生じる高次高調波発生メカニズムを理論的に解明する[3, 4]。さらにそれらを踏まえ、グラフェン[5]や遷移金属ダイカルコゲナイド[6]における高次高調波の特異な性質を説明する。

Reference

- [1] T. Brabec and F. Krausz, Rev. Mod. Phys. **72**, 545 (2000).
- [2] O. Schubert *et al.*, Nature Photon. **8**, 119-123 (2014).
- [3] T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, and K. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **116**, 016601 (2016).
- [4] T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, and K. Tanaka, Phys. Rev. B **94**, 241107(R) (2016).
- [5] N. Yoshikawa, T. Tamaya, and K. Tanaka, Science **356**, 736 (2017).
- [6] T. Tamaya, S. Konabe, and S. Kawabata, arXiv:1706.00548.



中性子非弾性散乱装置 C1-1(JRR-3), CTAX(HFIR), LET(ISIS)を用いて系統的に観測した例を紹介する。また、近年進歩が著しいテラヘルツ分光などの光学測定と中性子非弾性散乱を相補的に用いることで、スピン・格子・分極などが結合した興味深い励起状態に対する多面的な理解を得ることができる。一例として偏極中性子三軸分光器 PTAX(HFIR)を用いて行ったマルチフェロイック・ヘキサフェライトのエレクトロマグノンの研究を紹介する。

(3) 非平衡・過渡現象の観測

定常状態における磁気秩序・励起を中性子散乱で探査する手法は、測定・解析ともに系統的に整備されつつある。しかし過渡現象や非平衡過程については(すでに先駆的な研究はあるものの)まだ多くの開拓の余地があると考えられる。本発表では磁気スキルミオンの代表物質である MnSi について、電流パルスによる試料の急加熱・急冷と J-PARC のパルス中性子を組み合わせた時分割測定によって磁気相転移の kinetics を研究した例を紹介する。

標題：極限コヒーレント光科学セミナー：微生物型ロドプシンの光機能メカニズム研究

日程：2018年5月15日(火) 午前10時～

場所：物性研究所本館6階第一会議室(A636)

講師：井上 圭一

所属：東京大学物性研究所

要旨：

微生物型ロドプシンは細菌や古細菌、一部の真核生物など、主に単細胞の微生物が持つ、光受容型の膜タンパク質である。微生物型ロドプシンは7回膜貫通型の共通構造の内部に発色団である all-trans 型のレチナールを結合しているが、このレチナールが光を吸収すると 13-cis 型へと異性化し、さらにその構造変化をトリガーとして様々な生理機能が光で発現する。その機能は非常に多岐にわたり、光駆動型のイオンポンプや、光開閉式チャネル、走光性センサー、光依存的な遺伝子発現制御などの機能を持つロドプシンが知られている。我々はこれまでに主にレーザー分光を中心とした、物理化学的な解析により、それぞれの微生物型ロドプシンが非常に似通った構造様式を持ちながら、どのように異なった機能を発現するのか、その構造機能相関をもたらし要因について研究を行ってきた。最近では光エネルギーを使って細胞外に Na⁺イオンを輸送する Na⁺ポンプ型ロドプシン[1,2]や、細胞内に H⁺を輸送する内向き H⁺ポンプ型ロドプシン[3]を新たに発見し、さらにその輸送メカニズムや、これらの分子をもとに機能を改変した新規分子ツールについて研究を行った。講演ではこれらの結果について紹介するとともに、近年様々なグループによってレーザー分光を用いて調べられた微生物型ロドプシンの研究例や動向についても概説する。

[1] K. Inoue, et al., *Nature. Commun.* 4, 1678 (2013)

[2] H. E. Kato et al., *Nature* 521, 48 (2015)

[3] K. Inoue et al., *Nature. Commun.* 7, 13415 (2016)

標題：機能物性セミナー・理論セミナー：3D phase field simulation for macropinocytosis of amoeboid cells

日程：2018年5月18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：斉藤 稔

所属：東京大学大学院理学系研究科

要旨：

Macropinocytosis is clathrin-independent endocytosis and allows internalization of large volume of extracellular fluid. Dictyostelium discoideum and tumor cells show constitutive macropinocytosis for uptake of nutrients from extracellular fluid. With help of recent advance of microscopy for 4D observation, macropinocytosis has been considered



to be driven by self-organizing pattern of actin polymerization on the membrane. However, it remains still unknown how crown-like (or macropinositosis cup) structure forms, how it closes and what chemical reactions make it possible. From theoretical perspective, we introduce a mathematical model based on phase-field method for simulating 3D morphodynamics of macropinocytosis. The proposed model with the help of GPU enables reaction-diffusion process of membrane localized proteins and large membrane deformation simultaneously.

Simulation results indicate that simple chemical reactions including actin polymerization lead to drastic membrane deformation, which results in an engulfment of extracellular fluid. In addition, depending on parameters, not only macropinocytosis but also CDR (circular dorsal ruffle) like behaviors appear.

This study provides a new insight for constitutive macropinocytosis as a self-organization phenomenon via feedback between drastic deformation of membrane and reaction-diffusion on it.

標題：極限コヒーレント光科学セミナー：鏡像準位のスピントロニクスと表面スピン流の光制御

日程：2018年5月30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：荒船 竜一

所属：物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点

要旨：

外部磁場を用いずに電子のスピンを制御する—これは近年大きな発展を遂げているスピントロニクス研究におけるチャレンジの一つである。このときスピン軌道相互作用は最も重要な相互作用である。スピン軌道相互作用を通し、さまざまな方法でスピン制御のデモンストレーションが行われている。光によるスピン制御は、高い制御性、高速応答など注目すべき多くの特徴をもち”オプトスピントロニクス”はスピントロニクスの中でも重要なブランチの一つとなっている。

我々は表面科学、表面分光の観点からオプトスピントロニクスに寄与したいと考えて、2光子光電子分光を用いた研究を進めている。本セミナーではがこれまで取り組んできた結果を紹介する[1,2,3]。代表的な非占有表面状態である鏡像準位におけるスピン分裂をどのようにして測るか、そのスピン分裂状態をどのようにスピントロニクスに応用できるか、と言った点について議論したい。

参考文献：

[1] T. Nakazawa, et al., Phys. Rev. B, **94**, 115412 (2016).

[2] R. Arafune et al., Phys. Rev. Lett., **117**, 239701 (2016).

[3] R. Arafune et al. (in preparation)

日時：2018年5月31日（木）午後1時～2時30分

場所：物性研究所本館6階 A615号室

題目：理論インフォーマルセミナー：第一原理計算を用いた点欠陥、粒界などの種々欠陥の原子・電子構造解析

講師：小川 貴史

所属：ファインセラミックスセンター

要旨：

材料に付随する種々様々な欠陥がもたらす物性を制御するには、その原子構造・電子状態を把握し、起こっている現象に潜むメカニズムを理解し、それを元に制御指針を探るステップが必要となる。近年、計算機性能の向上に加え、計算手法についても様々発展してきており、第一原理計算を用いた欠陥解析の有効性は高くなってきているが、「どのような解析が有効か」、「実験とどのように連携するか」という点については注目する現象・対象に依るところも大きく、まだ不確実な部分が多い。本発表では、高温構造材料であるアルミナの粒界イオン拡散に関連する解析や、半導体やイオン伝導体における荷電キャリアの熱平衡欠陥状態に関する解析を中心として、我々の最近の試みと成果を紹介する。

題目：理論インフォーマルセミナー：第一原理計算によるエネルギーデバイスの材料設計

講師：桑原 彰秀

所属：ファインセラミックスセンター

要旨：

近年のエネルギー情勢の変化に伴い、その高効率利用と低環境負荷を実現可能とする革新的なエネルギーデバイスの創出が求められている。第一原理計算は与えられた原子配置のもとで、対象とする物質の電子系のエネルギー状態や諸物性に関する定量的な情報を得ることができる計算手法であり、物性発現メカニズムの解明に有効であり、材料設計の指針を得ることもできる。本講演では、第一原理計算を用いたエネルギーデバイスの研究事例として、プロトン伝導性酸化物燃料電池材料における欠陥形成挙動の解明、リチウムイオン2次電池におけるイオンダイナミクスの第一原理計算等の内容に関して紹介する。

標題：理論セミナー：トポロジカル熱電変換物質デザインへ向けた異常ネルンスト係数の第一原理計算

日程：2018年6月1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：石井 史之

所属：金沢大学大学院 自然科学研究科 数物科学専攻、東京大学物性研究所

要旨：

新たな物性の起源として、電子状態のトポロジーが注目を浴びている。多くの第一原理電子状態計算プログラムに初めて導入された Bloch 波動関数のトポロジーに関連した計算手法は、1993年に提案された電気分極を計算する King-Smith と Vanderbilt によるベリー位相の方法[1]である。我々はこれまで、ベリー位相の方法、それを拡張したベリー曲率、トポロジカル不変量 (Chern 数, Z₂ 数) の計算手法の第一原理電子状態計算プログラムへの実装とその応用[2-5]に取り組んできた。本講演では、それらの熱電変換現象への応用例について紹介する。

我々は、熱電変換材料の高効率化を模索する新たな方向性として、ベリー曲率由来の異常ホール係数のフェルミ準位依存性が重要となる、異常ネルンスト係数の大きな系の物質デザインをめざしている。その取り組みとして、スカーミオン結晶モデル[4]、酸化物薄膜スカーミオン結晶[6]、ハーフホイスラー強磁性体[7]についての我々の最近の研究を紹介し、ベリー曲率が誘起する巨大な熱電変換効果を示す物質、トポロジカル熱電変換物質デザイン指針の構築についての展望を述べる。

[1] R.D. King-Smith and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B, **47**, 1651(1993).



- [2] F. Ishii and T. Oguchi, J. Phys. Soc. Jpn., **71**, 336 (2002).
- [3] F. Ishii, N. Nagaosa, Y. Tokura, and K. Terakura, Phys. Rev. B **73**, 212105 (2006).
- [4] Y. P. Mizuta and F. Ishii, Sci. Rep., **6**, 28076(2016).
- [5] H. Sawahata, N. Yamaguchi, H. Kotaka, and F. Ishii, Jpn. J. App. Phys., **57**, 030309 (2018).
- [6] Y.P. Mizuta, H. Sawahata, and F. Ishii, arXiv:1803.08148.
- [7] S. Minami, F. Ishii, Y.P. Mizuta, and M. Saito, arXiv:1804.00297.

標題：量子物質セミナー：Charge density wave order in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.67}$ induced by uniaxial stress.

日程：2018年6月7日(木) 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：Clifford Hicks

所属：Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, Dresden, Germany

要旨：

High-temperature superconductivity requires both strong electronic interactions, and a mechanism by which these interactions are prevented from inducing an alternative, static electronic order. Therefore the study of competing phases is an important part of the study of high-temperature superconductors. In underdoped cuprates, it is well-established that there are strong susceptibilities to both superconductivity and charge density wave order. It is not clear whether these orders are best described as mutually incompatible, different manifestations of the same pairing interaction, or different components of a composite order parameter. In this talk, I will present elastic and inelastic X-ray data on the underdoped cuprate $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.67}$ ($T_c = 65$ K), that show compression along the a axis by $\sim 1\%$ induces static, three-dimensional CDW order. Upon reducing the temperature, the CDW disappears and is replaced by superconductivity, indicating strong competition between these states.

標題：理論インフォーマルセミナー：量子導体における情報量の完全計数統計と最大通信路容量

日程：2018年6月18日(月) 午後3時30分～

場所：物性研究所本館6階第5セミナー室 (A615)

講師：内海 裕洋

所属：三重大学 工学部 物理工学科

要旨：

2 端子量子ドットを対象に、部分系の自己情報量のゆらぎの分布と、最大通信容量を議論する。前半では、非平衡定常状態における Renyi エンタングルメント・エントロピーを、レプリカ法により計算する方法を丁寧に説明する。まず複製した Keldysh 経路上において、グリーン関数を導入する[1]。レプリカ空間についてフーリエ変換すると、完全計数統計理論[2]における計数場が現れる。その結果、Renyi エンタングルメント・エントロピーは電流キュムラント生成関数を用いて表すことができる[3]。

後半では、量子導体の通信路容量を議論する。部分系の局所的な熱量の測定後の縮約密度行列の対数として、条件付き自己情報量の演算子を導入する。その確率分布のフーリエ変換は Renyi エンタングルメント・エントロピーを解析接続したものとなる。最大通信路容量は0次の Renyi エンタングルメント・エントロピーで表され、それは分割数となることを示す。また定常状態では、縮約密度行列と部分系の局所熱量演算子は可換としてよいことを議論する。

[1] Yu. V. Nazarov, Phys. Rev. B **84**, 205437 (2011).

[2] D. A. Bagrets, Y. Utsumi, D. S. Golubev, G. Schoen, "Full Counting Statistics of Interacting Electrons", ed. by W. P. Schleich and W. Herbert, Wiley-VCH, Berlin (2007).

[3] Y. Utsumi, arXiv:1804.04328, Phys. Rev. B **96**, 085304 (2017), Phys. Rev. B **92**, 165312 (2015).

標題：極限コヒーレント光科学セミナー：時間分解顕微光電子分光による有機ナノ薄膜表面・界面の電子ダイナミクス計測

日程：2018年6月19日(火) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館6階第一会議室(A636)

講師：渋谷 昌弘

所属：慶應義塾大学理工学研究科慶應義塾基礎科学・基盤工学インスティテュート

要旨：

機能性有機分子薄膜を用いた太陽電池、電界効果トランジスタ等の電子デバイスは、低コスト、軽量、フレキシブルな次世代エレクトロニクス・スピントロニクスの基盤技術として幅広く研究が行われている。有機薄膜あるいは基板-有機薄膜界面において、エネルギー、時間、空間すべての次元で高精度な手法により電子物性を明らかにすることは、機能性の起源である電荷注入、電荷分離、再結合などの素過程を原理から理解し、機能を先鋭化する上で極めて重要な課題である。本研究では、代表的な機能性有機分子であるフラーレン(C60)の蒸着薄膜[1,2]や、簡便な溶液プロセスで機能性秩序膜を構築できる化学修飾アルカンチオール自己組織化単分子膜[3]などを対象とし、キャリア(電子)の通り道となる非占有準位の局所分光と励起電子のダイナミクス計測を自ら開発した時間分解顕微光電子分光を駆使することで達成した。セミナーでは上記の研究成果を紹介するとともに、これまでに得られた知見から、“柔らかい”有機分子を対象にした時間分解顕微光電子分光では、非破壊で分子の電子準位を選択的に光励起することが重要であり、紫外・可視光領域にわたる幅広い波長可変性(200-700 nm)を備えた高繰り返し(>1 MHz)フェムト秒光源の構築が不可欠であることを併せて紹介する。

文献

[1] M. Shibuta, et al., *Sci. Rep.* **6**, 35853 (2016).

[2] M. Shibuta, et al., *Appl. Phys. Lett.* **109**, 203111 (2016).

[3] M. Shibuta, et al., *ACS Nano* **11**, 4307 (2017).

標題：極限コヒーレント光科学セミナー：ネマティック電子状態の超高速光応答

日程：2018年6月21日(木) 午前10時～午前11時

場所：物性研究所本館6階第一会議室(A636)

講師：下志万 貴博

所属：国立研究開発法人理化学研究所

要旨：

自発的に回転対称性が破れた電子状態は、液晶とのアナロジーからネマティック電子状態と呼ばれ、銅酸化物や鉄系超伝導体の高温超伝導相近傍に発現する未知の秩序として注目されている。鉄系超伝導体では、スピンや軌道自由度における異方性の発達が格子変形を伴いながら電子ネマティック秩序を引き起こす機構が提唱されている。特に超伝導転移温度が最高となる最適組成では、ネマティック揺らぎが低温に向けて発達する振る舞いが物質の種類を超えて普遍的に見いだされており、超伝導発現との関連も指摘されている。これまで我々は角度分解光電子分光(ARPES)により、FeSeの電子ネマティック秩序相における二対称なフェルミ面や、バンド構造における軌道分極を明らかにしてきた[1,2]。本講演では、時間分解ARPESを用いて観測したFeSeにおけるネマティック電子状態の超高速光応答を紹介する。フェムト秒レーザー照射によるネマティック秩序の超高速融解と、その後に現れる「ネマティック軌道揺らぎ」を見出した[3]。後者は、レーザー照射強度に対して臨界的挙動を示す減衰の速い振動現象として観測され、固体の新たな励起状態である可能性が示唆される。講演では以上の結果について説明するとともに、最後に現在我々が開発を進めている時間分解電子線回折および時間分解電子顕微鏡について、得られ始めている最新の成果とともに紹介する[4,5]。

[1] T. Shimojima *et al.*, *Phys. Rev. B* **90**, 121111(R) (2014).

[2] Y. Suzuki, T. Shimojima *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 205117 (2015).

[3] T. Shimojima *et al.*, submitted.



[4] A. Nakamura, T. Shimojima *et al.*, *Structural Dynamics* **3**, 064501 (2016).

[5] S. Ideta, T. Shimojima *et al.*, *Science Advances*, accepted.

標題：理論セミナー：Resummation of diagrammatic series with zero convergence radius for the unitary Fermi gas

日程：2018年6月22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.Takahiro Ohgoe

所属：Department of Applied Physics, the University of Tokyo

要旨：

Feynman diagrams are powerful tools for studying various fields of physics. Still, the analysis usually involves approximations, because only some types of diagrams or low-order diagrams are considered there. However, the Monte Carlo method for unbiased sampling of Feynman diagrams has been recently developed. On the other hand, the diagrammatic series sometimes have zero radius of convergence. The question is whether it is still possible to make accurate predictions by summing up Feynman diagrams.

In this talk, we report high-precision results obtained by the bold-line diagrammatic Monte Carlo method for the unitary Fermi gas with zero convergence radius. We derive the large-order asymptotic behavior of the diagrammatic series, and we give mathematical arguments and numerical evidence for the resummability of the series by a specifically designed conformal-Borel transformation that incorporates the large-order behavior. Combining this new resummation method with diagrammatic Monte Carlo evaluation up to order 9, we obtain new results for the equation of state, which agree with the ultracold-atom experimental data, except for the 4-th virial coefficient for which our data point to the theoretically conjectured value.

Reference:

R.Rossi, T. Ohgoe, K. Van Houcke, and F. Werner, arXiv:1802.07717

標題：理論インフォーマルセミナー：量子基礎論における弱値の解釈と弱測定の精密測定への応用

日程：2018年6月28日(木) 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：李 宰河

所属：東京大学生産技術研究所

要旨：

量子論の時間対称形式における可観測量(英: Observable)の値として Aharonov らの提唱になる弱値[1]概念は、その測定手法として提案された弱測定法[2]を応用した精密測定実験の成功報告[3-4]を契機として、近年大きく注目を浴びることとなった。本講演では、非専門家の方々を対象として、弱値概念および弱測定法の導入的な解説を行う。最初に、弱値概念の歴史的な出自を踏まえた上で、これをより標準的な量子論の枠内で理解する方策として、弱値の量子的な条件付期待値としての解釈[5]を紹介する。また、量子論における不確定性関係と弱値との間の関わりについて紹介し、弱値が分散型(Robertson-Kennard 型)と時間・エネルギー型の両不確定性関係を結ぶ役を担うことを見る[6]。次に、弱測定法について、これを広く条件付き量子測定として一般的に捉えることで、これが量子的な条件付期待値の測定手法として理解できることを見る。最後に、精密測定における弱測定法の有用性を論ずる上での誤差評価模型[7]を紹介し、弱測定法が従来の測定法の精度限界を超えることを理論的に実証した上で、併せて実験データの検証結果[8]を見る。

参考文献

- [1] Y. Aharonov, P. G. Bergmann, and L. Lebowitz, Phys. Rev. **134**, B1410 (1964).
- [2] Y. Aharonov, D. Z. Albert and L. Vaidman, Phys. Rev. Lett. **60**, 1351 (1988).
- [3] O. Hosten and P. Kwiat, Science **319**, 787 (2008).
- [4] P. B. Dixon, D. J. Starling, A. N. Jordan, and J. C. Howell, Phys. Rev. Lett. **102**, 173601 (2009).
- [5] J. Lee and I. Tsutsui, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017 (5): 052A01 (2017).
- [6] J. Lee and I. Tsutsui, Phys. Lett. A **380**: 2045-2048 (2016).
- [7] J. Lee and I. Tsutsui, Quantum Stud.: Math. Found. **1**, 65 (2014).
- [8] Y. Mori, J. Lee and I. Tsutsui, in preparation.

標題：理論セミナー：平衡および非平衡条件で電子相関により誘起される超伝導と空間不均一性

日程：2018年6月29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：井戸 康太

所属：東京大学物性研究所

要旨：

これまでの常圧下における超伝導への最高転移温度は銅酸化物で実現された約 130K であるが、この最高転移温度はここ数十年でほとんど変化していない。この原因の一つとして、より高い転移温度を生み出すために必要なキャリア間に働く有効引力は、相分離や長周期の電荷秩序などの電荷不均一状態を同時に引き起こしてしまうということが挙げられる。この困難を乗り越えるために、我々は超伝導を制御・増大させるための新しい方法を考える必要がある。

近年、光を用いて物質の格子モードを選択的に励起させることによって、室温領域においてでもギャップ形成などの超伝導的な性質を示すことが実験的に報告された[1]。これらの研究は、非平衡性を利用することによって室温超伝導を実現させるという可能性を切り開いた。

本研究では、格子モードの詳細によらず、相関電子系の特性に基づく機構により、非平衡性を利用した新たな超伝導増大の可能性を提示することを目指した。本目的を達成するために、二次元強相関電子系における空間一様な d 波超伝導状態とストライプや相分離などの電荷不均一状態の競合について着目し、多変数変分モンテカルロ法[2,3]を用いて二次元 Hubbard 模型の数値解析を行った。まず、基底状態におけるそれらの競合について詳しく調べた[4]。その結果、相互作用を大きくすることによって急激に超伝導が強まる空間一様な状態は、強相関領域においては電荷不均一性の発達により不安定になることを明らかにした。続いて非平衡状態の解析を行った[5]。平衡下では実現されない強い超伝導状態は、高強度のレーザーを照射することによって動的に実現できることを示した。本講演では、数値計算手法の詳細や光によって超伝導状態が動的安定化する機構についても説明する。

Reference

- [1] W. Hu et al., Nat. Mater. **13**, 705 (2014), S. Kaiser et al., Phys. Rev. B **89**, 184516 (2014), M. Mitrano et al., Nature **530**, 461 (2016).
- [2] D. Tahara and M. Imada, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 114701(2008).
- [3] K. Ido, T. Ohgoe, and M. Imada, Phys. Rev. B **92**, 245106 (2015). [4] K. Ido, T. Ohgoe and M. Imada, Phys. Rev. B **97**, 045138 (2018). [5] K. Ido, T. Ohgoe, and M. Imada, Sci. Adv. **3**, e1700718 (2017).



編集後記

今号では、何と言っても甲元先生の受賞記事です。受賞記事と言っても、ほぼ先生の半生の話で、冒頭の語りべ調に始まり、著名な先生、赤裸々に語られる人間関係、研究や環境の展開などにすっかり惹き込まれ、そしてその率直な物言いに「物理学者」の生き様を感じ、また、ラストが。。。私には少々難解な研究の話しはありましたが、あっという間に読んでしまいました。

さて、現在、外国人客員所員としてジョンスホプキンス大学(JHU)のアーミテージ教授が滞在されています。今回の大槻特任研究員の記事はアーミテージ教授との共同研究で、同JHUとの共同研究の成果としては肥後特任研究員の記事もあります。JHUの物理・天文学科とは、頭脳循環プログラムからの経緯でMOUを結ぶことになりました。また、本号の冒頭の記事を書かれた石田助教は、記事の中にも書かれていますが、東大の国際展開事業として韓国の理研とも例えられる基礎科学研究院の強相関グループ(ソウル大学内)に、今年の4月から1年半の予定で派遣されており、このグループとも学術協定及びMOUを結んでおります。この秋に国際共同研究・共同利用拠点の申請があり、残念ながら採択はされなかったのですが、今後、国際的な取組による共同研究の成果が、この物性研だよりも益々紹介されることになっていくと思います。

最後に1つ。短期研究会「量子情報・物性の新潮流」では、記事にもありますが、非常に沢山の若い研究者、特に学生が集まり、私は会場に居たのですが、まさに熱気があり何かが起こりそうな雰囲気を感じた研究会で、とても印象的でした。

鈴木博之