

物性研だより

BUSSEIKEN DAYORI

第59巻

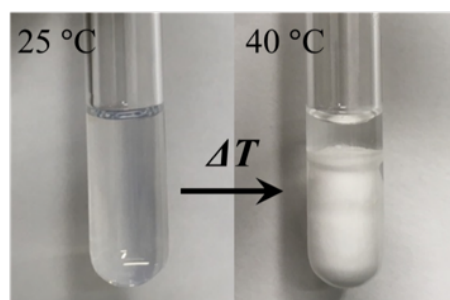
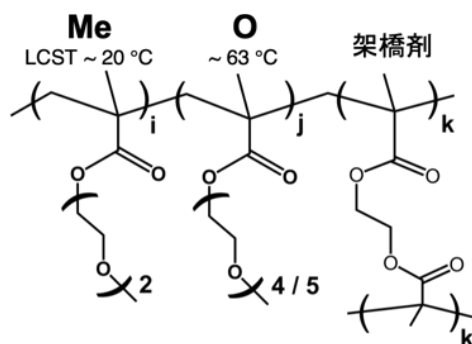
第1号

2019年4月

膨張させるとスピン配列がねじれる磁石の発見

室温で巨大な応答を示すワイル反強磁性体 Mn_3Sn の薄膜化に成功
～反強磁性デバイス開発を大きく前進～

周囲の温度に応答する高分子ハイドロゲルの物性評価

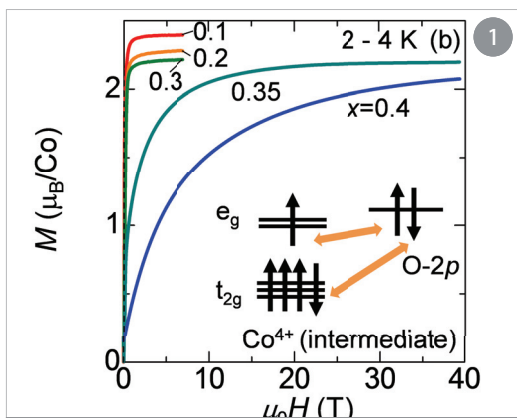


東京大学 物性研究所

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



1 膨張させるとスピン配列がねじれる磁石の発見

酒井 英明、徳永 将史、石渡 晋太郎

4 室温で巨大な応答を示すワイル反強磁性体 Mn_3Sn の薄膜化に成功
～反強磁性デバイス開発を大きく前進～

肥後 友也、Danru Qu、大谷 義近、中辻 知

7 周囲の温度に応答する高分子ハイドロゲルの物性評価

呉羽 拓真

10 エヌエフ基金 第 7 回 (2018 年度) 研究開発奨励賞を受賞して

池田 暁彦

12 第 23 回日本放射光奨励賞を受賞して

黒田 健太

14 物性研に着任して

岡崎 浩三

16 外国人客員所員を経験して

Susumu Takahashi

18 客員所員を経験して

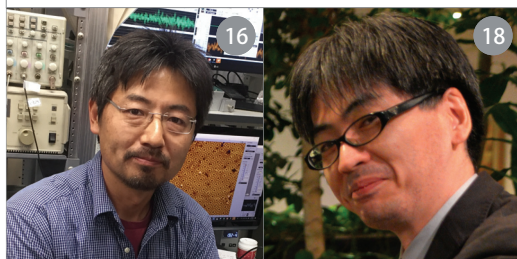
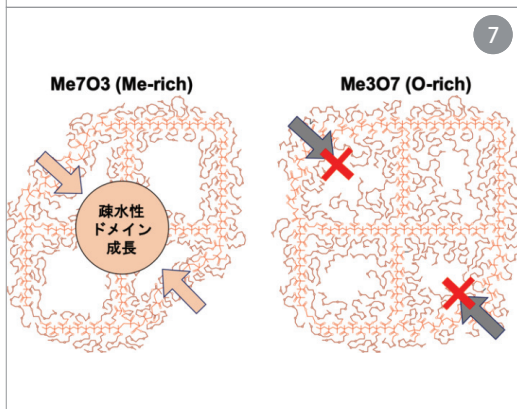
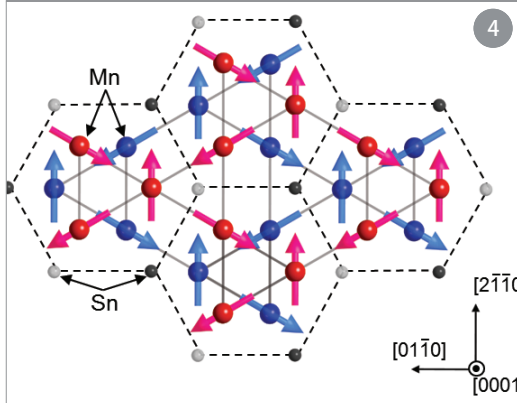
松本 祐司

20

摂待 力生

22

山口 博則



【物性研究所短期研究会】

23 ○軟 X 線放射光科学のアップシフト

27 ○「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態」

【ISSP ワークショップ】

32 ○Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology

36 【物性研究所談話会】

38 【物性研究所セミナー】

【物性研ニュース】

52 ○人事異動

編集後記

物性研だよりの購読について

膨張させるとスピン配列がねじれる磁石の発見

¹大阪大学、²国際超強磁場科学研究施設、³東京大学
酒井 英明¹、徳永 将史²、石渡 晋太郎^{3,1}

研究の背景

物質中のスピンがらせん状に配列したらせん磁性体は、スピンのねじれ方を情報として活用する新たなスピントロニクス材料となることが期待されている物質群である。ただし、このようならせん磁性を安定化させるためには、特殊な結晶構造や磁性元素の配置が必要となるため、その種類は限られてしまう。例えば、らせん磁性によりマルチフェロイック物質となるペロブスカイト型マンガン酸化物 RMnO_3 (R: 希土類元素) では、結晶構造が直方晶へ大きく歪むことにより、最近接以外の Mn スピンとの交換相互作用が重要となるため、基底状態が単純な反強磁性かららせん磁性へと変化する[1,2]。同様のメカニズムに従い物質開発を行う場合、このような複雑な結晶構造に起因する磁気的フラストレーションの制御や設計は容易ではない。これに対し、 AFeO_3 (A: アルカリ土類元素) で表されるペロブスカイト型鉄酸化物では、単純立方格子にもかかわらず、多彩ならせん磁性が発現する稀な物質系である。特に、対称性の高い結晶構造におけるらせん磁性は、磁気スキルミオンの理想的な舞台となり得るため、近年は革新的なスピントロニクス応用の観点からも有望視されている。

では、何故 AFeO_3 ではらせん磁性が発現するのか？その起源として、 Fe^{4+} という異常高原子価に由来する鉄 3d 軌道と酸素 2p 軌道の強い混成効果が提唱されている。このような状態は負の電荷移動エネルギー状態と呼ばれ、酸素ホールあるいはリガンドホール描像で記述されるため、多くの遷移金属酸化物で見られる反強磁性モット絶縁体相とは異なる新奇な遍歴磁性相が安定化されることが理論的に予想されている[3,4]。このため本系の磁性は p-d 混成の強さに非常に敏感であり、単純立方格子を保持したまま A サイトのイオン半径を変化させるだけで、らせん磁性を大幅に制御できる。実際、 SrFeO_3 では、らせん磁性の伝播ベクトルが $\langle 111 \rangle$ 方向であるが、 BaFeO_3 では伝播ベクトルが $\langle 001 \rangle$ 方向へ移り変わったらせん磁性が安定となる。

同じく後期遷移金属で Co^{4+} の異常高原子価状態を有するペロブスカイト型コバルト酸化物 ACoO_3 も興味深い磁性を示すことが知られている。 SrCoO_3 は、 SrFeO_3 と同

じ単純立方格子を有するが、室温強磁性体 ($T_c=305$ K) であり[5-8]、 SrFeO_3 と大きく異なる磁性を示す。またごく最近では、A サイトを Sr よりもイオン半径の小さい Ca で置換した CaCoO_3 が直方晶に歪んだ反強磁性体となることが報告され[9,10]、本系でも A サイトに敏感な磁性や格子構造が明らかとなりつつある。そこで本研究では、これまで未開拓であった A サイトのイオン半径を Sr よりも大きい Ba で置換した $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ を開拓し、らせん磁性を含む新奇磁気状態を探索することを目的とした[11]。

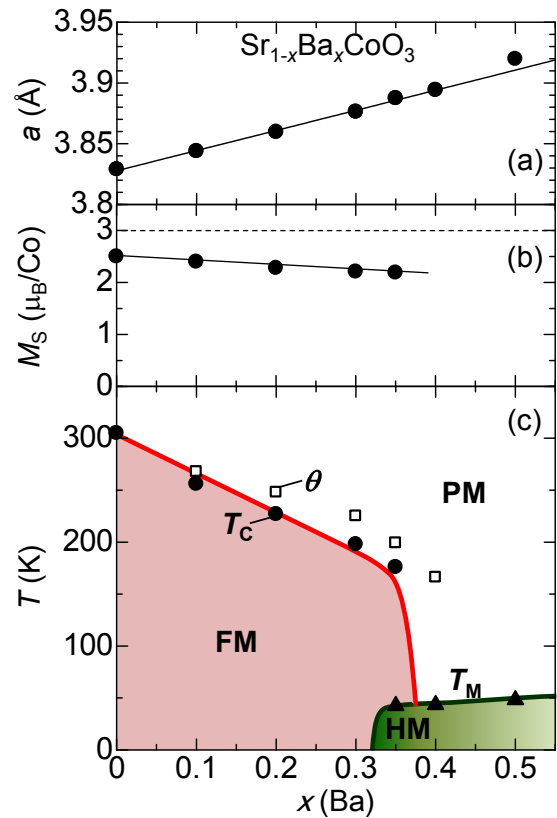


Fig. 1: 立方晶ペロブスカイト型 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ 単結晶の (a) 格子定数(室温), (b) 飽和磁化(2-4 K)の Ba 置換量(x)依存性。(b) における点線は Co^{4+} 中間スピン状態の理論値。(c) 本系の磁気相図。 T_c と T_m はそれぞれ強磁性 (FM) 転移温度とらせん磁性 (HM) 転移温度を表す。常磁性 (PM) 相における帯磁率の温度依存性から見積もったワイス温度 θ も一緒にプロットしている。

最後に、 $x=0.4$ における磁気秩序の微視的状態を明らかにするため、本物質の単結晶中性子回折実験の結果を紹介する。詳細は論文[11]に譲るが、 T_M 以下で変調波数 $\langle\delta\ \delta\rangle$ ($\delta=0.079$)を有する磁気散漫散乱が観測され、約 28\AA の長周期らせん磁性秩序が発達していることが示唆された。実際、この磁気状態は第一原理計算でほぼ定量的に再現することができ、立方晶ペロブスカイトのようにシンプルな結晶構造をもつ酸化物であっても、遷移金属と酸素の間に生じる強い化学結合を制御することでらせん磁性が生じることが実証された。

今後の展開

本研究で見出された $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ における格子非整合のらせん磁性秩序は、格子サイズの増大により、Co-O-Co 間にはたらく強磁性的な二重交換相互作用に対し、反強磁性的な超交換相互作用による利得が大きくなったため生じたと予想されるが、微視的メカニズムの詳細は明らかではない。今後、単純立方格子上の多軌道系における交換相互作用とその基底状態の問題として理論研究の進展が期待される。また、中性子回折実験の半値全幅から予想される磁気相関長は約 12\AA であり、らせん磁性秩序が最低温でも短距離である点に関しても、十分な理解には至っていない。Ba 置換や酸素欠損によるランダムネスが一因とも考えられるが、強磁性の強い揺らぎ(短距離相関)と競合している可能性も高い。この意味で、ランダムネスの影響なく格子サイズを制御できる外部圧力効果は、今後の重要な研究テーマの一つである。

デバイス応用の観点からは、 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ は薄膜基板上での単結晶成長に適したシンプルな立方晶構造をもつため、酸化物スピントロニクスへの展開が期待される。また、本研究で観測された結晶格子の増大による強磁性-らせん磁性転移は、負の化学圧力による磁性スイッチングと見なすことができ、新たな圧力センサーや磁気アクチュエーターへの応用も期待できる。

謝辞

本研究は、東京大学の横山翔氏、桑原且幸氏、有田亮太郎氏、十倉好紀氏、東京大学物性研究所の三宅厚志氏、ポール・シェラー研究所の J. S. White 氏、E. Canévet 氏、スイス連邦工科大の H. M. Rønnow 氏、東北大学の是常隆氏、の協力のもと行われた。

参考文献

- [1] T. Kimura et al., Nature 426, 55 (2003).
- [2] M. Kenzelmann et al., Phys. Rev. Lett. 95, 087206 (2005).
- [3] M. Azhar and M. Mostovoy, Phys. Rev. Lett. 118, 027203(2017).
- [4] M. Mostovoy, Phys. Rev. Lett. 94, 137205 (2005).
- [5] P. Bezdzicka et al., Z. anorg. allg. Chem. 619, 7 (1993).
- [6] M. Abbate et al., Phys. Rev. B 65, 165120 (2002).
- [7] S. Balamurugan et al., Phys. Rev. B 74, 172406 (2006).
- [8] Y. Long et al., J. Phys.: Condens. Matter 23, 24601 (2011).
- [9] H. Xia et al., Phys. Rev. Materials 1, 024406 (2017).
- [10] T. Osaka et al., Phys. Rev. B 95, 224440 (2017).
- [11] H. Sakai et al., Phys. Rev. Mater. 2, 104412 (2018).



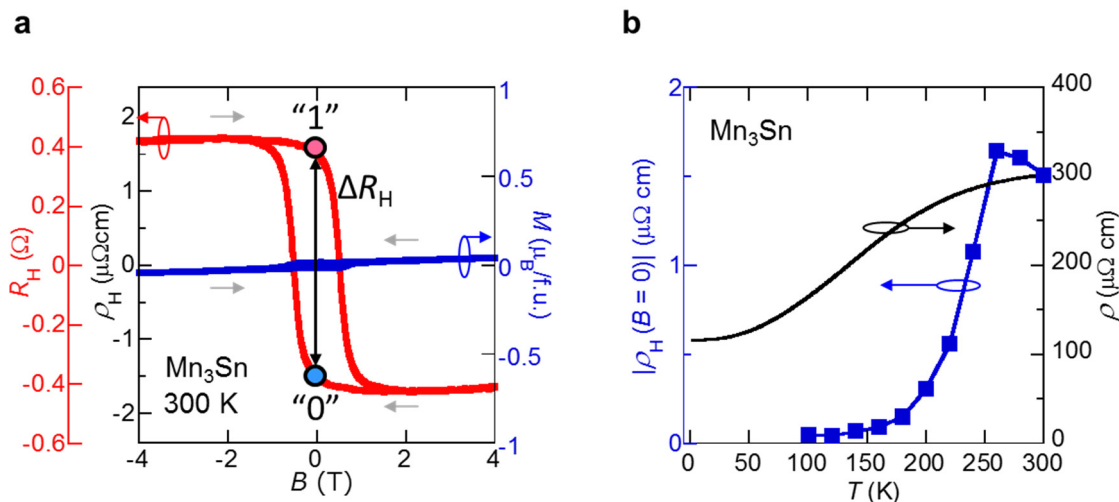


図 2 (a) 室温 (300 K) でのホール抵抗率 ρ_H とホール抵抗 R_H 、面直磁化 M の磁場 B 依存性。強磁性体の 1/1000 程度の磁化しか持たない一方で、非常に大きな異常ホール効果を示している。(b) ゼロ磁場異常ホール抵抗率 $\rho_H(B=0)$ と抵抗率 ρ の温度依存性。

室温で得られた巨大な異常ホール効果が 260 K から低温に向かって急激に減少する振る舞いが観測された (図 2b)。この振る舞いは、巨視的な時間反転対称性 (TRS) の破れによりワイル金属状態が実現している Inverse triangular スピン構造 (260 – 430 K) から、TRS の破れのない Helical スピン構造 (< 260 K) への相転移に対応するものだと考えられる。以上の結果は、今回作製した Mn_3Sn 薄膜がバルク単結晶試料と同様の特性を持ち、 Mn_3Sn の特徴的な磁気構造や電子構造がもたらす巨大なベリー曲率に由来する異常ホール効果が Mn_3Sn 薄膜においても現れていることを強く示唆している。

デバイス化した際に読み出し信号として用いられる異常ホール抵抗 R_H は膜厚 d に反比例して大きくなるため、薄膜化することで信号強度が増強されるが、今回作製した薄膜では異常ホール抵抗の変化量 ΔR_H が約 0.8Ω となり、 Mn_3Sn のバルク試料に比べて実に 500 倍ほど大きな信号が得られた (図 2a)。この信号は、 $CuMnAs$ [7] 等の反強磁性体薄膜において近年観測された異方性磁気抵抗効果と比較しても 100 倍程度大きい。異常ホール効果は、メモリ内で記憶する情報である“0”と“1”に対応する 2 値の信号が異なる符号を持つため、読み取り時の測定誤差を抑えることが可能であるという利点を持っている。

今後の展開

強磁性体と同様に電気や光、熱に対して巨大な応答を示す反強磁性体 Mn_3Sn は、強磁性体と反強磁性体の両方の機能性を併せ持つ次世代の磁性材料であり、本研究の成果

である薄膜技術を用いることで、今後実用化を目指した機能性反強磁性体の応用研究が急速に進んでいくことが期待される。その具体的な応用例として、今回、本研究グループが薄膜試料において観測した「異常ホール効果」を用いた高速・高密度な不揮発性磁気メモリがまず挙げられるが、バルク試料で既に確認されている熱や光に対する応答や新奇な電流-スピン流変換特性[9]を用いることで、さらに幅広い展開も期待できる。たとえば、熱などの未利用エネルギーを用いて発電を行うエナジーハーヴェスティング分野で注目されている異常ネルンスト効果を用いた熱電変換素子への適用が考えられる。異常ネルンスト効果では、熱流に垂直に配置された電極間に電圧が生じるため、本薄膜作製技術を用いて素子の大面積化・高集積化を行うことで、より大きな発電電圧を得ることが可能となる。

謝辞

本研究は、米 Johns Hopkins 大の Yufan Li 氏、C. L. Chien 氏との共同研究、Lippma Mikk 氏、Jiyeon Lee 氏、高橋竜太氏、石井理恵子氏によるサポート、三輪真嗣氏、近藤浩太氏、小林鮎子氏、西川尚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)、JST-CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域(研究総括：上田 正仁)課題番号 JPMJCR18T3

周囲の温度に応答する高分子ハイドロゲルの物性評価

東京大学物性研究所 吳羽 拓真

1. 刺激応答性ハイドロゲル

寒天やコンタクトレンズ、紙おむつなど、我々の身近には「ゲル」が溢れている。このハイドロゲルは、自身の約9割が水であり、ポリマー鎖が三次元に架橋され、膨潤したネットワーク構造を有する代表的なソフトマターである。特に、外部の環境(温度、pH、光照射など)に応答し、体積(膨潤・収縮状態)を変化させる外部刺激応答性ゲルは、センサー、アクチュエータ、ドラッグデリバリーなどの最先端材料母体として期待されている。この刺激応答性の所以は、ゲルを構成するポリマー鎖の特徴により決まる。その中で、近年、下限臨界共溶温度(LCST)を有し、かつ生体適合性の高いポリマー(以下、pOEG)が注目されている[1,2]。pOEGポリマーの基本骨格はメタクリレートの主鎖に対し、オリゴエチレングリコールの側鎖を有しており、この側鎖が温度変化によって水和・脱水を引き起こすため、ゲルが膨潤・収縮挙動を示す。また、側鎖のエチレングリコールユニット数に依存して応答する温度領域も変わるため、基本的には側鎖ユニット数が異なる2種のポリマーを共重合することで目的の温度に応答するゲルを調整することができる(図1)。

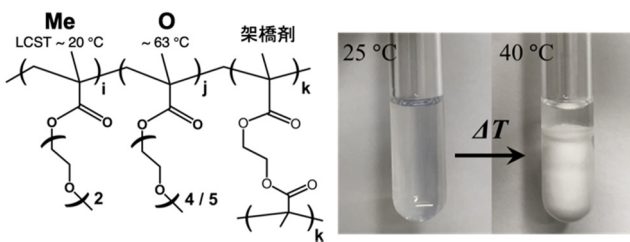


図1. pOEGポリマー構造式。エチレングリコール数が異なるMeとO成分が架橋された共重合ゲルを使用。写真はゲルの膨潤状態(25°C)と収縮状態(40°C)。

2. 本研究の狙い

しかし、現状では、このポリマーを架橋したハイドロゲルの温度応答性メカニズムや、それに伴う物性変化の知見は乏しく、機能向上に向けた設計指針等に活きる構造・物性情報が必要である。そこで本研究では、側鎖に異なるエチレングリコールユニット数を有するポリマーが共重合さ

れた pOEG ゲルの物性を評価することを試みた。特に、ゲルに光を照射し、得られる散乱光強度の時間変化を測定することでポリマーのダイナミクスを抽出する動的光散乱法(DLS)を用いて、温度によって変化するゲルの動的物性を評価した。

3. DLSによるゲルダイナミクス評価

本研究では、エチレングリコールユニットを2つ持つMe成分と4または5つ有するO成分を、それぞれ異なる比(単成分から7:3, 5:5, 3:7など)で共重合し、異なる臨界温度(T_c)を有する5種類のゲルを調製した。得られたゲルは、膨潤時には透明であるが、昇温し T_c 付近になると収縮(脱水)するため白濁する(図1)。

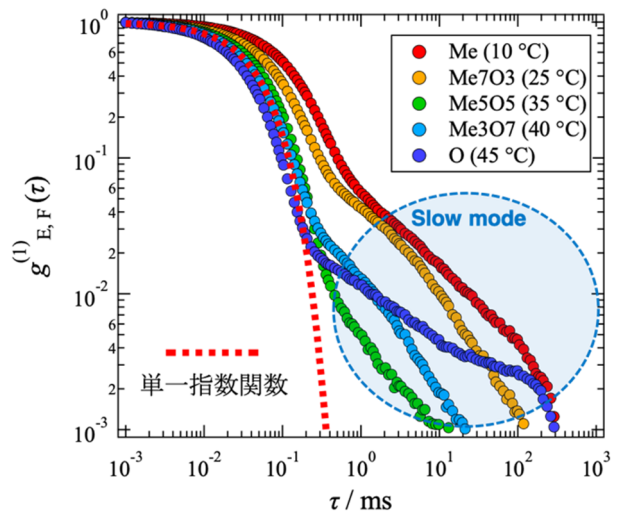


図2. 5つのpOEGゲルの自己相関関数。協同拡散(Fast mode)とSlow modeの2つの運動の緩和を観測。

図2に膨潤状態の各ゲルから得られた自己相関関数を示す。従来、ゲルをDLSにより測定すると、単一指数関数で記述できるポリマーの運動を観測でき、これを協同拡散(Fast mode)と呼ぶ。5つのゲル共に協同拡散挙動が観測されたが、さらに遅い遅延時間(τ)において、遅い運動(Slow mode)も観測された。この自己相関関数の解析は、FastとSlow modeをそれぞれ記述する2つの式の足し合わせでフィッティングし、解析を行った。

解析や、温度変化によるやわらかさの変化についても評価を行っており、本ゲルの物性・構造の全容を捉え、新たな機能創出に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、物性研究所 柴山充弘教授、Li Xiang 助教の協力のもと行われました。この場をお借りして御礼申し上げます。また、JSPS 特別研究員奨励費(18J02101)の助成を受けて行われました。

参考文献

- [1] Lutz, J.-F.; Hoth, A. *Macromolecules* 2006, 39, 893.
- [2] Lutz, J.-F.; Weichenhan, K.; Akdemir, Ö.; Hoth, A. *Macromolecules* 2007, 40, 2503.
- [3] Kureha, T.; Hayashi, K.; Ohira, M.; Li, X.; Shibayama, M. *Macromolecules*, 2018, 51, 8932.



エヌエフ基金 第7回(2018年度)研究開発奨励賞を受賞して

附属国際超強磁場科学研究施設 池田 暁彦

この度私は、一般財団法人エヌエフ基金の研究開発奨励賞をいただきました。この賞は、革新性と独創性の高い、かつ科学や技術の進歩、発展に役立つ研究開発に対して、一般財団法人エヌエフ基金から授与されるものです。受賞対象となった研究は「独自開発超高速ひずみ計測装置による極限強磁場中スピン格子科学の開拓」というものです。本研究では、ファイバブラッググレーティングという新しいセンサ素子を応用して世界最速の超高速 100 MHz ひずみ計測装置を作り、これを使って、「1000-100 テスラ領域における磁歪計測を可能にしました [1]。実際にコバルト酸化物のスピン転移、2次元量子磁性体の磁化過程、固体酸素の超強磁場相転移などを、磁歪計測で観測することに成功し、新たに「超強磁場中スピン格子科学」を切り開いたと考えています [2, 3]。

さて、本賞には特色的な点がありますので、お伝えしたいと思います。本賞の特色は表彰式で受賞者の発表会があることです。まず全応募者の中から 10 人程度の受賞者が選出され表彰式への参加依頼が送付されます。この表彰式で 10 人全員が審査員と参加者の前で順番に口頭発表させられます。発表資料は 1 週間前までに事前提出。発表が 12 分で質疑が 8 分で、質疑は平均的に少し圧迫的でした(審査だから)。発表会は午前中から昼過ぎまで(自分もトップバッター)、つづいて偉い先生の面白い発表があり、夕方に審査員の審議、最後に 2 名の優秀賞が選出されました。結果として発表・質疑がともに高レベルであった 2 名が選出され、私は選出されませんでした。ここが運命の分かれ目です。普通の受賞者の副賞は 10 万円。優秀賞の副賞は 50 万円(!!!)なのです。10 万円でも十分多いですが、私はこの 50 万円を狙って、かなり気合いを入れて発表の準備をしていきました。当日の発表はうまくいった(と思う)のですが、質疑で意地悪な質問にあい、つまづいてしまいました。授賞式では敗北感に打ちひしがれ、悔しくて泣きそうでした。一方、優秀賞の受賞者たちは(当然の結果かな・・・)と自信の表情を浮かべているように見えました。く、くやしい、...

懇親会で選考委員で唯一近い人物である本所の勝本先生に聞くと「池田さんの発表は悪くなかったよ」とフォローしてくださいました。「じゃああと少しで受賞でしたか?」と聞くと、「それは全然」とのことでした。優秀賞の研究がかなり良かったそうです。家に帰って妻に「リゾート家族旅行の話は無くなったよ。」というと、妻は「絶対に勝てないと思っていた。M1 でもトップバッターが優勝したことはない。」と慰めてくれました。そんな関係あるか!と思う一方で、そのせいだったら良かったのに・・・、とも思いました。

まあ、賞状も副賞もいただきましたし、なによりこんな気持ちに気づかせてくれたことに感謝します。また、普段接することの少ない、電気系、デバイス系、惑星探査、生命科学などの若手研究者のまとまった発表を聞く機会に恵まれ、さらに、特別講演会で拝聴した「新しい測定原理の実証・・・渦流量計の創造」では、新規測定手法開発に共通する難しさと戦った歴史を面白く拝聴しました。懇親会でも若手研究者間の交流、計測標準の更新に関するスピーチ、熱力学の新展開に関するスピーチ(by 勝本先生)など面白い話があり、結構楽しかったです。

本賞の目的は主体的に研究を展開する若手研究者を奨励することだそうです。物性研の若手研究者の方々が今後本賞に応募され、優秀賞を獲得されることを切に願っています。募集分野として「先端計測」、「環境・エネルギー」の 2 つがあり、私は前者で応募しました。物性研ではどちらかに該当する人は多いと思います。「先端計測」は言わなくてもなのですが、「環境・エネルギー」の方にはスピントロニクス、新規メモリデバイス、エネルギー変換など、新規機能物性、新規デバイスが広範に含まれます。昨年度は「環境・エネルギー」のほうがレベルが高かった気がします。

最後になりますが、本研究は物性研内外の共著者[1-3]の方々との共同研究です。ここに感謝申し上げます。



私と北森先生(エヌエフ基金 代表理事)@表彰式

- [1] A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato, Rev. Sci. Instrum. 88, 083906 (2017).

- [2] A. Ikeda, Y. H. Matsuda and H. Tsuda, Rev. Sci. Instrum. 89, 096103 (2018)

- [3] 池田暁彦、松田康弘、「ファイバースラッググレーティングを用いた高速 100MHz ひずみ計測装置の構築と超強磁場中スピン格子物性の開拓」、固体物理 Vol. 54, No. 3, 147 (2019)



Kuroda, M. Ochi, H. S. Suzuki, M. Hirayama, M. Nakayama, R. Noguchi, C. Bareille, S. Akebi, S. Kunisada, T. Muro, M. D. Watson, H. Kitazawa, Y. Haga, T. K. Kim, M. Hoesch, S. Shin, R. Arita, and Takeshi Kondo, *Physical Review Letters* **120**, 086402 (2018).

[2] “Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal”, K. Kuroda[†], T. Tomita[†] [[†]:equal contribution], 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, Takeshi Kondo, S. Nakatsuji, *Nature Materials* **16**,1090 (2017).

[3] “真空紫外および軟 X 線領域の放射光角度分解光電子分光を用いた新しいトポロジカル物質相の研究”、黒田健太、放射光 **32** 号、p104 (2019).

[4] “軟 X 線で決定する物質のバンドトポロジー～トポロジーは見かけより中身が大事～”、黒田健太、近藤猛、物性研だより **58** 号、p7 (2018).



物性研に着任して

極限コヒーレント光科学研究センター 岡崎 浩三

2019年2月16日付で極限コヒーレント光科学研究センター(LASOR)准教授に着任しました。着任前も特任准教授として物性研に在籍していたこともあり、この記事を書くのは二回目になります。自身の研究経歴などを紹介することで自己紹介とするのがこの記事の一般的な書き方かと思いますが、これについては既に前回(物性研だより第54号第4号)書きましたのでそちらを参照して頂くことにして(となるとあまり書くネタが思い浮かばないのですが)、特任准教授着任後から現在までの研究を振り返るとともに、今後の展望などを書かせて頂きたいと思います。

岡崎研究室ではこれまで、主に高次高調波レーザーを用いた時間・角度分解光電子分光(TARPES)装置の開発と、この装置と極低温超高分解能レーザー角度分解光電子分光(ARPES)装置を併用することによる電子物性研究を推進してきました。特任准教授着任当時は、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体における超伝導の機構解明を目指した研究において、様々な重要な発見が高エネルギー分解能ARPESという実験手法によってなされたことによって、この手法の重要性が広く認識されていたのに対し、これら的高温超伝導体や強相関電子系を対象としたTARPESの例はそれほど多くはなく、TARPESを用いることで、これらの物質を対象としてどのようなことがわかるのか、さらには高次高調波を用いることでどのようなことが出来るのかも(少なくとも私には)、あまりわかっていなかった状況だったように思います。

それまでのTARPESあるいは時間分解光電子分光(TRPES)での研究例は、強相関電子系ならではの、もしくは高温超伝導体ならではの光励起緩和過程を観測し、その特徴を捉える。遷移金属カルコゲナイドが代表的な電荷秩序(CDW)を示す物質において、CDW相からの光励起によって絶縁体-金属転移を観測する。時間的に周期的なポテンシャル下で現れるフロッケ状態を観測する。プローブ光に軟X線を用いることで内殻準位の光励起緩和過程を観測し、その特徴を捉える。等が典型的だったように思います。

特任准教授着任後は、高次高調波レーザーTARPES装置を整備していくとともに、この装置ならではの結果を得

るための試行錯誤がありました。TARPES測定では光電子の励起に用いるプローブ光として、非線形光学結晶を用いた波長変換による6 eVの真空紫外光を用いるのが一般的でしたが、6 eVでは測定できる運動量-エネルギー範囲が非常に限定されてしまいます。一方、高次高調波発生(HHG)による極紫外光、軟X線であればその問題は解決されますが、HHGの効率は固体の波長変換のそれよりも桁違いに低いと、繰り返し周波数が低いパルスレーザーを用いる必要があり、測定効率が悪く、高エネルギー分解能での測定は難しい、という難しさがありました。

いくつかの測定を試みた中で、鉄系超伝導体母物質BaFe₂As₂におけるホール面と電子面とで位相が反転したコヒーレントフォノン励起、励起子絶縁体Ta₂NiSe₅における光誘起励起子絶縁体-半金属転移など、高次高調波レーザーTARPESならではの自信が持てる結果が得られるようになりました。このような研究を通して見えてきたことは、電子構造研究によって物性の発現機構をより理解することで、光によって物性を制御する指針も得られる、ということです。今後は、ポンプ光にフォノンのエネルギーに対応する中赤外光やテラヘルツ光を用いることで、さらに光による物性制御の可能性も広がると考えています。この実現にはさらなるレーザーのアップグレードが必要になりますが、なんとか実現したいと考えています。

また、今後は大強度連続波レーザーを用いた光電子顕微鏡(PEEM)にも取り組んでいきたいと考えています。近年、鉄系超伝導体や銅酸化物高温超伝導体の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が実現されていることが実験的に明らかになってきており、このような電子状態は液晶からのアナロジーで「電子ネマティック」状態と呼ばれています。このような物質のPEEM像を、互いに垂直な直線偏光のレーザーで観測し、その差分である線二色性を取ることで、電子系が回転対称性を破っていることが直接観測出来ることがわかってきました。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は特異なドメイン構造が存在することもわかってきています。このような電子ネマティック状態は鉄系や銅酸化物以外にも強相関電子系において普遍的に存在すると

期待されるので、PEEM による観測によってそれを立証していきたいと考えています。さらには、電子ネマティック状態では回転対称性が破れているため、ドメイン境界が存在します。このドメイン境界では時間反転対称性が破れている可能性がいくつかの実験で示唆されており、ネマティックドメイン境界における時間反転対称性の破れの普遍性についても左右の円偏光の差分である円二色性を用いることで検証できる可能性があります。

極低温超高分解能レーザーARPES、高次高調波レーザーTARPES、大強度連続波レーザーPEEM を用いることで、それぞれエネルギー・時間・空間的に微細なスケールの電子状態を直接観測出来るようになります。物質中の電子状態にはエネルギー・時間・空間的に特徴的なスケールが存在すると考えられますが、これら3つの手法を追及することで直接観測出来る電子状態のスケールをさらに微細なものにすることが出来ます。この実現にはレーザーのアップグレードにとどまらず、それぞれの測定手法に適したレーザーの開発なども必要になると考えられ、さらにはこれらの微細なスケールを追及することでどのような物質のどのような電子状態が測定対象になるのかなども考えていく必要があります。これにはLASORをはじめとする物性研の皆様との協力が不可欠であり、今後とも共同研究などご協力を賜りたいと考えています。

以上、前回執筆以降の物性研での研究を振り返り、今後の展望のようなものを思いつくままにとりためもなく書き綴ってしまいましたが、これをもって着任のご挨拶とさせて頂きたいと思います。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。



外国人客員所員を経験して

Susumu Takahashi

Department of Chemistry/Department of Physics & Astronomy,
University of Southern California, Los Angeles, CA 90089, USA

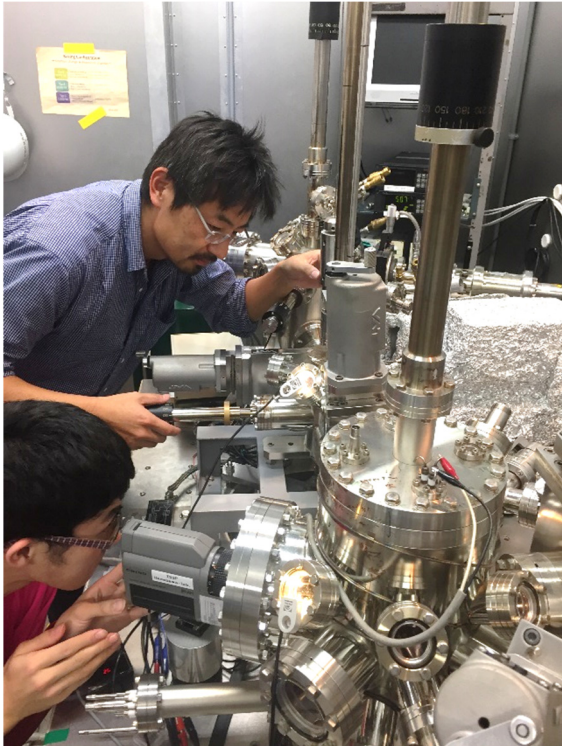
Among many analytical techniques, magnetic resonance including electron spin resonance (ESR) spectroscopy interrogates unpaired electron spins in solids and liquids to reveal local structure and dynamics; for example, ESR has elucidated parts of the structure of protein complexes that have resisted all other techniques in structural biology. ESR can also probe the origin of decoherence in condensed matter, which is of fundamental importance to the development of quantum information processors. However, its intrinsically low sensitivity precludes ESR analyses of samples with very small volumes. For example, with a current typical spectrometer setup, $>10^{10}$ electron spins are required to obtain ESR signals at room temperature.

I stayed at ISSP from September to December 2018. During my stay, I worked on development of ESR spectroscopy using a scanning tunneling microscopy (STM) technique in collaboration with Prof. Hasegawa research group. In particular, the project aimed to demonstrate observation of ESR signals by detecting changes in the tunneling current due to changes of the spin polarization of the sample. This STM-based ESR (STM-ESR) technique will increase the ESR sensitivity drastically by enabling detection of ESR from a spin in a single atom. STM also provides atomic-scale positioning of the target atoms. Thus, the STM-ESR technique will provide a unique platform with unprecedented spectral resolution, sensitivity and versatility for fundamentals and applications in quantum and solid-state physics. On the other hand, there are many challenges to achieve the demonstration including search of a stable spin system which provides a high contrast in the spin-dependent tunneling current and long spin relaxation times, and development of a STM system with microwave excitation effectively coupling to a target spin system.

Because of a limited period of my stay, our investigation focused on a proof-of-principle STM-ESR experiment with Cobalt (Co) nanostructure on the Copper (Cu) surface. Co nanostructure on the Cu surface has been known to exhibit ferromagnetism and often used for spintronics research. The ferromagnetism has also been observed by the spin-polarized STM (SP-STM). In the experiment, Co nanoislands were created by deposition of Co atoms on the (111)-cut Cu surface and then SP-STM was performed to probe successful creation of ferromagnetic Co nanoislands. Finally, we applied microwave excitation for STM-ESR, however we found that improvement of microwave circuits in the STM system was required for demonstration of STM-ESR and decided to upgrade the microwave system before performing further experiment.

In summary, my stay was extremely productive and enjoyable because of daily interactions with group members in the Hasegawa laboratory and other members at ISSP. In particular, I would like to thank Prof. Hasegawa for being a host of my visit and many fruitful discussions about the STM-ESR project and many others. The lab trip to a hot spring hotel in Tsuruoka, Yamagata prefecture was unforgettable by relaxing in the hot spring and refreshing with trail walk in an autumn mountain. I would also like to thank Dr. Hung-Hsiang Yang and Dr. Kanta Asakawa for performing the STM-ESR experiments and productive discussion about the experiment and the design of the STM system. I also enjoyed discussion about various topics in STM science with Masayuki Hamada, Fumikazu Oguro and Yudai Sato in the Hasegawa laboratory. Furthermore, I would like to thank Prof. Jun Yoshinobu, Prof. Yohei Kobayashi and Dr. Shuntaro Tani for the collaborations on my diamond project. In my

spare time, I joined social activities at ISSP. In particular, I enjoyed the I♥cafe by meeting and chatting with members at ISSP. Moreover, I had a great time by joining the ISSP lunch-time soccer regularly and by winning the annual soccer competition at the Kashiwa campus as a member of the ISSP soccer team!



- Y. Matsumoto, V. Nagarajan,, ACS Nano, **7**, 10079 (2013).
- [3] R. Tanaka, R. Takahashi, S. Takata, M. Lippmaa and Y. Matsumoto, CrystEngComm, **17**, 3701 (2015).
- [4] S. Maruyama, N. Sannodo, R. Harada, Y. Anada, R. Takahashi, , M. Lippmaa, Yuji Matsumoto, “Pulsed laser deposition with rapid beam deflection by a galvanometer mirror scanner”, submitted.
- [5] S. Maruyama, I.-B.-H. Prastiawan, K. Toyabe, Y. Higuchi, T. Koganezawa, M. Kubo, and Y. Matsumoto,, ACS Nano, **12**, 10509- (2018).
- [6] Y. Matsumoto and S. Maruyama, Ionic Liquid Devices, edited by A. Eftekhari Smart, Materials Series No. 28 (RSC, London, UK, 2018), Chap. 6.p. 136.



それでも最低温度 10mK が圧力セル内部では 80mK 程度に上昇します。ところが、はじめに上床研でドハース実験したところ、600mK 程度まで温度上昇してしまいました。これは、大阪大学や新潟大学で使っていた希釈冷凍機がトップロード型で、圧力セルも ^3He - ^4He 混合液に浸っていたのに対し、上床研の希釈冷凍機は混合器から磁場中心までを熱伝導で冷やすタイプであるため、金属製圧力セルの渦電流発熱に対する冷却が追いつかなかつたためと思われる。そこで、熱伝導や変調磁場用コイルのサイズ、位置、変調磁場の大きさ、検出モードを見直すことで、110 mK 程度まで発熱を押さえられるようになりました。図 1 に、0.53 GPa の圧力下で CeRh_2Si_2 の c 軸(正方晶)方向に磁場を印可したときのドハース振動の様子を示します。さらなる加圧とともに 0.8 GPa の圧力ではドハース振動を観測できなくなりましたが、これは比較的低压側から電子の有効質量が増大していることによるものと思われます。以前 a 軸方向の磁場に関しては、岡山大学の荒木新吾さんが、詳細に研究されていますので、本研究を継続し、比較検討したいと思っています。

この 1 年間の活動では、ドハース観測システムの構築まではこぎつけましたが、ドハース用の圧力セルの高圧化までは進めませんでした。幸い、今年度から、科研費の課題として、高圧下のドハースの開発に取り組めることになりました。今年度の液体ヘリウムの供給状況は物性研究所においてすら、大変厳しいようですが、好転するまでの間にドハース用の圧力セルの改良から取り組んでいきたいと思っています。また最近、徳永研の栗原さんが、パルス強磁場下での超音波を用いた音響ドハースを CeRhIn_5 で観測し、大変興味深い結果を得ています。私も学生時代の最初の研究テーマが音響ドハースでしたので、圧力下の音響ドハース実験の共同研究にも今後取り組んでいきたいと思っています。

最後になりますが、客員期間中は、上床先生はじめ、郷地さん、長崎さんには大変お世話になりました。上床先生には、研究計画の立案から実験環境の整備、滞在中での様々な事柄についての支援、議論していただきありがとうございました。郷地さんには、私のところに所属していた博士後期課程の学生、角田竜馬氏のパームキュービックアンビルを用いた無冷媒希釈冷凍機や ^3He クライオスタットでの実験の際にご指導いただき、ありがとうございました。上床研究室でのパームキュービックアンビルを用いた実験により、反強磁性体 CeAl で新奇な圧力誘起相を見だし、博士学位の取得につながりました。長崎さんには、実験に

必要な部品や寒剤の準備に大変お世話になりました。特に、希釈冷凍機の液体ヘリウムを長期に維持していただいたおかげで、とびとびにしか来所できなかったにも関わらず、効率的に実験を進めることができました。ありがとうございました。物性研の皆様、今後ともどうぞよろしくお願い致します。



客員所員を経験して

大阪府立大学 山口 博則

2018年度の1年間、物性研究所で客員准教授をさせていただきました。ホストである榊原俊郎教授をはじめ、助教の橘高俊一郎さん、研究員の河野洋平さん(現所属：大阪府立大学)、秘書の菱沼有美さんには、大変お世話になりました。関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

榊原研究室との初めての共同研究は2011年まで遡ります。その後、継続的に外来研究員として共同利用を実施してきました。そして2018年度は、客員所員として、1年間腰を据えて大きな研究課題に取り組むことができました。これまでを通して、榊原研究室に所属していた様々な学生さんや研究員の方々と接する機会があり、楽しく有意義な時間を過ごすことができました。また、滞在期間中には、物性研究所の様々なイベントにも参加させて頂く機会がありました。教員、職員、学生が一丸となって、より良い研究の場、仕事の場、そして学びの場を作り上げていこうとする意識が強く感じられました。私にとって、とても貴重な体験となっています。

共同研究の上では、主に極低温下での物性測定を行わせてもらいました。榊原研究室には、独自に開発された広範な測定条件下での物性測定システムがあります。私の最近の取り組みは試料合成であり、新しく合成した試料を榊原研究室に持ち込んで、それらがどのような未知なる物性を見せてくれるのかを検証しました。十分過ぎる程の高精度な測定データが得られるため、試料を携えて訪問することを毎回心待ちにしていました。得られた実験データに関して、コーヒーを飲みながら議論を行う慣例も、楽しいひと時でした。

客員研究でのテーマは「フェルダジラジカルによって構築される新規量子スピンモデルの極低温物性」でした。私の取り組む試料合成では、安定有機ラジカルの一種であるフェルダジラジカルを用いて、量子スピン系と呼ばれる物質群を作っています。量子スピン系は、スピンの量子性を最大限に引き出した磁性体です。それらの磁気状態を明らかにしていくことは、スピンの量子性に着目した次世代科学技術の源泉となる先進的・基盤的な研究となっています。2016年のノーベル物理学賞によって改めて注目を集めたハルデン鎖はその典型例です。量子スピン系におけ

る未知なる量子物性の解明に向けた研究への関心が、近年益々高まっています。量子物性を最も明確に観測するためには、温度を下げる必要があります。そこで、榊原研究室の希釈冷凍機を用いた極低温下での物性測定が強力なツールとなります。磁化および比熱に関して、最低温度70mK、最大磁場14 Tの広範な条件下で、1mg以下の微小試料においても高精度の実験データを得ることができます。昨年度は、客員所員として、十分な実験時間を確保させて頂くことができました。新しく合成した多彩な量子スピン系物質に対して、実験を行うことができ、スピンの量子性の新たな一面を、実験的に明らかにすることができました。また、多くの物質を対象とすることで系統的な理解も深まり、中長期的な目標において研究を大きく進展させることができました。多くの研究成果が得られ、現在までに英文学術誌に3報の論文を掲載するに至っています。

客員所員としての期間は、あっという間に終わってしまいましたが、今後も引き続き共同利用を進めさせて頂きたいと思っています。また、物性研究所には、榊原研究室に限らず、様々な研究グループにおいて世界に誇れる独自の実験設備が稼働していますので、共同利用の幅を広げて様々な所員の方々と共同研究を進めていけたらと考えています。今後ともよろしくお願い致します。

物性研究所短期研究会

軟 X 線放射光科学のアップシフト

日時：2018 年 11 月 30 日(金)～2018 年 12 月 1 日(土)

場所：物性研究所本館 6 階 大講義室 (A632)

WEB 中継：SPring-8 中央管理棟 1 階会議室

主催：東京大学物性研究所

共催：東京大学放射光分野融合国際卓越拠点

VUV・SX 高輝度光源利用者懇談会

東北大学

協賛：日本放射光学会

日本表面真空学会

研究会提案代表者：松田巖（物性研）

世話人：松田巖、有馬孝尚、原田慈久、和達大樹、近藤猛、辛埴（東京大学）

2018 年 7 月 3 日に文部科学省が次世代放射光施設(軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源)の推進に際し、国側の主体である量子科学技術研究開発機構のパートナーとして一般財団法人光科学イノベーションセンターを選定したことを発表しました。これにより、同施設の整備・運用に関する詳細を具体化するための検討・調整が産・官・学で開始されることになりました。

本施設は我々の悲願であった軟 X 線放射光施設であり、いよいよ LASOR 軌道放射物性研究施設(SOR 施設)が SPring-8 BL07LSU で培った実験技術を飛躍的に発展させる機会が訪れました。そこで、東京大学物性研究所短期研究会「軟 X 線放射光科学のアップシフト」を 11/30(金)と 12/1(土)に開催し、次世代放射光施設において期待される新技術と、それを利用して実施すべきフロンティアサイエンスに対して具体的な議論を行いました。2 日間の開催にのべ 200 名以上の方にご参加いただきました。

研究会 1 日目は第 1 部として「次世代放射光施設で展開される科学技術」をテーマとし、招待講演者を迎えて分

野を超えて将来展望を議論しました。2 日目は第 2 部として「次世代放射光施設に向けた先端実験及び情報技術の開発」をテーマとしました。放射光の先端科学技術を牽引する研究者を中心に、オペランド分光やイメージングなど、それぞれの測定技術や解析法の展開を参加者と話し合いました。次世代放射光施設では、新しい光源性能とこれまでの先端放射光実験技術を組み合わせることでこれまでにない多次元データ取得やより高分解能な測定が実施できます。研究会では現在の科学及び産業のニーズに応える研究テーマを検討するとともに、これらの技術革新や最新のインフォマティクスに基づいた解析法についても議論されました。本研究会を通じて、参加者からは次世代の放射光科学技術に対するより高い期待が寄せられました。

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部および SOR 施設の方々にご協力いただいたことに深く感謝いたします。

以下に研究会で撮った集合写真、研究会ホームページ、研究会ポスター、プログラムを掲載します。



図 1 参加者集合写真

物性研究所短期研究会

「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態」

日時：2018年12月27日（木）－12月28日（金）

場所：東京大学物性研究所 6階 大講義室（A632）

URL：<https://sites.google.com/edu.k.u-tokyo.ac.jp/isspws-qlc>

報告者：芝内孝禎（東京大学新領域創成科学研究科）、岡崎浩三（東京大学物性研究所）

研究会提案者：芝内孝禎（東大新領域）、木村剛（東大新領域）、花栗哲郎（理研）、小林研介（阪大理）、大串研也（東北大理）、紺谷浩（名大理）、岡崎浩三（東大物性研）

近年、鉄系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電子状態が実験的に観測され、液晶との類似性から「電子ネマティック」状態と呼ばれている。この液晶的な電子状態と高温超伝導との関連性が盛んに議論され、大きな注目を浴びている。一方で、絶縁体であるフラストレート磁性体に着目してみると、スピン自由度が低温まで秩序を示さないスピン液体の研究が盛んに行われているが、このようなスピン液体でもなく、また教科書的な磁気秩序（スピン固体）でもない、何らかの対称性の破れを伴う中間状態「スピン液晶」という概念が発展しつつあり、スピンネマティック相やカイラルスピン液体などの提案がなされている。また、液晶における回位などのトポロジカル欠陥は、磁気構造体のスキルミオンやソリトンなどとアナロジーが考えられる。このような異なる系で現れる液晶的な電子状態は、いずれも多体系における強い量子揺らぎが本質的な非古典的現象であり、背後に共通した原理がある可能性が考えられる。そこで、今まで直接的なつながりが薄かった、超伝導・異常金属の研究者とスピン系の研究者が集まって液晶的電子状態を統一的に議論する機会を設けるため、本短期研究会

を開催した。

2日間の研究会にて、7つの口頭講演セッションとポスターセッションを設け、様々な系で現れる液晶的電子状態について活発な議論が行われた。口頭講演では、「鉄系超伝導体」、「強相関超伝導体」、「量子スピン系」、「磁気構造体」、「新物質・新秩序 1」、「新物質・新秩序 2」、「new directions」の各セッションで計25件、ポスターセッションでは27件の発表があった。対象物質は超伝導体、強相関金属、量子スピン系、ヘリウム3、有機伝導体など多岐にわたり、新しい測定手法や制御に向けた提案などの幅広いテーマをカバーできた。参加者は1日目が96名（学内60名、学外36名）、2日目が109名（学内66名、学外43名）の延べ205名にのぼった。異なる系における液晶的電子状態について、集中的に議論を行うことで、その普遍性と多様性を整理し、理解への足掛かりとする上で、大変意義高いものとなったと考えている。

なお、本短期研究会の実施に際し、提案者らの研究室の秘書の方々、スタッフおよび学生、さらに物性研究所の関係者の皆様には多大なご協力をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。



集合写真

セッション 3) 量子スピン系 【座長】小林研介 (阪大理)

- 16:35-17:00 量子スピン液晶に見られる低エネルギー励起
清水康弘 (名大理)
- 17:00-17:25 一次元フラストレート磁性体におけるスピン・ネマティック秩序とゆらぎの探索
那波和宏 (東北大多元研)
- 17:25-17:50 コバルト酸化物の励起子凝縮におけるスピンと軌道のネマティック秩序化
池田暁彦 (東大物性研)
- 17:50-18:15 低次元量子スピン系の磁場誘起スピンネマティック相
坂井徹 (兵庫県立大)
- 18:15-18:40 キラルスピンソリトン系の有限サイズ効果と非相反伝導特性
戸川欣彦 (大阪府立大)
- 19:00-20:30 懇親会 (カフェテリアにて)

12月28日 (金)

セッション 4) 磁気構造体 【座長】大串研也 (東北大理)

- 09:00-09:25 量子ビームによる磁気構造体観測
有馬孝尚 (東大新領域)
- 09:25-09:50 三角格子反強磁性体の量子臨界点近傍における集団励起
益田隆嗣 (東大物性研)
- 09:50-10:15 電気磁気効果を示すスピングラスにおけるトロイダル秩序の検出
木村剛 (東大新領域)
- 10:15-10:30 休憩

セッション 5) 新物質・新秩序 1 【座長】花栗哲郎 (理研)

- 10:30-10:55 Spin singlet 相と隣接する spin nematics の実現
堀田知佐 (東大総合文化)
- 10:55-11:20 単原子層ヘリウム 3 の量子液晶相と量子スピン液体状態
福山寛 (東大理)
- 11:20-11:45 フラーレン超伝導体における非従来型軌道秩序
有田亮太郎 (東大工)
- 11:45-11:50 写真撮影

11:50-14:10 ランチ & ポスターセッション

セッション 6) 新物質・新秩序 2 【座長】木村剛 (東大新領域)

- 14:10-14:35 Pt ニクタイトの結晶多形と超伝導
工藤一貴 (岡山大異分野基礎科学研)
- 14:35-15:00 β パイロクロア酸化物 CsW_2O_6 における三量体形成
岡本佳比古 (名大工)
- 15:00-15:25 層状バナジウムカルコゲナイドにおける Valence Bond Liquid 状態の観測
片山尚幸 (名大工)
- 15:25-15:40 休憩



- P16. 重い電子系における超伝導及び多極子秩序の理論
田財里奈 (名大理)
- P17. 高分解能 ARPES によるトポロジカル絶縁体薄膜への超伝導近接効果
都築章宏 (東大物性研)
- P18. 時間・角度分解光電子分光を用いた $2H\text{-NbSe}_2$ の光励起ダイナミクスの測定
渡邊真莉 (東京理科大)
- P19. 梯子型超伝導体 $A\text{Fe}_2X_3$ ($A=\text{Ba, Fe}$, $X=\text{S, Se}$) の共鳴軟 X 線散乱
田久保耕 (東大物性研)
- P20. $\text{Cu}_{0.33}\text{TiSe}_2$ における Cu イオンの秩序化に伴うハニカム格子型電荷密度波の形成
鬼頭俊介 (名大工)
- P21. 励起子絶縁体におけるスピンネマティック揺らぎの効果
那須譲治 (横国大)
- P22. 励起子絶縁体 Ta_2NiSe_5 の X 線非弾性散乱
中埜彰俊 (名大工)
- P23. 1T-TaS_2 の量子スピン液体状態におけるランダムネスの効果
村山陽奈子 (京大理)
- P24. $S=1/2$ 擬 1 次元フラストレート磁性体 LiCuVO_4 の磁気熱量効果
巖正輝 (東大物性研)
- P25. $S=1/2$ 量子スピン鎖 $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ の飽和磁場近傍の ESR 測定
大久保晋 (神戸大分子フォトサイエンス研究センター)
- P26. 磁気スカーミオンの相安定性と電流下挙動
佐藤卓 (東北大多元研)
- P27. 超高速ローレンツ電子顕微鏡によるスキルミオンダイナミクスの観測
下志万貴博 (理研)



ISSP ワークショップ

Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology

日時：2018年4月9日(月)～2018年4月10日(火)

場所：東京大学柏キャンパス 柏図書館メディアホール

世話人：中辻 知 (東大物性研)、押川 正毅 (東大物性研)、播磨 尚朝 (神戸大)

報告：大槻 匠 (東大物性研)

2018年4月9日(月)、10日(火)の2日間に渡り、東京大学柏キャンパス柏図書館メディアホールにおいて、国際ワークショップ“Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology”が東京大学物性研究所量子物質研究グループと新学術領域「J-Physics:多極子伝導系の物理」との共催で開催されました。近年、量子物質、とりわけ強相関電子系における研究は、多極子やトポロジに基づいた新しい物理学の概念の導入によってより深く理解されてきました。本ワークショップは、新物質で発現する新奇な物理現象を模索する研究者と、スピントロニクスやフォトニクスを駆使して新機能を探索する研究者の架け橋となり、最新の研究成果の共有ならびに新しい研究の芽を育む場を提供することを目的に開催しました。年度始めのご多忙な時期ではありましたが、2日間でのべ162名(初日92名、2日目70名)の参加があり、22件の口頭発表と42件のポスター発表が行われました。

初日は、始めに押川正毅氏(東大物性研)、森初果物性研所長、播磨尚朝領域代表よりご挨拶を頂きました。引き続き、午前前半はトポロジカル相のセッションで、 SmB_6 を題材にした strange metal の研究(Rutgers 大学、Piers Coleman氏)、ワイル/ディラック超伝導体におけるカイラルな電磁気効果(大阪大学、藤本聡氏)について発表2件がなされました。午後後半は、ワイル磁性体に関する口頭発表が3件あり、ワイル半金属における非線形光学応答(Boston 大学、Ying Ran氏)、角度分解光電子分光によるワイル磁性体のバンド構造の観察(東大物性研、近藤猛氏)、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における電氣的・熱的・光学的応答(東大物性研、肥後友也氏)について発表が行われました。

昼食を挟んで初日午後にはポスターセッションが行われ、活発な議論が行われる様子が至る所で見られました。参加者にご記入いただいたアンケートでも、ポスターセッションの印象が特によかったようです。ポスター発表のうち、

学生による発表については、15名の審査員によってポスター賞が厳正に審査されました。

午後前半は多極子のセッションで、スピン軌道結合金属 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ における多極子秩序(東大物性研、廣井善二氏)、非クラマース二重項における非フェルミ液体的挙動と2チャンネル近藤効果(広島大学、鬼丸孝博氏)、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ における強四極子秩序への磁場の効果(東大物性研、瀧川仁氏)について発表3件が行われました。午後後半は strange metal のセッションで、価数揺動系 YbAlB_4 の ^{174}Yb 放射光メスバウアー分光(兵庫県立大学、小林寿夫氏)、近藤絶縁体 $\alpha\text{-YbAl}_{1-x}\text{Mn}_x\text{B}_4$ における高温反強磁性(東大物性研、鈴木慎太郎氏)、近藤超格子における巨大磁気抵抗(東大物性研、多田靖啓氏)について報告がなされました。初日の講演終了後は、柏の葉キャンパス駅前コマスタへと場所を移し、懇親会が催されました。

2日目午前前半は、量子スピン液体に関する講演3件があり、キタエフ量子スピン液体における量子熱ホール効果(京都大学、笠原裕一氏)、 $\alpha\text{-ZrCl}_3$ における創発 $\text{SU}(4)$ 対称性と量子スピン軌道液体状態(東大物性研、山田昌彦氏)、カゴメ反強磁性体における熱ホール効果(東大物性研、山下穰氏)について報告がなされました。午前後半は強相関電子系の多極子に関する講演2件で、希土類・アクチノイドにおける隠れた秩序(Rutgers 大学、Premi Chandra氏)、熱膨張・磁歪測定による $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の多極子秩序(東大物性研、酒井明人氏)について研究報告がなされました。

午後前半は、新奇超伝導体のセッションとして3件の発表が行われ、強磁性超伝導体におけるリエントラント超伝導とフェルミ面の不安定性(東北大学、青木大氏)、 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$) における四極子秩序と超伝導の圧力制御(電気通信大学、松林和幸氏)、鉄カルコゲナイト超伝導体におけるネマティック秩序と BCS-BEC クロスオーバー(東大新領域、芝内孝禎氏)について報告がなされました。後半は、スピントロニクスと電流駆動現象に関する

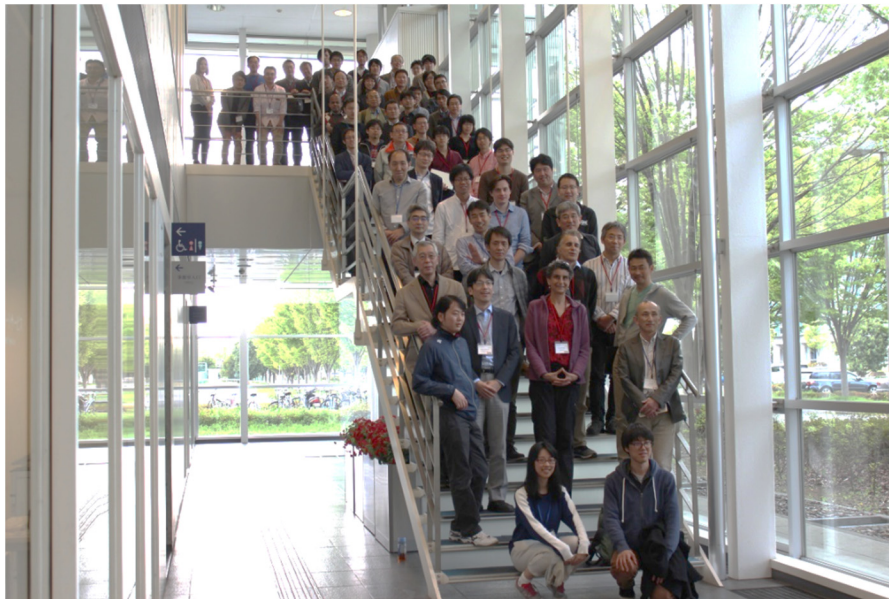
る 3 件の発表が行われ、反強磁性金属における電流誘起磁化(北海道大学、網塚浩氏)、多極子秩序の分類学と電磁応答(京都大学、柳瀬陽一氏)、量子スピントロニクスと応用(東大物性研、三輪真嗣氏)について報告がなされました。

全講演終了後、中辻知氏から閉会の挨拶、ならびにポスター賞審査委員長の瀧川仁氏(東大物性研)からポスター賞の発表があり、野口亮氏(東大物性研)、近江毅志氏(東大新領域)、西川尚氏(東大物性研)の 3 名に賞状と記念品のマグカップが贈呈されました。

最後に、年度始めのお忙しい時期での開催となりました

が、多数の皆様にご出席いただき誠にありがとうございました。2 日間という過密なスケジュールでしたが、休憩時間にも随所で議論が行われ、多極子とトポロジーに関連した最新の研究成果について、濃密な情報共有と意見交換をしていただけたのではないかと思います。

当日の様子を撮影した写真が、本ワークショップ Web サイト(<http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/ISSPWorkshop20180409.pdf> から「Photo」をクリック)にありますので、是非ご覧ください。



Program

April 9th (Mon)

Opening [Chair] Masaki Oshikawa (ISSP)

- 09:00~09:05 Masaki Oshikawa (ISSP)
- 09:05~09:15 Hatsumi Mori (ISSP)
- 09:15~09:25 Hisatomo Harima (Kobe Univ.)

Session 1 Topological Phases [Chair] Masaki Oshikawa (ISSP)

- 09:25~09:55 SmB₆: Strange insulator: a superdielectric with a Fermi surface
Piers Coleman (Rutgers Univ.)
- 09:55~10:25 Chiral electromagnetism in Weyl/Dirac superconductors
Satoshi Fujimoto (Osaka Univ.)
- 10:25~10:45 Coffee Break



Session 2 Weyl Magnets [Chair] Satoshi Fujimoto (Osaka Univ.)

- 10:45~11:15 Divergent nonlinear optical responses in Weyl semimetals
Ying Ran (Boston College)
- 11:15~11:45 Observation of magnetic Weyl state by angle-resolved photoemission spectroscopy
Takeshi Kondo (ISSP)
- 11:45~12:15 Large spontaneous electrical, thermal, and optical responses in the Weyl antiferromagnet Mn_3Sn
Tomoya Higo (ISSP)
- 12:15~13:00 Lunch
- 13:00~14:30 Poster

Session 3 Multipole Physics [Chair] Premi Chandra (Rutgers Univ.)

- 14:30~15:00 Itinerant Multipole Orders in the spin-orbit-coupled metal $Cd_2Re_2O_7$
Zenji Hiroi (ISSP)
- 15:00~15:30 Non-Fermi liquid behaviors due to possible two-channel Kondo effect in non-Kramers doublet system
Takahiro Onimaru (Hiroshima Univ.)
- 15:30~16:00 Effects of magnetic field on the ferro-quadrupole order in $PrTi_2Al_{20}$
Masashi Takigawa (ISSP)
- 16:00~16:30 Coffee Break

Session 4 Strange Metal [Chair] Piers Coleman (Rutgers Univ.)

- 16:30~17:00 Synchrotron-Radiation-based ^{174}Yb Mössbauer spectroscopic studies on valence fluctuating $YbAlB_4$
Hisao Kobayashi (Univ. of Hyogo)
- 17:00~17:30 The high temperature antiferromagnetism in Kondo insulator $\alpha-YbAl_{1-x}Mn_xB_4$
Shintaro Suzuki (ISSP)
- 17:30~18:00 Giant magnetoresistance in Kondo superlattice
Yasuhiro Tada (ISSP)
- 19:00~ Dinner

April 10th (Tue)

Session 5 Quantum Spin Liquid [Chair] Masashi Takigawa (ISSP)

- 09:00~09:30 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid
Yuichi Kasahara (Kyoto Univ.)
- 09:30~10:00 Emergent $SU(4)$ symmetry and quantum spin-orbital liquid $\alpha-ZrCl_3$
Masahiko Yamada (ISSP)
- 10:00~10:30 Universal thermal Hall conductivity of a kagome antiferromagnet
Minoru Yamashita (ISSP)
- 10:30~10:50 Coffee Break

Session 6 Strongly Correlated Multipoles [Chair] Toshiro Takabatake (Hiroshima Univ.)

- 10:50~11:20 Hidden Orders in Rare Earth and Actinide Materials
Premi Chandra (Rutgers Univ.)
- 11:20~11:50 Multipole ordering in PrV₂Al₂₀ studied by thermal expansion and magnetostriction
Akito Sakai (ISSP)
- 11:50~13:00 Lunch

Session 7 Novel Superconductivity [Chair] Youichi Yanase (Kyoto Univ.)

- 13:00~13:30 Tuning re-entrant superconductivity and Fermi surface instabilities in ferromagnetic
superconductors
Dai Aoki (Tohoku Univ.)
- 13:30~14:00 High-pressure tuning of the quadrupole order and superconductivity in PrTr₂Al₂₀ (Tr = Ti, V)
Kazuyuki Matsubayashi (Univ. of Electro-Commun.)
- 14:00~14:30 Nematic order and BCS-BEC crossover in iron-chalcogenide superconductors
Takasada Shibauchi (Univ. of Tokyo)
- 14:30~15:00 Coffee Break

Session 8 Multipole Spintronics & Current Driven Phenomena [Chair] Satoru Nakatsuji (ISSP)

- 15:00~15:30 Current-Induced Magnetization in Antiferromagnetic Metals
Hiroshi Amitsuka (Hokkaido Univ.)
- 15:30~16:00 Classification theory of multipole order and emergent responses
Youichi Yanase (Kyoto Univ.)
- 16:00~16:30 Quantum spintronics for application
Shinji Miwa (ISSP)
- 16:30~16:40 Closing
Satoru Nakatsuji (ISSP)



物性研究所談話会

標題：界面スピノールトロンクス - 磁気異方性の基礎と応用 -

日時：2019年2月6日(水) 午後2時～午後3時

場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)

講師：三輪 真嗣

所属：東京大学 物性研究所 量子物質研究グループ

要旨：

対称性の低い磁性体では磁気モーメントの向きやすさが方向により異なります。これが「磁気異方性」です。厚みが1ナノメートル程度の非常に薄い強磁性金属では膜面垂直方向に一軸の磁気異方性が生じ、界面垂直磁気異方性と呼ばれます。これはバルク磁性材料で観測される一軸の結晶磁気異方性[1]と同様の現象であり、スピン軌道相互作用エネルギーの異方性に由来します。実験技術の進歩により、1980年頃から超高真空中で異種元素を原子レベルで積層する「金属人工格子」を用いた研究が可能となりました。近年は磁性金属人工格子の応用物性に注力した「スピントロニクス」の研究が盛んであり、界面垂直磁気異方性は高密度な磁気セルの実現や高効率な磁極制御手法として重要な役割を果たしています。

この談話会では薄膜強磁性金属の界面垂直磁気異方性について、物理イメージと応用を話します[2]。磁気異方性の歴史から始め、磁性金属人工格子における界面スピノール相互作用の制御を基軸とした「界面スピノールトロンクス」を紹介します。具定例として、界面垂直磁気異方性を利用した磁化ポテンシャル制御により実現した「非線形スピントルクダイオード効果」[3]、薄膜デバイス物性研究に X 線磁気円二色性分光を利用して実現した「電界誘起界面垂直磁気異方性変調の機構解明」[2,4,5]を紹介する予定です。

- [1] W. Sucksmith and J. E. Thompson "The magnetic anisotropy of cobalt" Proc. Roy. Soc. (London) A225, 362 (1954).
- [2] S. Miwa et al. "Perpendicular magnetic anisotropy and its electric-field-induced change at metal-dielectric interfaces" J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 063001 (2019). [Topical Review].
- [3] S. Miwa et al. "Highly sensitive nanoscale spin-torque diode" Nat. Mater. 13, 50 (2014).
- [4] S. Miwa et al. "Voltage controlled interfacial magnetism through platinum orbits" Nat. Commun. 8, 15838 (2017).
- [5] T. Kawabe, S. Miwa et al, "Electric-field-induced changes of magnetic moments and magnetocrystalline anisotropy in ultrathin cobalt films" Phys. Rev. B 96, 220412(R) (2017).

【講師紹介】

三輪真嗣先生は、大阪大学より本年度4月に物性研に着任されました。超高真空薄膜成長技術を利用した新物質・材料創成とそのスピントロニクスデバイスへの応用に関しての最新の研究成果を伺えると思います。

標題：平成 30 年度 物性研究所 退職記念講演会

日時：2019 年 3 月 8 日(金) 午後 1 時 30 分～午後 5 時 10 分

場所：物性研究所本館 6 階 大講義室(A632)

要旨：13:30-13:40 所長挨拶

13:40-13:50 嶽山 正二郎先生 業績紹介

13:50-15:20 嶽山 正二郎先生 ご講演
講演題目 「固体-光-低温-磁界の実験物理」

15:20-15:30 休憩

15:30-15:40 辛 埴先生 業績紹介

15:40-17:10 辛 埴先生 ご講演
講演題目 「放射光科学とレーザー科学の融合を夢見て」

標題：2019 年度 前期 客員所員講演会

日時：2019 年 4 月 18 日(木) 午前 10 時 30 分～午前 11 時 40 分

場所：物性研究所本館 6 階 大講義室(A632)

要旨：10:30-10:40 森初果 所長挨拶

10:40-11:10 新部 正人 (兵庫県立大学高度産業科学技術研究所)
「ホウ素化合物の軟 X 線吸収／発光分光」

11:10-11:40 近藤 浩太 (理化学研究所創発物性科学研究センター)
「界面を用いたスピン流の生成と検出」



物性研究所セミナー

標題：理論セミナー：Revealing heterogeneous structures by fluctuation analysis of diffusivity

日時：2019年1月8日(火) 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：秋元 琢磨

所属：東京理科大学

要旨：

Small particles exhibit random motions due to collisions by particles composing the surrounding medium. Diffusivity is one of the most important properties for the environment and the target particle. When the environment is heterogeneous and/or the structure of the target particle changes with time, diffusivity becomes a dynamic quantity. These heterogeneous structures are often observed in living cells, entangled polymer, and supercooled liquid, where the diffusivity changes with time. Here, I show analytical results on fluctuations of the observed diffusivity using the paradigmatic stochastic model of a particle diffusion, e.g., the Langevin equation with fluctuating diffusivity. Applying the theoretical results to diffusion of a lipid molecule, a peripheral protein, and supercooled liquids, we show the fluctuating diffusivity provides a novel physical phenomenon. Finally we provide a method to detect transition points at which a state of the target particle or a property of the surrounding environment changes significantly.

標題：国際強磁場科学セミナー：第4回国際超強磁場科学セミナー | Magneto-Optical Probe of Coherent Phenomena in Multi-Functional Materials

日時：2019年1月8日(火) 午後2時～

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師：ギティ コダバラスト

所属：Physics Department, Virginia Tech (USA)

要旨：

Intense laser pulses can generate carriers, spins, phonons, and magnons far from equilibrium states. Information about the dynamical behavior of these nonequilibrium states can be elucidated by: 1) the electronic structure, 2) carrier scattering and relaxation mechanisms, including carrier-phonon and carrier-carrier scattering, 3) spin and magnetization dynamics, and 4) dynamical many-body interactions. For example, coherent acoustic phonons which are ultrasonic strain pulses can result in a broad optical spectrum from GHz up to THz^{1,2,3,4}. The possibility of manipulating Coherent Phonons (CP) could lead to develop new techniques such as acoustic imaging as well as better understanding and control of electronic and optical properties in devices. Exploring the interaction of CP with carriers, magnetic impurities, and photons can open new prospective of phononics on nanoscale. For example, the manipulation of spins in semiconductors without the application of magnetic fields opens the door to the next generation of devices, where the electronic computation and magnetic memory can be performed on the same chip. In this talk, I will present several magneto-optical studies including CP generation and control in multifunctional materials such as ferromagnetic semiconductors and multiferroics^{1,5}.

- 1 B. A. Magill, K-D Park, Y. Zhou, A. Chopra, Maurya, S. Priya, M. B. Raschke, A. Belyanin, C. J. Stanton, G. A. Khodaparast, "Ultrafast Anisotropic Optical Response and Coherent Acoustic Phonon Generation in Polycrystalline BaTiO₃-BiFeO₃", Energy Harvesting and Systems. Volume 3, Issue 3, 229, April (2016).
- 2 M. P. Hasselbeck, D. Stalnaker, L. Schlie, A. Stintz, and T. J. Rotter, "Fress space radiation of coherent, coupled plasmon-phonon modes from InAs," Physica B 314, 158 (2002).
- 3 M. P. Hasselbeck, D. Stalnaker, L. Schlie, A. Stintz, T. J. Rotter, and M. Sheik-Bahae, "Emission of terahertz radiation from coupled plasmon-phonon modes in InAs," Phys. Rev. B 65, 233203 (2002).
- 4 C. K. Sun, J. C. Liang, C. J. Stanton, A. Abare, L. Coldren, and S. P. DenBars, "Large coherent acoustic-phonon oscillation observed in InGaN/GaN multiple-quantum wells," Appl. Phys. Lett. 75, 1249 (1999).
- 5 B. Madon, H. Byul Kang, M. Gyu Kang, D. Maurya, B. Magill, M. Alves, J.-E. Wegrowe, H.-J. Drouhin, S. Priya, and G. A. khodaparast, "Room Temperature Ferromagnetic Resonance in Hetero-Epitaxial BTO-BFO/LSMO Magnetoelectric Composite", AIP Advances 8 (10), 105034 (2018). Editor's Pick.

標題：理論セミナー：Many-Body Invariants for Electric Multipoles and Higher-Order Topology

日時：2019年1月10日(木) 午後4時時～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：Gil-Young Cho

所属：Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

要旨：

In crystals, quantum electrons can be spatially distributed in a way that the bulk solid supports macroscopic electric multipole moments, which are deeply related with emergence of topology in condensed matter systems, such as the topological insulators. However, unlike the classical multipoles in open space, defining multipoles in crystals is a non-trivial task, and only the dipolar moment, namely polarization, has been successfully defined so far. This polarization, materialized as Su-Schrieffer-Heeger chain, served as a classic example of modern discussions of topological insulators.

In this talk, we propose the many-body invariants, i.e., the general definition, for electric multipoles in crystals, which is related with recently-discovered higher-order topological insulators. We generalize Resta's pioneering work on polarizations to the multipoles, which are designed to measure the distribution of electron charge in unit cells and thus can detect multipole moments purely from the bulk ground state wavefunctions. We provide analytic as well as numerical supports for our invariants. Application of our invariants to spin systems as well as various other aspects of the many-body invariants will be discussed.

標題：理論セミナー：分子性反強磁性体におけるスピン流生成

日時：2019年1月15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：中 惇

所属：早稲田大学高等研究所

要旨：

物質中のスピン流生成はスピントロニクスの中核的な課題の一つであり、その代表例であるスピンホール効果をはじめとして、強いスピン軌道結合を必要とするのが一般的である[1,2]。このため、スピントロニクスの研究は重元素を含む無機物質が中心に行われており、分子性導体における研究例は限られている。本講演では、分子性導体を用いたスピン軌道



- [2] N. Shiraishi, K. Saito, and H. Tasaki, “Universal Trade-Off Relation between Power and Efficiency for Heat Engines”, Phys. Rev. Lett. 117, 190601 (2016).
- [3] N. Shiraishi and K. Saito, in preparation.

標題：LASOR セミナー：Theory of Higgs spectroscopy

日時：2019 年 1 月 25 日(金) 午後 1 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：Dirk Manske

所属：Max Planck Institute for Solid State Research

要旨：

Time-resolved pump-probe experiments recently attracted great interest, since they allow to detect hidden states and they provide new information on the underlying dynamics in solids in real time.

Recently, with the observation of a Higgs mode in superconductors it is now possible to investigate the superconducting order parameter, and thus the ground state, directly. By comparison with analytical calculations we now have a microscopic understanding of the Higgs mode in superconductors. After calculating the non-equilibrium response of s- and d-wave superconductors we show that such non-equilibrium Higgs spectroscopy opens a unique approach to distinguish between different symmetries of the condensate, even for new and unknown superconductors.

標題：理論インフォーマルセミナー：コンピュータ将棋で学ぶ物理学のゲーム AI への応用

日時：2019 年 1 月 28 日(月) 午後 4 時～午後 5 時

場所：物性研究所本館 6 階 大講義室(A632) *開催場所を変更しました

講師：澤田 亮人

所属：NEC システムプラットフォーム研究所

要旨：

近年、強化学習をベースとしたシンプルで汎用性の高いゲーム AI の学習方法が確立され、囲碁や将棋を含む様々なマインドスポーツでの応用例が報告されている。強化学習はそのシンプルさ故に一見成熟した技術に見えるが、その最適化や汎用化には様々な技術的な課題が残っている。例えば、学習における教師データの質と量のトレードオフや、各種学習条件の調整を限られた計算資源でいかに効率的に行うかや、より強い AI をつくるためにどこを調整するべきかは、ゲームの性質によるところが大きい。こうした問題は AI の出来に非常に大きな影響をもたらす一方で、論文やプレスリリースでは埋もれてしまいがちである。

そこで、本公演では将棋 AI の黎明期から現在に至るまで開発者が勝つためにどういった努力をしてきたか、その過程で数理論理に対する知見がどのように活用されてきたかを紹介する。具体的には以下の項目を扱う。

- ・ Bonanza から AlphaZero までのコンピュータ将棋の進化の歴史
- ・ 確率モデルと強化学習
- ・ 量子モンテカルロ法と並列化
- ・ 量子焼きなましと定跡の最適化
- ・ 汎関数微分と時間配分の最適化
- ・ ゲーム AI のこれから



標題：理論インフォーマルセミナー：Non-semiclassical spin dynamics in the triangular lattice quantum antiferromagnet

日時：2019年1月30日(水) 午後5時10分～

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615)

講師：紙屋 佳知

所属：School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

要旨：

We discuss our recent collaboration between theory and neutron scattering experiments on the equilateral triangular lattice Heisenberg antiferromagnet $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ with the effective $S = 1/2$. The material is an ideal realization of this quintessential frustrated quantum spin model with small anisotropy, fairly good two-dimensionality, and the high-symmetric crystal structure precluding Dzyaloshinskii-Moriya interactions. We focus on spin dynamics in zero field [1] and in the $1/3$ magnetization plateau phase [2]. We first demonstrate that nonlinear spin wave theory reproduces the spectrum in the plateau phase, thereby allowing us to determine model parameters. However, in zero field, nonlinear spin wave theory fails to explain intrinsic anomalous features in the spectrum, such as magnon line broadening throughout the whole Brillouin zone and the high intensity excitation continuum, even though the ground state is the conventional 120° -degree ordered state. Finally, we discuss development of the $1/N$ expansion for the spectrum in magnetically ordered phases, a new framework alternative to the $1/S$ expansion, to study the zero-field spin dynamics [3].

Reference:

[1] J. Ma et al., Phys. Rev. Lett. 116, 087201 (2016)

[2] Y. Kamiya et al., Nature Communications 9, 2666 (2018)

[3] E. A. Ghioldi et al., Phys. Rev. B 98, 184403 (2018)

標題：凝縮系セミナー：Novel quantum states of matter emergent in Kitaev quantum magnets

日時：2019年2月1日(金) 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：Prof. Kwang-Yong Choi

所属：Department of Physics, Chung-Ang University, Seoul

要旨：

The exactly solvable Kitaev model on a honeycomb lattice provides a novel platform to achieve an elusive quantum spin liquid and Majorana quasiparticles. In the quest for Kitaev honeycomb magnets, the two-dimensional layered ruthenate $\alpha\text{-RuCl}_3$ and iridates A_2IrO_3 ($\text{A}=\text{Na}, \text{Li}$) are considered a prime candidate. In this seminar, I will discuss our group's endeavor to search the predicted exotic states of matter in Kitaev candidate materials.

First, we present the combined thermodynamic, Raman and neutron scattering results of $\alpha\text{-RuCl}_3$. We provide experimental signatures of itinerant Majorana excitations as a Y-shape dispersive excitation around the Γ -point and a magnetic continuum obeying Fermi statistics. The spin fractionalization is further corroborated by a two-stage release of magnetic entropy by $(R/2)\ln 2$. Second, we address an ensuing question whether Kitaev spin liquids are stabilized in the three-dimensional analogue of the honeycomb iridates, $\beta\text{-and}\gamma\text{-Li}_2\text{IrO}_3$. Using polarization-resolved Raman spectroscopy, we find that the temperature dependence of the Raman spectral weight is dominated by the thermal damping of fermionic excitations, similar to $\alpha\text{-RuCl}_3$. Finally, we discuss an on-going project on the newly discovered copper iridate Cu_2IrO_3 , being in closer proximity to the ideal geometry of the Kitaev honeycomb model than its

predecessors $A_2\text{IrO}_3$ ($A = \text{Na, Li}$) mainly due to the eclipsed stacking of adjacent layers. Preliminary characterizations reveal random Kitaev magnetism, evading a long-range magnetic order, unlike $A_2\text{IrO}_3$.

標題：理論インフォーマルセミナー：Interlayer excitons in TMDCs

日時：2019年2月6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：Dilna Azhikodan

所属：Division of Condensed Matter Theory, The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

要旨：

The few layer transition metal dichalcogenides (TMDCs) are two dimensional materials that have an intrinsic gap of the order of $\approx 2\text{eV}$. The reduced screening in two dimensions implies a rich excitonic physics and, as a consequence, many potential applications in the field of opto-electronics. Here I show that a layer perpendicular electric field, by which the gap size in these materials can be efficiently controlled, generates an anomalous inter-layer exciton whose binding energy is independent of the gap size. I show this originates from the rich gap control and screening physics of TMDCs in a bilayer geometry: gating the bilayer acts on one hand to increase intra-layer screening by reducing the gap and, on the other hand, to decrease the inter-layer screening by field induced charge depletion. This constancy of binding energy is both a striking exception to the universal reduction in binding energy with gap size that all materials are believed to follow, as well as evidence of a degree of control over inter-layer excitons not found in their well studied intra-layer counterparts. The ground-state density functional theory (DFT) calculations are performed using the Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) exchange-correlation functional using the PAW method as implemented in the VASP code. I have employed the non-self-consistent GW method to determine the many-body gaps, with excitonic properties calculated by solving the Bethe Salpeter equation (BSE) in the $q \rightarrow 0$ limit.

標題：量子物質セミナー：Spin liquids in rare earth pyrochlores : quantum spin ice and beyond

日時：2019年2月12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：Prof. Subhro Bhattacharjee

所属：International Centre for Theoretical Sciences, Bengaluru

要旨：

Rare earth pyrochlores present many possible candidates for hosting Quantum spin liquids (QSL). In this talk, starting with the most well-known QSL proposed for these materials– the Quantum Spin Ice, I will discuss the effect of an external electric field to probe the QSL and drive transition. I will end with a discussion of possible alternatives candidate QSLs beyond Quantum Spin Ice and in particular discuss the properties of a fermionic QSL and its competition with magnetic phases in context of rare earth pyrochlores.



標題：量子物性・ナノスケールセミナー：Broadband Ferromagnetic Resonance Spectroscopy: The “Swiss Army Knife” for Understanding Spin-Orbit Phenomena

日時：2019年3月7日(木) 午後2時～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：Justin M. Shaw

所属：National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA

要旨：

Modern spin-based technologies rely on multiple, simultaneous phenomena that originate from the spin-orbit interaction in magnetic systems. These include damping, magnetic anisotropy, orbital moments, and spin-orbit torques that are manifested in the spin-Hall and Rashba-Edelstein effects. While cavity based ferromagnetic resonance (FMR) spectroscopy has been used to characterize magnetic materials for many decades, recent advances in broadband and phase-sensitive FMR techniques have allowed further refinement, improved accuracy, and new measurement capability. In fact, broadband FMR techniques can now precisely measure spin-orbit torques at the thin-film level without the requirement of device fabrication [1].

Broadband FMR measurements have also improved our fundamental understanding of magnetic damping. Numerous extrinsic relaxation mechanisms can obscure the measurement of the intrinsic damping of a material. This created a challenge to our understanding of damping because experimental data were not always directly comparable to theory. As a result of the improved ability to quantify all of these relaxation mechanisms, many theoretical models have been refined. In fact, this has recently led to both the prediction [2] and discovery [3] of new materials with ultra-low magnetic damping that will be essential for future technologies based on spintronics, magnonics, spin-logic and high-frequency devices.

I will begin this lecture with a basic introduction to spin-orbit phenomena, followed by an overview of modern broadband FMR techniques and analysis methods. I will then discuss some recent successes in applying broadband FMR to improve our ability to control damping in metals and half-metals, quantify spin-orbit torques and spin-diffusion lengths in multilayers, and determine the interrelationships among damping, orbital moments, and magnetic anisotropy [4], [5]. The impact of these result on specific technologies will also be discussed.

- [1] A. J. Berger, E. R. J. Edwards, H. T. Nembach, A. D. Karenowska, M. Weiler, and T. J. Silva, “Inductive detection of fieldlike and dampinglike ac inverse spin-orbit torques in ferromagnet/normal-metal bilayers,” *Phys. Rev. B*, vol. 97, 094407, Mar. 2018.
- [2] S. Mankovsky, D. Ködderitzsch, G. Woltersdorf, and H. Ebert, “First-principles calculation of the Gilbert damping parameter via the linear response formalism with application to magnetic transition metals and alloys,” *Phys. Rev. B*, vol. 87, 014430, Jan. 2013.
- [3] M. A. W. Schoen, D. Thonig, M. L. Schneider, T. J. Silva, H. T. Nembach, O. Eriksson, O. Karis, and J. M. Shaw, “Ultra-low magnetic damping of a metallic ferromagnet,” *Nat. Phys.*, vol. 12, pp. 839–842, Sep. 2016.
- [4] J. M. Shaw, H. T. Nembach, T. J. Silva, and C. T. Boone, “Precise determination of the spectroscopic g-factor by use of broadband ferromagnetic resonance spectroscopy,” *J. Appl. Phys.*, vol. 114, 243906, Dec. 2013.
- [5] J. M. Shaw, H. T. Nembach, and T. J. Silva, “Resolving the controversy of a possible relationship between perpendicular magnetic anisotropy and the magnetic damping parameter,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, 062406, Aug. 2014.

標題：LASOR セミナー：A New Look at an Old Puzzle: ARPES on Ba_{1-x}K_xBiO₃

日時：2019年3月11日(月) 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：Nicholas C. Plumb

所属：Swiss Light Source, Paul Scherrer Institut

要旨：

The fact that T_c in perovskite bismuth oxides can exceed 30 K has been known since right around the discovery of the high- T_c cuprates. Yet for various reasons, the bismuthates were never studied to nearly the extent of cuprates or, later, iron-based superconductors. This is pity, because their phenomenology and underlying physics connect with a wide array of contemporary interests: not only unconventional/high- T_c superconductivity, but also metal-insulator and insulator-superconductor transitions, (bi)polarons, DWs/charge-order, disordered systems, and so on. Recently we have succeeded in performing ARPES in situ on high-quality films of Ba_{1-x}K_xBiO₃. We revealed that the band structure of the insulating parent compound ($x = 0$) can be reasonably captured by simple LDA [1]. The gap opens in a predominantly oxygen-derived band, signaling the role of a negative charge transfer energy and supporting the notion that the ground state involving ordered BiO₆ breathing distortions is “bond disproportionated,” as opposed to classically charge-ordered among the bismuth cations. Our latest experiments [2] probe within the “under- to optimally-doped” region of the phase diagram. There we see a strongly dispersing metallic band forming a Fermi surface, despite an absence of peaks in the energy spectra that are the signatures of Landau-like quasiparticles. We observe, moreover, two types of pseudogap-like behaviors – i.e., gap-like suppressions of spectral intensity in the absence of an obvious gap-inducing symmetry. The first of these extends over a broad energy scale and persists above room temperature; the other is set in a narrow region around E_F and opens in a well-defined temperature range above T_c . This latter “pseudogap” is revealed to be a signature of metal-insulator phase separation. I will discuss how our observations fit within a polaronic understanding of these materials. In particular, we view the transition to phase separation as the precipitation of ordered bipolaronic insulating regions out of a disordered polaronic liquid. Some possible implications for superconductivity will also be discussed. (For potential users of Swiss Light Source, this talk will also mention recent developments and future plans for SIS beamline and the SLS as a whole.)

参考文献：

- [1] N.C.Plumb et al., Momentum-Resolved Electronic Structure of the High- T_c Superconductor Parent Compound BaBiO₃, Phys. Rev. Lett. 117, 037002 (2016).
- [2] M.Naamneh et al., Cooling a polaronic liquid: Phase mixture and pseudogap-like spectra in superconducting Ba_{1-x}K_xBiO₃, arxiv:1808.06135.

標題：機能物性セミナー：X線自由電子レーザーによるチャンネルロドプシン時分割構造解析

日時：2019年3月20日(水) 午後1時～午後3時

場所：物性研究所本館6階 第4セミナー室(A614)

講師：西澤 知宏

所属：東京大学・大学院理学系研究科・生命科学専攻

要旨：

ロドプシン類はバクテリアからヒトまで広く生物種に保存された光受容タンパク質であり、単細胞では光にตอบสนองして運動の方向を変える走光性などに、ヒトでは視覚における光受容といったような重要な機能に関わる。中でも藻類のもつチャンネルロドプシン(ChR : channelrhodopsin)は特定の波長の光を受容することでイオンチャンネルとしての機能を示し、



特定の波長の光によって神経活動の制御を行う光遺伝学と呼ばれる手法など、多くの応用研究に使われており、注目を集めている。このため、チャンネルロドプシンの構造情報は光遺伝学におけるツール開発にも有用なことから非常に重要な意味を持つ。現在までに、クラミドモナス由来のチャンネルロドプシン **2**(CrChR2)を含むいくつかの ChR の構造が報告されているが、そのいずれもがイオンの透過孔の閉じた「閉状態」に相当するため、ChR が光を受けた際に、どのような構造変化が生じてイオン透過経路が形成されるのかという部分は未だに理解されていない。

近年、X線自由電子レーザー(XFEL)と呼ばれる技術の登場によって、分子の構造変化をフェムト秒の時間分解能で明らかにできる方法が開発された。時分割シリアルフェムト秒結晶構造解析(TR-SFX : Time-Resolved Serial Femtosecond X-ray crystallography)と呼ばれるその方法では、光など特定の刺激と同期させて、高強度の X 線自由電子レーザーパルス光を微小結晶に照射して回折像を収集することで、結晶中での分子の構造変化を観察することができる手法であり、直接構造を観察できる手法の中では最も優れた時間分解能をもつ。日本における X 線自由電子レーザー施設である SACLA(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)においてもバクテリアのもつプロトンポンプであるバクテリオロドプシンの構造変化を明らかにすることに成功しており、非常に多くの注目を集めている(Nango et al., Science, 2016)。

我々は、チャンネルロドプシンの開状態に至る構造変化を明らかにするため、SACLA における TR-SFX の実験を行い、発色団レチナルが光を吸収することで生じる、イオンチャンネルの開閉に関わる重要な構造変化を明らかにすることに成功した。今回の講演ではそれらの結果に関して発表したいと思う。

標題：機能物性セミナー：表面・界面ナノ物性評価のための高分解能レーザー励起光電子顕微鏡

日時：2019年3月22日(金) 午前10時～

場所：第2会議室

講師：谷内 敏之

所属：物性研究所 辛研究室

要旨：

表面や埋もれたナノ構造を非破壊で顕微観察する技術は応用・基礎の双方で重要な技術である。光電子顕微鏡(PEEM)は紫外線を入射光として利用し、放出された光電子の実空間イメージングを行うことで、試料の物性に敏感なイメージングが可能である。本研究では大強度の連続波(CW)深紫外レーザーと収差補正機構を有した PEEM を組み合わせた評価手法を開発することで、これまで PEEM の課題であった高い空間分解能(3nm)を実現した。本セミナーでは表面ナノ物性の実施例として SrTiO₃ 表面に現れる室温強磁性の直接観察を紹介する。また埋もれた界面ナノ物性の実施例として、キャップ層が堆積された磁性薄膜、酸化物ヘテロ界面で発現する強磁性相、また電子デバイスの非破壊状態観察の結果を紹介する。

標題：中性子セミナー：Uncovering molecular mobility in confined state by combination of solids state ²H NMR and Quasi Elastic Neutron Scattering.

日時：2019年3月26日(火) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師：Dr. Daniil I. Kolokolov

所属：1. Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of Russian Academy of Science, Group of NMR spectroscopy of hydrocarbons catalytic transformations

2. Novosibirsk State University, Laboratory of structure and functional properties of molecular systems, Department of Physics

要旨：

The modern technologies, especially in the field of chemical engineering and energy related applications, are constant search for new tunable and adaptable materials. Such task demands for a more rational approach to the chemical design of new molecular systems. In many cases the structural methods of investigations are not sufficient since the base functionality is governed by the mobility of selected molecular components. Hence the knowledge behind molecular mobility mechanisms is essential. In my talk I will give a brief overview of how the combined use of solids state ^2H NMR and QENS can provide an efficient toolbox for probing molecular mobility in complex confined states. I will focus on two characteristic examples of the hydrocarbons diffusion in microporous metal-organics frameworks and protons migration in solid proton conductors and hydrates.

Daniil Kolokolov 氏は NMR を主な実験手段として固体中の分子運動を研究しているロシアの若手研究者です。最近、標題にあるように NMR と中性子準弾性散乱を組み合わせた研究をされています。特に、Metal Organic Framework (MOF) と呼ばれる多孔性物質中の分子運動の研究は注目を集めています。

標題：量子物性セミナー：阪大 QIQB 共催：Taming Quantum Entanglement

日時：2019 年 3 月 28 日(木) 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. Matthew P. A. Fisher

所属：University of California, Santa Barbara

要旨：

Non-local quantum entanglement – “spooky action at a distance” – is the key feature that distinguishes quantum from classical systems. The entanglement-entropy provides a measure of entanglement and for many-body systems is intimately connected to the thermal-entropy. Out of equilibrium, in a driven system or after a quantum quench, entanglement spreads ballistically with maximal entropy attained at long times – that is, complete disorder reigns. But not (always!) with life on earth! Why? In this talk I will discuss several different mechanisms to tame entanglement growth;

- (i) by quenched disorder in systems exhibiting many-body localization,
- (ii) by coupling light quantum particles to heavy (almost classical) particles, and
- (iii) by “looking repeatedly” at the system (i.e. making projective measurements) – a many-body quantum Zeno effect.

In the latter case, I will explore a novel hybrid quantum circuit model consisting of both unitary gates and projective measurements, presenting evidence for a new quantum dynamical phase transition between a weak measurement phase and a quantum Zeno phase. Detailed steady-state and dynamic critical properties of this novel quantum entanglement transition will be described.

Matthew Fisher 教授は超流動-絶縁体転移の先駆的研究など多くの業績で著名な物性理論家で、アメリカ物理学会 Oliver E. Buckley Condensed Matter Physics Prize (2015) などを受賞し、アメリカ芸術科学アカデミーおよび米国科学アカデミーの会員でもあります。大阪大学先導的学際研究機構量子情報・量子生命部門の設立に伴うキックオフシンポジウムで招待講演を行うため Fisher 教授が来日される機会に、量子エンタングルメントに関連する最近の研究について物性研で講演して頂く機会を設けました。



(辞職)

氏名	所属	職名	備考
高橋 竜太	ナノスケール物性研究部門	助教	日本大学 准教授へ
渡辺 宙志	附属物質設計評価施設	助教	慶應義塾大学 准教授へ
和達 大樹	附属極限コヒーレント光科学研究センター	准教授	兵庫県立大学 教授へ

○平成31年4月1日付け

(採用)

氏名	所属	職名	備考
田中 駿介	機能物性研究グループ	助教	理化学研究所 特別研究員から
福田 将大	附属物質設計評価施設	助教	物性研究所 特任研究員から
秋葉 宙	附属中性子科学研究施設	助教	物性研究所 特任研究員から
野村 肇宏	附属国際超強磁場科学研究施設	助教	Dresden High Magnetic Field Laboratory 日本学術振興会海外特別研究員から

○平成31年4月1日付け

(兼務)

氏名	所属	職名	備考
常行 真司	附属計算物質科学研究センター	教授	本務：東京大学大学院理学系研究科 期間：平成31年4月1日～令和2年3月31日
藤堂 眞治	附属計算物質科学研究センター	教授	本務：東京大学大学院理学系研究科 期間：平成31年4月1日～令和2年3月31日
川島 直輝	データ統合型材料物性研究部門	特任教授	本務：物性研究所附属物質設計評価施設 期間：平成31年4月1日～令和2年3月31日

(委嘱「客員：テーマ限定型」)

氏名	所属	職名	備考
中西 尚志	附属中性子科学研究施設	教授	本務：物質・材料研究機構 MANA フロンティア 分子グループ グループリーダー 期間：平成31年4月1日～令和元年9月30日
新部 正人	附属極限コヒーレント光科学研究センター	准教授	本務：兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 准教授 期間：平成31年4月1日～令和2年3月31日

(委嘱「客員：テーマ提案型」)

氏名	所属	職名	備考
近藤 浩太	量子物質研究グループ	准教授	本務：理化学研究所創発物性科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム 上席研究員 期間：平成31年4月1日～令和2年3月31日



編集後記

本号にも物性研究所で実施された先端研究の紹介記事や盛会に終わった研究会の報告記事が多数寄せられています。また、新たに着任されたばかりの岡崎所員も含めて物性研で活躍されてきた方々の記事もたくさんあり、研究論文では書かれることのない当人の気持ちが垣間見えることができました。その中で、2件の若手の受賞記事には受賞の嬉しさと周囲への感謝の気持ちと共に、トップを獲れなかった悔しさと将来への不安も書かれており少し胸が締め付けられました。これからも頑張ってもらいたいです。

松 田 巖

物性研だよりの購読について

物性研だよりの送付について下記の変更がある場合は、お手数ですが共同利用係まで連絡願います。

記

1. 送付先住所変更（勤務先⇔自宅等）
2. 所属・職名変更
3. 氏名修正（誤字脱字等）
4. 送付停止
5. 送付冊数変更（機関送付分）

変更連絡先：東京大学物性研究所共同利用係

〒277-8581 柏市柏の葉 5-1-5

メール：issp-kyodo@issp.u-tokyo.ac.jp