

物性研だより

# BUSSEIKEN DAYORI

第57巻

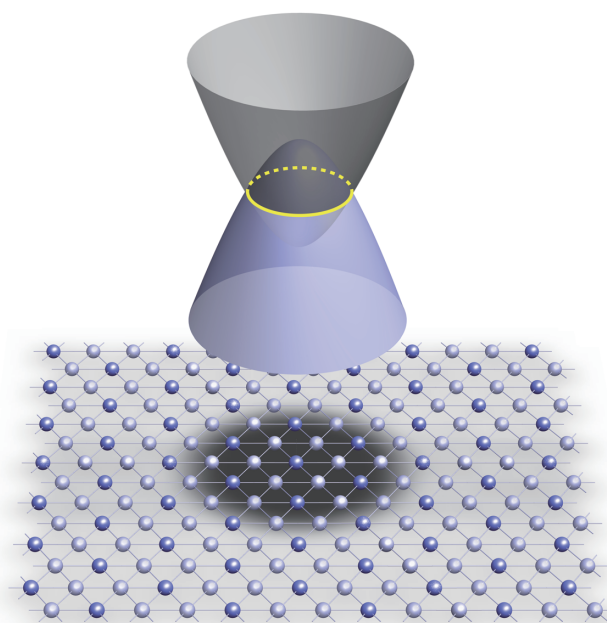
第3号

2017年10月

オンデマンド光機能酸化物ヘテロ構造と  
キャリアダイナミクス

単原子層における  
ディラックノーダルラインフェルミオンの発見  
-表面科学のルネサンス-

フォノンによる熱ホール効果の研究



東京大学物性研究所

Copyright ©2017 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.

ISSN 0385-9843

contents

---

1 オンデマンド光機能酸化物ヘテロ構造とキャリアダイナミク  
 湯川 龍、山本 達、松田 巖

---

3 単原子層におけるディラックノーダルラインフェルミオンの発見  
 –表面科学のルネサンス–  
 松田 巖、杉野 修

---

6 フォノンによる熱ホール効果の研究  
 山下 穰

---

9 The Best Student Oral Paper Award in ALPS'17 を受賞して  
 齋藤 成之

---

11 国際会議 International Conference on Topological Materials Science 2017  
 (TopoMat2017) において Poster Award を受賞して  
 肥後 友也

---

13 物性研に着任して  
 小濱 芳允

---

15 外国人客員所員を経験して  
 Ingo Salzmänn

---

17 客員所員を経験して  
 溝川 貴司  
 18 梅野 健  
 20 中村 正明

---

【物性研究所短期研究会】

22 ○「光で見る・操る電子物性科学の最前線～強相関、トポロジー、低次元、ダイナミクス～」の報告

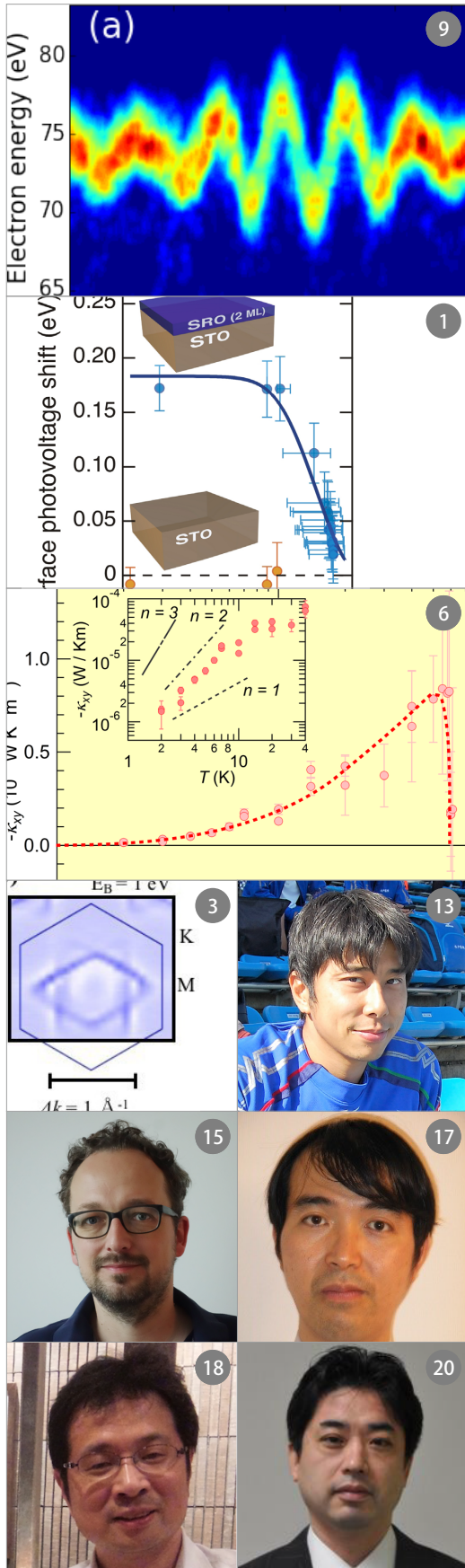
30 【物性研究所談話会】

33 【物性研究所セミナー】

【物性研ニュース】

49 ○東京大学物性研究所研究員の公募について

編集後記



# オンデマンド光機能酸化物ヘテロ構造とキャリアダイナミクス

湯川 龍、山本 達、松田 巖

近年、金属酸化物は次世代の機能材料として注目を集め、特に微細化の究極の形である表面・界面層での電子・光学的動作に高い関心が持たれている。チタン酸ストロンチウム  $\text{SrTiO}_3$  は代表的な金属酸化物であり、最近その表面は特異な電子特性を示すことが分かってきた[1,2]。しかしながら、表面及び界面における光学応答についての報告例はまだ少ない。そこで我々の研究グループは  $\text{SrTiO}_3$  基板上に数原子層のルテニウム酸ストロンチウム( $\text{SrRuO}_3$ )超薄膜を成長させることで  $\text{SrRuO}_3/\text{SrTiO}_3$ (SRO/STO)ヘテロ構造を作成し(図 1 (A))、その表面・界面での光照射によるキャリアダイナミクスを系統的に研究した[3]。成膜にパルスレーザー堆積法を用いることで原子層レベルで SRO の膜厚を制御した。実験は SPring-8 の高輝度軟 X 線ビームライン BL07LSU で行い、図 1 (B)のように放射光パルスとレーザーパルスを用いた時間分解光電子分光法でヘテロ構造における電子状態及びその時間変化を系統的に調べた。

薄膜の性質は価電子帯の光電子分光測定(図 1 (C))で、直接調べることができる。 $\text{SrRuO}_3$  は膜厚に依存して絶縁体から金属に変化した。一方、STO 基板のバンド構造は Ti 2p 内殻光電子分光測定(図 1 (D))で評価することができ、 $\text{SrRuO}_3$  の成膜に伴い図 1(E,F)のように基板のバンド曲がり効果に変化し、STO 基板表面・界面近傍のキャリア電子密度は大きく減少することが分かった。これら STO 及び SRO(2ML)/STO 試料について、時間分解光電子分光測定を行った結果を図 2 に示す。紫外線パルス照射に伴い、SRO(2ML)/STO 試料では Sr 3d の内殻準位が明らかに高エネルギー側へシフトし、マイクロ秒かけて元のエネルギー位置に戻る様子が観測された。このエネルギー変化は表面光起電力効果の発生と緩和を意味する。得られた結果を元に数値シミュレーションを行なうことで、この光学応答の変化に必要な光キャリアの量やダイナミクスを明らかにすることができた。その結果、ヘテロ構造にすることで STO の光学応答が約 200 倍促進され、その緩和は熱電子放出モデルで説明できることが分かった[3]。

このように本研究により SRO/STO ヘテロ構造において光起電力が発生することが分かり、さらにそのダイナミクスも明らかにすることができた。本成果を元に、光機能に合わせて金属酸化物ヘテロ構造をオンデマンドで作製できることが期待される。 $\text{SrTiO}_3$  は紫外線を吸収する透明半導体であり  $\text{SrRuO}_3$  層も原子レベルで十分に薄いため光を透過する。そのため、このヘテロ構造は可視光に対して透明である。紫外線から守りつつ電力を作る窓など新しい機能性デバイス開発に本成果が活かされると期待する。

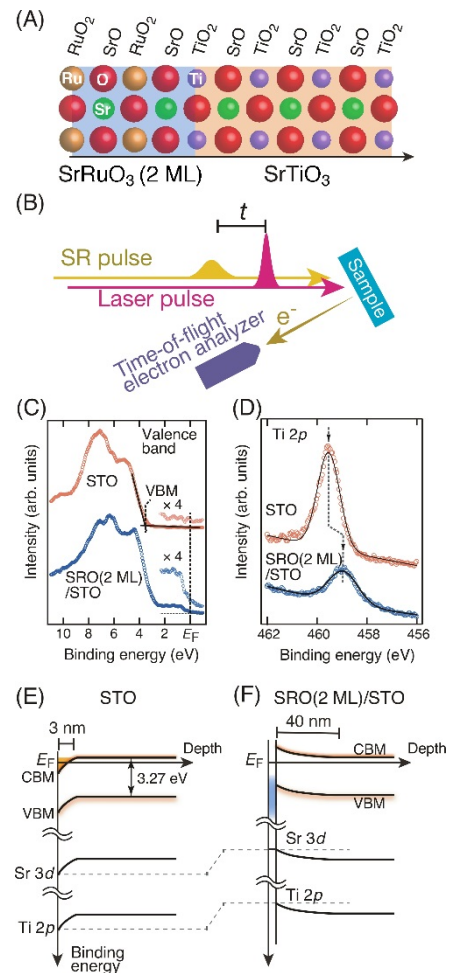


図 1 (A)  $\text{SrRuO}_3/\text{SrTiO}_3$ (SRO/STO)ヘテロ構造と(B)時間分解光電子分光測定の様式図。(C)価電子帯、(D)Ti 2p 内殻準位の光電子分光スペクトル。光電子分光法では  $\text{SrRuO}_3$  と  $\text{SrTiO}_3$  のそれぞれの光電子信号を測定することができるが、膜の下の基板ではその信号は小さくなる。(E) STO 基板と(E) SRO(2ML)/STO ヘテロ構造における電子状態エネルギー位置の深さ依存性 (バンド曲がり効果)。



# 単原子層におけるディラックノーダルラインフェルミオンの発見

## —表面科学のルネサンス—

松田 巖、杉野 修

**Less is different.** 例えば、よく知られたシリコン結晶も固体表面でバルクとは異なり  $\text{Si}(111)7\times 7$  や  $\text{Si}(001)2\times 1$  など表面特有の原子構造と2次元電子状態を有する。また、3次元のシリコン結晶を原料にシリコン原子を金属基板上に蒸着すると単体では自然では存在しえない2次元シリコン結晶「シリセン(Silicene)」が形成され、特有のディラック電子系を成す。このように物質を小さく、構成原子数を少なく、そして次元を下げていくと新しい物質ができる。これは表面科学の研究における醍醐味であるが、最近では次世代の原子層デバイス技術の礎としても注目を集めている。

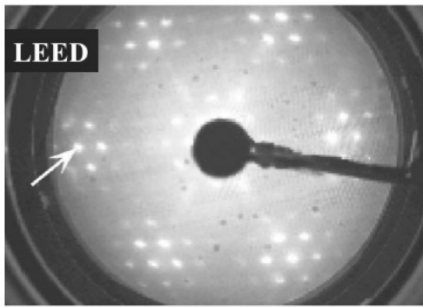


図1 “5.55x5.55”-Cu/Si(111)表面の低速電子回折(LEED)パターン (36 eV)。矢印はSi(111)1x1スポットの位置。

表面科学の歴史の中で半導体表面上の金属吸着系が主な研究対象の1つであり、特に貴金属原子をシリコン表面上に吸着させたものは金属/半導体界面のモデル系として扱われてきた。代表例として  $\text{Si}(111)$  表面上に  $\text{Cu}$  を蒸着して作成する“5x5”または“5.55x5.55”表面超構造が挙げられる。多くの研究者がその回折パターンを観察した結果(図

1)、表面では  $\text{Cu}_2\text{Si}$  の単原子層(図2(a))が  $\text{Si}(111)$  上に形成され、2つの2次元格子によるモアレ模様に対応する“5.55x5.55”周期が現れることがわかった。私自身も院生だった2000年にこの表面の電子構造研究に携わり、光電子フェルミ面マッピングの結果、 $\text{Cu}_2\text{Si}$  層は金属的であることを明らかにした[1]。この単原子層は基板から独立するような原子構造・電子構造を有していたため、「他の表面超構造とは異なり基板がなくても単独で存在しうるのでは」と、当時感じたことを記憶している。それから10年経つと表面科学の分野では逆に貴金属表面上にシリコン原子を蒸着する研究が行われるようになった。2012年に「シリセン」が  $\text{Ag}$  結晶表面上で発見されると、多くの研究者がシリコンやゲルマニウム原子などを貴金属結晶表面に蒸着して新たな2次元物質の探索をするようになった。そんな中、「シリセン」を期待してシリコン原子を  $\text{Cu}(111)$  結晶表面に蒸着する研究が行われたが「残念ながら  $\text{Cu}_2\text{Si}$  単原子層ができてしまった」という話を耳にした。程なくして  $\text{Cu}_2\text{Si}$  単原子層の理論研究が発表され、本物質が単独でも存在できること、そしてその電子構造は金属的であることが報告された[2]。驚いたことに論文のバンド分散図には  $\text{Si}(111)$  “5.55x5.55”-Cu 表面では私がかつて観測したホールのバンドだけでなく、電子的なバンドも重なるように存在していた。さらに論文には対称軸でのバンド分散図しか載っていなかったが、2次元運動量空間を想像するとホール及び電子的なバンドがループ状に重なって2次元ディラックノーダルライン(ディラック線、ディラックループ)を形成していることに気付いた。そこで  $\text{Cu}(111)$  基板上に

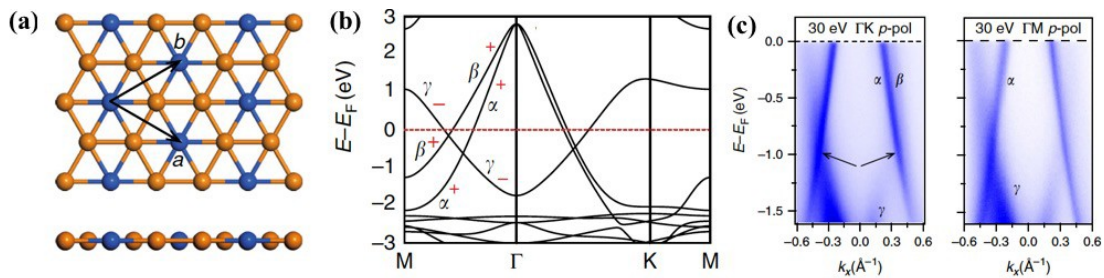


図2(a)  $\text{Cu}_2\text{Si}$  単原子層の構造モデルで、銅色が銅原子に対応する。(b)  $\text{Cu}_2\text{Si}$  単原子層のバンド分散図。(c) 放射光( $h\nu=30\text{eV}$ )で測定した光電子分光バンドマッピングの結果。



Cu<sub>2</sub>Si 単原子層は単独で存在できることも予言されている [2]。現在デバイス素子内の導電シートとしてはグラフェンが利用されているが、本 Cu<sub>2</sub>Si 単原子層の単離に成功すれば、グラフェンに対して 1000 倍大きいキャリア密度を持つ新たな導電単原子シートとしての利用も今後期待される。

## 謝辞

本研究は B. Feng 氏、笠松秀輔氏、伊藤俊氏、Tai C. Chiang(外国人客員所員)氏(物性研)、Y. Feng、S. Wu 氏、有田将司氏、島田賢也氏、宮本幸治氏、奥田太一氏(広島大学 HiSOR)、B. Fu 氏、C.-C. Liu 氏、Y. Yao 氏(Beijing Institute of Technology)、P. Chen 氏、K. Wu 氏、L. Chen 氏(Chinese Academy of Sciences)、S. K. Mahatha 氏、P. Sheverdyaeva 氏、P. Moras 氏(ELETTRA)との共同で実施されました。この場をお借りして御礼申し上げます。

## 参考文献

1. B. Feng, B. Fu, S. Kasamatsu, S. Ito, P. Cheng, C.-C. Liu, S. K. Mahatha, P. Sheverdyaeva, P. Moras, M. Arita, O. Sugino, T.-C. Chiang, K. Wu, L. Chen, Y. Yao, and I. Matsuda, Experimental realization of two-dimensional Dirac nodal line fermions, *Nature Comm.*, **8**, 1007 (2017).
2. L.-M. Yang *et al.*, Two-dimensional Cu<sub>2</sub>Si monolayer with planar hexacoordinate copper and silicon bonding. *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 2757 (2015).
3. H.-J. Neff, I. Matsuda, T. Greber, and J. Osterwalder, High-resolution photoemission study of the discommensurate (5.55 x 5.55)-Cu/Si(111) surface layer, *Phys. Rev. B* **64**, 235415 (2001).







低温まで観測されていないことから、両者の自由度が結合した軌道スピン液体状態の実現が理論的に提案されている[14]。

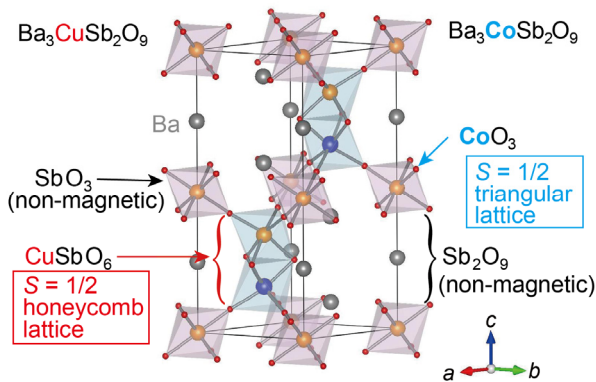


図1 Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>[9]とBa<sub>3</sub>CoSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>[11]の構造。

観測された熱伝導率の温度依存性を図2に示す。熱伝導率は非常に小さく、Ba<sub>3</sub>CoSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>の熱伝導率[15]と比較すると桁ほど熱伝導が低いことがわかった。一般的に熱伝導率は、比熱 $C$ 、熱を運ぶ準粒子の速度 $v$ 、および平均自由行程 $\ell$ の積  $\kappa_{xx} \approx \frac{1}{3} C v \ell$  で表すことができる。仮に、この熱伝導率をすべてフォノンから来ていると仮定してフォノンの平均自由行程 $\ell_{pf}$ の最大値を見積もったのが図2の挿入図である。この図に示すように、 $\ell_{pf}$ は1 Kでも10  $\mu\text{m}$ 程度と短くなっており、最低温度の0.1 Kでも飽和せずに低温に向かって伸び続けている。通常、単結晶試料におけるフォノンの平均自由行程は温度低下とともに増大し、 $\sim 1$  Kでは試料サイズ程度まで延びて飽和する。これはフォノンがボソンであるために、温度低下とともにその波長が伸び、低温では試料中にあるミクロな欠陥などに散乱されにくくなるのが原因である。このとき、低温でフォノンを散乱できるのは試料端のようなマクロな欠陥であるため、温度に対して飽和しない短い $\ell_{pf}$ は、多結晶のアモルファス物質などで観測されることが知られている。一方、Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>のように単結晶であるにもかかわらずガラス的な熱伝導を示す物質は、「フォノンガラス」と呼ばれ、ラットリングを示す籠状物質などにおける観測例[16]が知られている。これらの物質では様々な理由からフォノンが強く散乱されており、Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>においてはCu<sup>2+</sup>-Sb<sup>5+</sup>ダンベルのもつイジング自由度によって形成されたフラクタル構造によるフォノンの散乱が重要な役割を果たしていると考えられる。

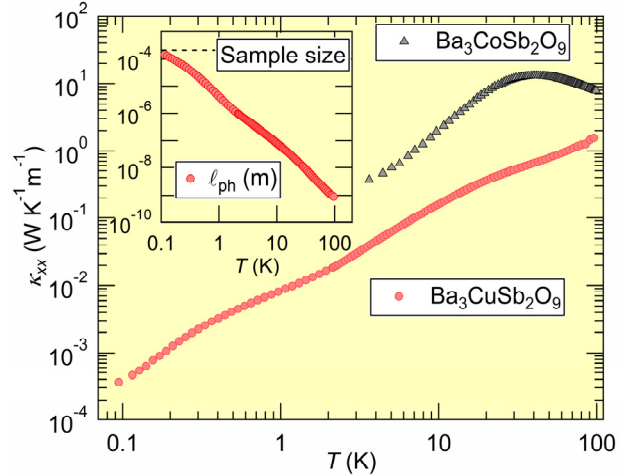


図2 Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>の熱伝導率の温度依存性。Ba<sub>3</sub>CoSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>のデータ[15]を合わせて載せる。左上挿入図はフォノンの平均自由行程 $\ell_{pf}$ の温度変化。

観測された熱ホール伝導率( $\kappa_{xy}$ )の温度依存性を示したのが図3である。 $\kappa_{xy}$ は観測した温度範囲では $\kappa_{xy} < 0$ であり、50 K程度に鋭いピークを示した後に2 Kまで単調に減少した。挿入図に示すLog-logプロットから、 $|\kappa_{xy}|$ は10 K以下の低温では $T^2$ に比例していることがわかった。スピン励起による熱ホール効果が存在すると仮定すると、低温ではスピングャップの影響を受けるため指数関数的な温度依存性が期待される。これは、 $T^2$ に比例する温度変化とは矛盾していることから、低温で観測された $\kappa_{xy}$ がフォノンによる熱ホール効果であると結論した。

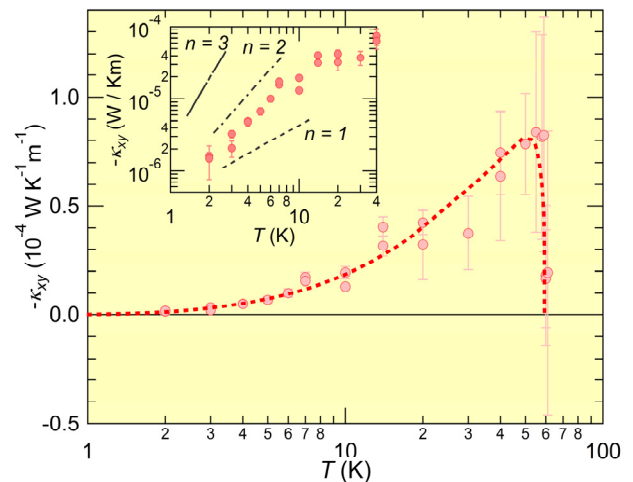


図3 熱ホール伝導率( $-\kappa_{xy}$ )の温度依存性。挿入図は両対数プロットで、 $T^n$ の傾きを点線で示してある。

Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>におけるフォノンの熱ホール効果はどのような機構で生じるのだろうか。実はTbGGではTbが過剰に入った試料でのみ熱ホール効果が観測[7, 8]されており、過剰Tbイオンとフォノンとの散乱の効果[17]が熱ホール

効果の起源として有力視されている。 $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ においてもフォノンガラス的な熱伝導が観測されたことから、フォノンに対する強い散乱の効果が熱ホールと関連していることが期待されるが、その詳細はわかっていない。 $\text{TbGG}$ における熱ホール測定の結果に対しては様々なモデルが提案されているが、いずれの理論も低温で観測された $|\kappa_{xy}| \propto T^2$ の温度依存性とはあわず、フォノン熱ホール機構の解明は今後の課題として残された。しかし、今回フォノンの熱ホール効果の温度依存性を明らかにしたことによって初めて理論研究との比較検討が可能になったのであり、我々の結果は今後のフォノンの熱ホール効果を解明するための重要な結果であると考えている。

### まとめ/今後の展望

本研究から $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ では、フォノンガラス的な熱伝導が観測され、低温で $|\kappa_{xy}| \propto T^2$ の温度依存性を持つ熱ホール効果が観測された。低温ではスピンギャップが形成されることから、観測された熱ホール効果はフォノンの熱ホール効果だと考えられる。 $\text{TbGG}$ の先行研究からは不明であったフォノンの熱ホール効果の温度依存性がわかったことで、今後の理論研究につながると期待している。また、 $\kappa_{xy}$ の符号は $\text{TbGG}$ の $\kappa_{xy}$ とは逆であった。フォノンの熱ホール効果の符号をきめるメカニズムは全く不明であるが、 $\kappa_{xy}$ の符号も今後の解明に重要な情報であると考えている。

### 謝辞

本研究は以下の方々(杉井かおり、下澤雅明、渡邊大樹、鈴木喜貴、M. Halim、木俣基、松本洋介、中辻知)との共同研究による成果であり、山田科学振興財団、東レ科学研究助成、日本学術振興会による科学研究費補助金事業の助成のもとに行われました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

1. Y. Zhang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2219–2222 (2000).
2. K. Sugii *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 145902 (2017).
3. Y. Onose *et al.*, *Science* **329**, 297–299 (2010).
4. H. Katsura, N. Nagaosa, and P. A. Lee, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 066403 (2010).
5. R. Matsumoto, R. Shindou, and S. Murakami, *Phys. Rev. B* **89**, 054420 (2014).
6. D. Watanabe *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 8653–8657 (2016).

7. C. Strohm, G. L. J. A. Rikken, and P. Wyder, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 155901 (2005).
8. A. V. Inyushkin and A. N. Taldenkov, *JETP Lett.* **86**, 379–382 (2007).
9. S. Nakatsuji *et al.*, *Science* **336**, 559–563 (2012).
10. J. A. Quilliam *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 117203 (2012).
11. Y. Doi, Y. Hinatsu, and K. Ohoyama, *J. Phys.: Condens. Matter* **16**, 8923–8935 (2004).
12. Y. Wakabayashi *et al.*, *Phys. Rev. B* **93**, 245117 (2016).
13. A. Smerald and F. Mila, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 147202 (2015).
14. J. Nasu and S. Ishihara, *Phys. Rev. B* **91**, 045117 (2015).
15. K. Naruse *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **568**, 042014 (2014).
16. T. Takabatake *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 669 (2014).
17. M. Mori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 265901 (2014).

# The Best Student Oral Paper Award in ALPS'17 を受賞して

極限コヒーレント光科学研究センター・板谷研究室・博士課程1年 齋藤 成之

この度、2017年4月にパシフィコ横浜で行われた The 6<sup>th</sup> Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS'17)にて、“Attosecond streaking of chirp-free high harmonics in the extreme ultraviolet driven by a long-wavelength infrared light source”と題した講演を行い、The Best Student Oral Paper Awardを受賞する名誉にあずかりました。この場をお借りして、講演内容について、簡単に説明させていただきます。まず研究の背景として、近年、超短パルスレーザーを用いてフェムト秒( $10^{-15}$ 秒)領域での超高速分光が広く行われています。さらに最近では、高強度フェムト秒レーザーを希ガスに集光して得られる極端紫外域の高次高調波発生によって、アト秒( $10^{-18}$ 秒)オーダーの時間幅の光パルスが作り出せるようになり、アト秒領域での電子ダイナミクスの実時間観測が可能になりつつあります。

従来のアト秒分光では、実用的な高調波の光子エネルギーは極端紫外(10-100 eV)であったため、放射光施設等で行われている各元素の吸収端を利用した軟X線領域(100-2000 eV)の測定手法を用いることは困難でした。そこで、レーザーベースの光源としては未踏の軟X線へアト秒分光を拡張することが期待されています。これが実現すれば、光触媒、太陽電池等において重要な電子励起や電荷移動の初期過程を元素選択的に実時間観測する道が拓かれると考えられます。

高調波の最大光子エネルギーは、希ガスに集光するレーザー波長の2乗に比例することが知られており、長波長の高強度レーザーを用いれば、軟X線の高調波を得ることができます。例えば、従来高次高調波発生に用いられてきた近赤外(波長  $0.8 \mu\text{m}$ )のチタンサファイアレーザーに比べ、板谷研で開発された赤外(波長  $1.7 \mu\text{m}$ )の $\text{BiB}_3\text{O}_6$ 結晶を用いた光パラメトリックチャープパルス増幅器(BIBO-OPCPA)を用いることにより、高調波の最大光子エネルギーを4倍以上に伸ばすことが期待できます。

発生した高調波をアト秒分光へと応用するに当たっては、高調波の時間波形の測定が必須となります。しかし、これまで  $0.8 \mu\text{m}$  より長波長の赤外光源から発生した高調波の時間波形を、信頼性の高い手法で直接測定した例はあ

りませんでした。その原因の一つとして、高調波の光量がレーザー波長の5-6乗に反比例して減少するという事実が挙げられます。少ない光量で高調波の時間波形を測定するのは困難であり、そもそも光源として全く原理の異なる赤外OPCPA光源ベースで時間波形測定が可能かどうかは自明ではありませんでした。そこで、赤外光源ベースでのアト秒計測の可能性を探るため、波長  $1.7 \mu\text{m}$  の赤外光源を用いてアト秒の高次高調波を発生させ、その時間波形を測定し、赤外光源のアト秒科学における有効性を実証することを目指した実験を行いました。実験では、BIBO-OPCPAから得た高強度赤外パルスを実験室に集光し、極端紫外域の高調波(光子エネルギー100 eV)を発生させ、高調波の時間波形をアト秒ストリーク法で測定しました。アト秒ストリーク法は、高調波と赤外光を希ガス原子に集光し、その光電子スペクトルを測定しつつ、高調波と赤外光の相対遅延を掃引する手法です。遅延ごとの光電子スペクトルの2次元マップ(スペクトログラム)に対して、適当なアルゴリズムを適用することによって、高調波の時間波形を再構築できます。この手法はチタンサファイアレーザーベースの実験で広く用いられており、アト秒科学における最も基本的な測定手法となっています。

得られたスペクトログラム及び再構築の結果を図1に示します。スペクトログラムには、単一アト秒パルスを示唆する赤外電場による光電子スペクトルの明瞭な変調が観測

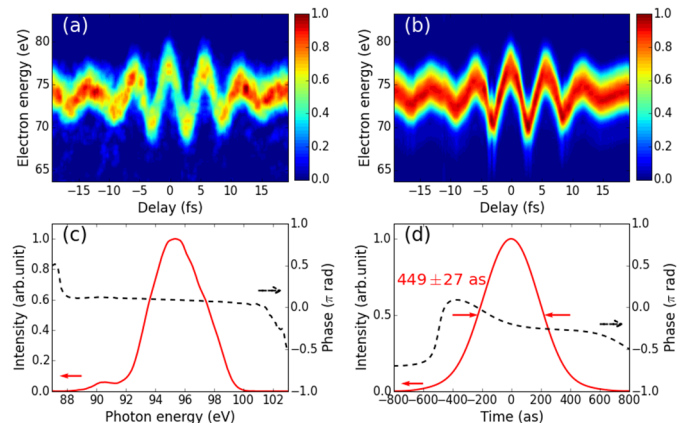


図1. (a)測定されたスペクトログラム。再構築した(b)スペクトログラム、(c)高調波のスペクトル、(d)時間波形。

されました。この変調は赤外電場の位相によって電子が異なる加速を受けるためと理解出来ます。再構築の結果から、高調波のパルス幅は  $449 \pm 27$  as であることが分かりました[1]。これは世界で初めて  $0.8 \mu\text{m}$  より長波長の光源から発生させたアト秒パルスの時間波形を計測したものであり、赤外光源によるアト秒分光の大きな可能性を示した点で意義深いものであると言えます。

将来的には、軟 X 線、具体的には炭素  $K$  吸収端 (284 eV) におけるアト秒分光を実現したいと考えています。炭素は次世代エレクトロニクスで重要な元素であり、応用上大きな意味を持ちます。昨年度から、我々は新たな軟 X 線高調波のビームライン開発を行っており、炭素  $K$  吸収端での吸収分光が可能になっています。一例として、ポリジアセチレンという、超高速光応答を示す炭素ポリマーの吸収ス

ペクトルの測定結果を図 2 に示します。現在、このポリマーを可視光励起したときの軟 X 線吸収スペクトルの超高速変化を測定する実験を進めています。

最後に、このような榮譽ある賞を頂けたのも、ひとえに板谷治郎 准教授、石井順久 助教をはじめとする諸先生方や、同僚、家族の惜しめないサポートのおかげです。深く感謝申し上げます。

[1] Nariyuki Saito, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe, and Jiro Itatani, “Attosecond streaking measurement of extreme ultraviolet pulses using a long-wavelength electric field,” *Scientific Reports* **6**, 35594 (2016).

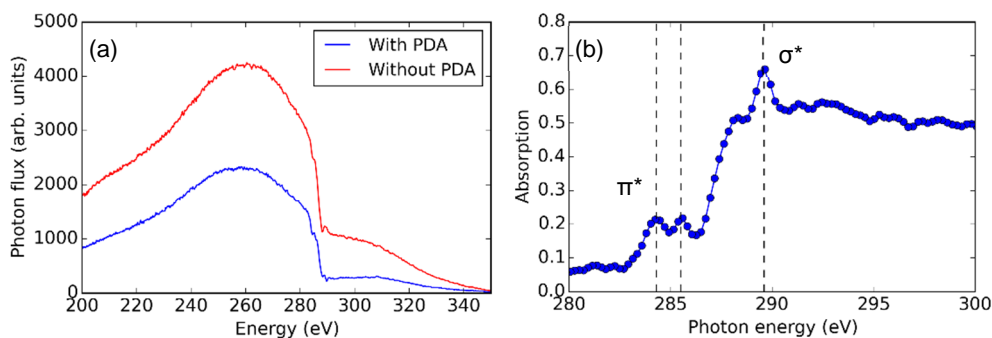


図 2. (a) 軟 X 線高次高調波のスペクトル (青: ポリジアセチレン透過後、赤: 透過前)。 (b) (a) から計算したポリジアセチレンの吸収スペクトル。



授賞式の様子

# 国際会議 International Conference on Topological Materials Science 2017(TopoMat2017)において Poster Award を受賞して

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

この度、2017年5月9日～5月13日に、東京工業大学で開催された国際会議“International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2017)”において、“Magneto-optical Kerr effects and real-time imaging of magnetic domains in the non-collinear antiferromagnetic metal  $Mn_3Sn$ ”という題目で発表を行い、Poster Awardを受賞させていただきました。Topomat2017は、新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」により開催された会議で、トポロジカル物質やそれらに関連したトポロジーを基軸とする新奇物性の開拓をキーワードに、世界各国から集まった研究者により活発な議論が行われていました。以下では、この場をお借りして、受賞対象となった研究について簡単に説明させていただきます。

磁気光学カー効果は、磁性体に直線偏光を当てた際に、磁化の向きに応じて反射光の偏光面が回転する現象で、光磁気ディスクなどの磁気光学素子の原理であるほか、磁気特性・電子状態などの基礎物性や磁気ドメインを非破壊・非接触で観察する手段として、有限の磁化を示す強磁性体で盛んに研究が行われています。特に、体積が小さく通常の磁化測定が困難な薄膜形状の強磁性体の磁気特性評価に適しており、熱電変換素子やスピントロニクスデバイスなどの開発に広く用いられています。これらのデバイス開発では、近年、高集積・大面積・高速化への期待から、強磁性体だけでなく反強磁性体(中でも、電気を流すことが可能な反強磁性金属)にも注目が集まっています[1]。その一方で、反強磁性体では磁化がゼロ、もしくは非常に小さいため、強磁性体で一般的に用いられている手法では、光・熱・電気などの外場の反強磁性スピン構造に対する応答の検出・制御は困難であると考えられていました。実際、磁化がゼロとなる反強磁性体における自発的な磁気光学カー効果の報告はされていませんでした。

本研究では、中辻研究室が開発した、反強磁性体で初めて異常ホール効果[2]や異常ネルンスト効果[3]を示し、また最近では、時間反転対称性の破れたワイル金属状態[4]となることが明らかになった反強磁性金属  $Mn_3Sn$  に着目しました。カゴメ格子が積層した構造を持つ  $Mn_3Sn$  は、430 K という高温から逆 120 度構造と呼ばれる非共線反強

磁性スピン構造が安定となり、この特徴的なスピン構造が上記の新奇な物性の鍵であると考えられています。磁気光学カー効果測定の結果、室温・ゼロ磁場下で約 20 ミリ度という強磁性体にも匹敵するほど大きなカー回転角が現れ、これが微小な磁場で制御できることを発見しました。 $Mn_3Sn$  は強磁性体の 1/1000 程度の非常に小さい磁化を持っていますが、第一原理計算との比較から、今回観測した磁気光学カー効果はこの微小な磁化の有無によらず、磁化がゼロとなるように整列した逆 120 度構造のスピンが作るクラスター磁気八極子秩序[5]が、その微視的な起源であることを明らかにしました。また、磁気光学カー効果を用いて、磁気八極子を持つ反強磁性ドメインとそのダイナミクスの直接観察にも成功しました[6]。

本結果は、新たに磁気光学カー効果を示す反強磁性体開発の指針を示しただけでなく、反強磁性デバイス材料として、磁気八極子を持つ反強磁性体が有力な候補となることを提示したという意味で応用上も大きな意味を持っています。その具体的な応用例としては、熱を電気に変換する「異常ネルンスト効果」を用いた熱電素子が挙げられます。こちらは反強磁性体を用いることで(i) 漂遊境界による電子機器などへの影響が小さく、(ii) 大面積・高密度な素子の作製が期待できることからエネルギーハーベスティング分野において大きな注目が集まっています。素子開発の一つの指針として、2 種類の反強磁性ドメインを接続したサーモパイル構造をとることでより大きな起電力が得られると考えられており、そのドメイン状態の理解・可視化が重要となっています。今回確立した、磁気光学カー効果を用いて非破壊・非接触でかつ簡便に反強磁性ドメインを直接観察する手法は、ドメインダイナミクスを把握することが難しかった反強磁性体を用いた素子を作製する上で、非常に有用な結果であるといえます。今後は、引き続き反強磁性体における磁気光学効果に関する研究を行っていくとともに、熱電素子やスピントロニクス素子に反強磁性体を実装することが当たり前となるように、新しい熱電・スピントロニクス機能の開拓に挑戦していきたいと考えています。





# 物性研に着任して

国際超強磁場科学研究施設 小濱 芳允

2017年7月1日に超強磁場科学研究施設に着任しました小濱芳允と申します。既に多くの方々に日頃からお世話になっておりますが、改めてご挨拶ということで、これまでの研究の経緯や、今後の研究内容などを述べさせていただきます。

これまでの研究の経緯ですが、私は東工大・物質電子科学専攻・阿竹研究室で、大学院時代を過ごしました。阿竹研究室は、“断熱法”というネルンストが使用した歴史のある(悪く言うと古い)手法を使った比熱測定に特徴がある研究室だったのですが、実は学生時代はこの装置に見向きもせず、流行りの手法である“緩和法”や“AC法”という測定手法を取り入れた熱測定装置の開発を課題としていました。この時期は他にも、フラックス法を使用したサンプル合成、SPring8でのX線回折実験、厳密対角化計算プログラムの作成など(所属研究室とは関係のない)様々なことに手を出していました。指導教官である阿竹徹先生が自由に研究させて頂いたことには、今でも深く感謝しています。この時代の一番の思い出は、希釈冷凍機を運転するために何日も徹夜したことです。研究は気合いだというのを体で学ばせて頂きましたが、やはり同様に大事なものは“効率”であるというのを痛感したことを良く覚えています。

その後、ロスアラモス研究所の National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL)というパルス磁場を使った研究所に約4年間勤務しました。非破壊パルス磁場を使った100テスラまでの研究は大変魅力的で、それまで10テスラという弱磁場をクエンチしないかとびくびくしながら使っていたのが、馬鹿らしくなった覚えがあります。ここでは Marcelo Jaime さんをはじめ、Fedor Balakirev、Oscar E. Ayala-Valenzuela、Ross McDonald、John Betts さんなどの多くの方々に研究や私生活を助けて頂きました。今思い出すと、最初に車を買うまでの期間が大変でした。ラボまで自転車ですら1時間ぐらいかかるのですが、ほぼ毎日送り迎えしてくれた Oscar さんには今でも頭が上がりません。研究活動の方は非常に効率的に進み、AC法を使ったパルス磁場下比熱測定を世界で初めて成功させたり、タラハンやグルノーブルの強磁場施設に滞在したり(トータルで3カ月ほど)、また講師としてサマース

クルの教壇に立たせてもらったり、非常に実りの多い海外生活であったと思っています。ちなみに最初の2年間は一人で生活していたのですが、途中で結婚し、2人でアメリカ生活を楽しみました。苦労したことも沢山ある海外生活でしたが、妻の支えもあり、何とかやり切れたと思います。多くの事を経験でき、充実した4年間でした。

そして2012年に物性研究所・国際超強磁場科学研究施設・金道研究室に特任助教として採用され、秒オーダーの長い磁場発生時間を持つロングパルスを使った研究を始めました。アメリカやフランスなどの強磁場施設で滞在した後に、同じ“強磁場”というテーマを遂行している“国際超強磁場科学研究施設”に赴任したことになります。皆様は、同じ強磁場施設なので同じような研究施設と考えられると思いますが、しかし実際には、研究所によって文化というものがあり、少なくとも国際超強磁場科学研究施設は諸外国とは(良い意味でも悪い意味でも)異なる研究環境ということを認識しました。そういった点で、最初は適応するのに時間がかかりましたが、慣れてくると他研究所で吸収した知識が大いに役立ち、日本には無かった装置や設備を取り入れることが出来ました。また独自技術も開発でき、例えば断熱法を使うことで比熱の絶対値測定をパルス磁場下で成功させました。断熱法は東工大時代には見向きもしなかった古い測定手法でしたが、測定周波数の高速化が可能で、実はパルス磁場との相性が非常に良い手法なのには驚きました。金道研での特任助教時代は他にも、回転プローブを使った研究や、磁場波形の安定化など、自分のアイデアを生かした研究を進めることが出来ました。

そして2017年7月1日に准教授として国際超強磁場科学研究施設に着任し、ここでは破壊型磁石を使った研究を進めていくグループの一員として、研究を進めています。破壊型磁石を使うと、100から1000テスラという超強磁場領域にもアクセス可能であり、このような極限環境では人類の知りえなかった現象が存在していると期待できます。そういった意味で、他の研究者を驚かせるような(ノーベル賞に相当するような?)インパクトのある研究ができると考えており、改めて強磁場施設で研究を展開できることに幸せを感じています。

破壊型磁石を使った個人の研究は始まったばかりではあるのですが、100 テスラ以上ではほぼ不可能と信じられていた、電気抵抗測定に成功しつつあります。電気抵抗は遍歴電子系の最も基本的な物性量というだけではなく、例えばカンチレバー、ひずみゲージ、抵抗温度計などのセンサー類への応用も期待できる為、電気抵抗測定を基盤として、更なる研究対象の拡大が狙えます。そもそも破壊型磁石での研究テーマは半導体か磁性体に限られていましたが、この枠組みを取り払うこともできつつあり、例えば**“強相関遍歴電子系の 100 から 1000 テスラ領域での研究”**という新規テーマの創生を計画しています。大学院生や同施設のスタッフの皆様と協力し、このような先端的な研究を推進するとともに、所外および所内のユーザーの皆様の研究を手伝えるようなユーザーフレンドリーな強磁場施設の形成を目指しています。

最後になりますが、物性研究所の更なる発展にむけて、尽力する次第であります。今後ともよろしくお願い致します。



# 外国人客員所員を経験して

**Ingo Salzmann**

**Concordia University (Montreal, Canada)**

**Department of Physics and Department of Chemistry & Biochemistry**

**ingo.salzmann@concordia.ca**

My stay at the ISSP from September 2017 to the end of the year was the longest time I had the pleasure to spend in Japan, a country that fascinated me since I first stayed for three months at Chiba University in the group of Prof. Nobuo Ueno almost ten years ago. Apart from a deep personal interest in the Japanese culture and an affection towards its aesthetics and nature, I experienced the culture of science as practiced in Japan to be outstanding in terms of thoroughness and desire for perfection, which I regard as key virtues for successful fundamental research. Since then, several more stays in Japan for conferences and experimental work at the Synchrotron radiation source UVSOR (Institute of Molecular Science, IMS, Okazaki) in collaboration with Prof. Satoshi Kera (IMS) and Prof. Steffen Duhm (FUNSOM, Suzhou University, China), who visited me at the ISSP initiating a potential future collaboration with the group of Prof. Hatsumi Mori, fully corroborated this impression. In fact, my field of research addressing the physical chemistry of organic (semi-)conductors, their structural and electronic properties, as well as their application in organic and hybrid electronics, has a long and deep rooted tradition in Japan. Some of the most fundamental findings in this field do originate from Japan, be it, e.g., pioneering work in using photoelectron spectroscopy for assessing the electronic structure of organic solids, or exploring their superconductivity.

It was likely this tradition in the research on organic electronic materials together with my own positive experience with doing science in Japan, which led me to the ISSP as a Visiting Professor. There, I have been hosted by Prof. Hatsumi Mori and Prof. Jun Yoshinobu, two outstanding scientists in closely related fields of my

research. The schedule of my stay at the University of Tokyo was insofar ideal, as it lay at the interface between my time at Humboldt University (Germany) and Concordia University in Montreal (Canada), where I took a position as faculty member by 2017. As I was invited by Prof. Takehiko Mori during my time at the ISSP to give a seminar at the Tokyo Institute of Technology, I could literally observe abovementioned tradition, as he showed me an old photo of the pioneering times of research on organic (semi-)conductors, showing himself together with Prof. Hatsumi Mori, Prof. Ueno, Prof. Seki, only to name a few – a snapshot of an emerging field. Further, I participated at the 5<sup>th</sup> Ito International Research Conference “Forefront of Molecular Dynamics at Surfaces and Interfaces: From a single molecule to catalytic reaction”, which has been organized by Prof. Jun Yoshinobu and which allowed me to broaden my knowledge on this topic by experiencing exciting talks and a poster session with vivid discussions not only on my own contribution. Moreover, during my stay I organized a symposium on “Organic Semiconductors: Surface-, Interface-, Bulk-Doping and Charge Transport” at the Fall Meeting of the American Materials Research Society (MRS) in Boston, USA, to which Prof. Hatsumi Mori accepted my invitation and presented an invited lecture on her related research. Apart from the less appealing travel time of around 12h to Boston (luckily served by a direct flight service from Tokyo), this very meeting offered the opportunity for thorough scientific discussions and for broadening our scientific network.

Although clearly limited in time, my stay at the ISSP was not only characterized by fruitful scientific exchange – mainly through discussing our current research

projects and exploring synergies for future collaboration, but also by joint experimental work. Employing her expertise in cultivating and characterizing the solid state of organic (semi-)conductors, Prof. Mori pushed forward the structure solution of Dioctadecylamine, for which I could grow highly crystalline thin films that proved to significantly reduce the work function of various substrates, a functionality highly desired for reducing energy barriers at organic interfaces to low work-function electrodes in electronic applications. While this project still represents ongoing work, significant progress has been made at the ISSP in growing single crystals of this promising compound. Based on available synchrotron data which I acquired during a stay at the BESSY II synchrotron (Berlin, Germany), correlating molecular orientation with the dipolar surface termination in thin films might allow rationalizing the observed impact on the work function in a future joint publication. Furthermore, I could successfully use my stay to co-author a publication (affiliated to the ISSP) on a related topic, which recently appeared as: Hofmann et al., *The Journal of Physical Chemistry C* 121, 24657 (2017).

Apart from science, I would like to gratefully acknowledge all the support and the perfect organization of my stay, which I had the pleasure to experience. Amongst the numerous colleagues, which made my time in Japan a great period of my life, I would like to explicitly thank Ms. Akiko Kawai, secretary to Prof. Mori, as well as the highly professional and cordial support by the International Liaison Office (ILO) at ISSP. In particular, Ms. Yuko Ishiguchi of the ILO has not only always been there to support in situations where challenges arose to the non-Japanese, but also impressively anticipated such situations in advance. My living in the International Lodge was further a great experience, which was perfectly organized in all details by Ms. Ishiguchi and made me immediately feel at home in Kashiwanoha. Finally, great experiences gathered in my spare time, where I could practice Aikido in the famous Hombu Dojo in central Tokyo (including a visit to the Aiki-shrine in Iwama), trips to the marvellous

surrounding of Tokyo in its colours of Fall, as well as all the versatility and complexity of the Japanese cuisine (where certainly “omakase” became one of the most important terms to know) complement a both personally and professionally highly productive time of my life. It will be my pleasure to return to Japan as soon as possible.

# 客員所員を経験して

早稲田大学 応用物理学科 溝川 貴司

2016年4月から9月までの6か月間にわたり、物性研究所の客員所員といたしましてLASORの辛埴先生、岡崎浩三先生の研究室に滞在させていただきました。辛先生、岡崎先生、辛研究室の学生・スタッフの皆様(特に、兼子様)には任期中に多大なご支援とお気遣いをいただきまして深く御礼申し上げます。

1999年から2014年まで新領域創成科学研究科に所属しておりましたので、柏キャンパスはホームグラウンドのようなものですが、毎日仰ぎ見ていた物性研究所の立派な建物の中にオフィスをお借りして仕事をさせていただいたことは大変新鮮でした。任期中、およそ週1回のペースで本務先で講義のない火曜日に物性研究所にお邪魔させていただきました。岡崎先生、そして当時岡崎研の大学院生だった小川優さんと一緒に、高次高調波による時間分解光電子分光を用いて、励起子絶縁体の光キャリアダイナミクスの研究に従事させていただきました。LASORの高次高調波時間分解光電子分光装置は他の追随を許さない圧倒的な性能を誇る世界最高の装置ですので、そのような装置を利用して励起子絶縁体という希少な物質を研究できたことは大変幸運なことでした。小川さんと岡崎先生の努力の末に、ポンプ光で励起された光キャリアによって励起子相のバンドギャップが見事に閉じて、電子とホールフェルミ面が現れる様子を観測することに成功いたしました。

研究面では大変充実しておりましたが、木曜日は本務先で教室会議や教授会等が開催されますので、木曜日の所員会議でご挨拶させていただいたり客員研究員の講演会に参加させていただくことができず、先生方との交流の面ではこの機会を活かすことができず残念に感じております。もう一つ残念な点は、他の客員所員の先生方と一度もお会いできなかったことです。客員所員のオフィスには2~3名分の机が用意されており先生方の名札もあるのですが、期間中に他の先生方と雑談したり議論させていただく機会はありませんでした。

今回、LASORの先生方に大変お世話になりまして、そのLASORの前身の一部であります物性研SOR部門が田無にあった頃を思い出しました。1990年代、東大理物の藤森研究室の一員として田無のSOR施設をよく利用させ

ていただいております。記憶に残っていますのは、成功したことよりも失敗した経験です。1994年の冬季オリンピックが開催されていた週にチームタイムをいただいて、ある日にSrRuO<sub>3</sub>等を夜中までかかって測定した後にリングをシャットダウンしたのですが(当時は、最後まで実験していたユーザーがビームを落とすなどの作業を任せられることがありました)、冷却水のバルブを閉め忘れてしまい、翌朝に凍結したらどうするのかとひどく叱られたことをよく覚えています。その頃に田無やつくば分室で活躍されていた先生方は、東大柏の放射光計画やLASORの立ち上げに貢献されてきた方もいらっしゃいますし、学外に転出されてSPring8や広大HiSORの建設などで大活躍された方もいます。20世紀に田無から始まった流れが、21世紀になってLASORやHiSORを生み出して非常に大きな勢力に成長しており、今後の発展が本当に楽しみです。

LASORには若い先生方が多く、大変活気に満ちています。光電子分光の部門では、若手の近藤先生・岡崎先生が強相関物質やトポロジカル物質の光ダイナミクスの研究、鉄系超伝導体の超伝導ギャップやマヨナラ状態の観測などで大活躍されています。外部から見ても活気があり活躍されていることは分かっていましたが、客員所員として内側からLASORの状況を拝見しますと、その充実ぶりがさらに良く分かりました。外部から見えている以上に層の厚い研究成果が蓄積されつつありますし、国内外の多彩なユーザーとの共同利用研究がどんどん進展しているのです。今後、若手の先生方が中心となられて、所内の他部門との連携はもとより、国内外の様々な研究機関との連携を拡大しながら、LASORをさらに発展させていただけるものと期待しております。

# 客員所員を経験して

京都大学大学院情報学研究科 梅野 健

2016 年度前期に、川島直輝先生のホストのもとで客員所員を勤めてさせていただきました。客員期間中は、川島所員をはじめ、研究室で同室であった渡辺宙志さん、大久保毅さんと議論していただきまして、大変刺激的な日々を過ごすことができました。以下、如何に有意義であったか、できる限り詳細に説明申し上げます。

物性研では、3 年間のポスドク時代を経て就職できた研究所で入所後半年経った 1998 年 10 月に、偶然発見した、カオス的な相関を持つ乱数を用いたモンテカルロ計算法の超高速化法(Superefficient MC)に関する研究を行いました。1998 年から情報の研究に従事し、主に情報通信の符号設計(符号設計では、複数の端末が発信する信号が同時に干渉する際、干渉雑音として表れるのですが、その干渉雑音を下げる符号が、モンテカルロ法で計算誤差を下げる相関のある乱数を見つけることとほぼ等価)にそのモンテカルロ計算法を応用してきたのですが、物性研では、再び、物理の一番面白い問題に適用して、このモンテカルロ計算法で勝負してみたいと思ったのです。

この期間、幾つかの得難い経験(研究以外も含む)をしましたので、列举します。

**(1) ゲストハウス(2016 年 4 月)** : 宿泊した共同利用研究員宿泊施設である柏ゲストハウスに宿泊し際に、携帯電話がかかってこないことが解りました。これは、物理的に携帯電話が繋がらない(稀に 3G だけ繋がる)日本では稀な環境であることが判りました。これは物性研究所が、ゲストに落ち着いて研究に専念できる最高の環境を与えていることとなります。

暫くしてこれは、4G で問題になるであろうと考えて自分も 2008-2009 年代に各所に指摘していた OFDM(直交周波数多元接続)と周波数帯の問題であることが解りました。簡単に言うと、現在の方式では、基地局が近くにないと繋がらないのです。この経験をした後、客員期間が終わる 2016 年 9 月末まで、できる限り長く物性研究所に滞在しようと決意しました。

**(2) 土日のみに来られる研究者(2016 年 6 月、8 月)** : 土日を含む滞在期間に研究室にて研究していたところ、普段、人の気配の無い研究室に人の気配を感じました。何度かその気配を感じ、それが誰か非常に気になりましたので、思い切って同室の方に聞きましたところ、名誉教授の TY 先生だと解り納得した次第です。名誉教授になると大学には来るなという不文律がある某大学と異なり、杓子定規に規則を運用するのではなく、静謐な研究環境を長期に涉って提供している物性研、及びその文化に感嘆したのはこの時です。

**(3) 台風と Krylov(2016 年 8 月)** : ちょうどお盆の前後だったと思います。次から次へと台風が襲ってきたのですが、当時滞在していた物性研究所及び柏ゲストハウスは、無論、記録的な大型台風などにビクともせず、安全な研究環境を提供していただきました。その間、物性研図書室で借りて読んだ Nikolai Sergeevich Krylov の本「Works on the Foundations of Statistical Physics」は忘れられないものとなりました。周りの状況から戦争により自分がいずれ死ぬことが解っている、ただし、統計力学で大事なこと(統計力学成立の条件で混合性こそが重要だ等)を伝えていきたいという Krylov の学問に対する気迫が伝わってくる本でした。また高温超伝導の電子相関と MC の異常の高速性(拡散係数がゼロになる)との間に関係があるに違いないということで高温超伝導関係の記事も乱読しました。この頃の研究成果としては、物理の MC には乱数の混合性は不可欠(準乱数では混合性持たずにダメ)であるということを確認したというものがあります。これはあまり指摘されていないことだと思っています。

**(4) ゲストハウスの TV とプレスリリース準備と大学広報との熾烈な調整開始(2016 年 8 月)** : 普段 TV を見ない生活(実際には TV を持っていない生活)をしていたので夜は、柏ゲストハウスの TV を良く見てました。放送大学も意外に面白いと思ったのですが、ある時、海外のドラマで、プレスリリースができるかどうかの熾烈な戦いをしているドラマがあり印象に残りました。そして最後にプレスリリー

スがされ、劇的な変化が主人公に訪れるのに感動しました。ちょうど物性研究所に来る前に、学生と一緒にやった研究成果がジャーナルにアクセプトされ、世の中にインパクトがあるので、プレスリリースできると考え大学の広報に原稿を送ったのですが、オンラインでアクセプトされてからすぐに速報版が出版されてしまい、広報はプレスリリースできないと杓子定規に言ってきたのです。その時は、まあ、仕方ないと諦めかけていたのですが、柏ゲストハウスのTVのドラマを見てから考え方を180度変えました。その後、プレスリリースの意義を訴え、本当の紙での出版がまだされておらずそれが2ヵ月後の2016年10月であることを訴えて、広報が意義を認めて頂き最終的にプレスリリースすることができました。

[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2016/160930\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/160930_1.html)

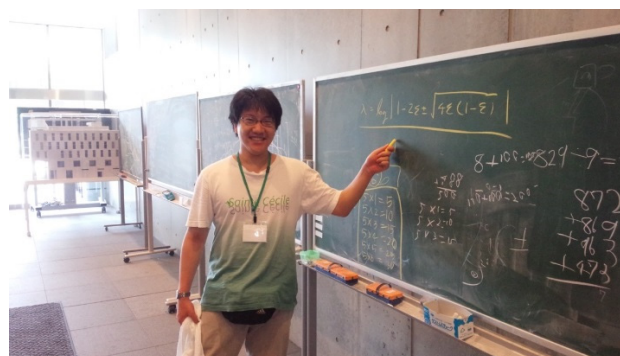
そして、物性研究所離任直後の10/1にNHK等にTVにて放送され(無論、TVを持っていないので自分では見れませんでした。)、その後幾つかの企業、国の研究機関から共同研究のオファーがあり忙しい日々を送る毎日に激変しました。文字通り人生が変わりました。又、2016年10月に一番アクセスが多い京都大学の研究成果発表として取り上げられたことも後で知りました。

この研究成果は、本来、物性研究所のテーマと一見関係ない様なテーマですが、多地点で取得する人工衛星の電離圏データの相関を考えるというのが、地震予測につながりうる異常検出法となるというものであり、相関こそがデータ解析手法と物理(MC)とがつながる鍵という訳です。そして、この研究が世にでたきっかけは、物性研究所のゲストハウスのTVにある訳であり、何かの間違いでこの研究が賞をもらうことになれば、間違いなく、物性研究所(及びそのゲストハウスのTV)のお陰と考えています。

#### **(5) 研究室で議論のために連れてきた学生(博士課程)の笑顔(2016年8月) :**

(1)で上述し、(2)-(3)で例示された様に、物性研究所でできる限り長く滞在することは、やはり実りが大きいことが考えました。ただ、4月から8月の最初までは講義、院試があり物性研に長く滞在できません。そこで、6月くらいに、自分は夏の院試が終わった8月のお盆前からの1-2ヶ月、時間の有る限り、物性研究所に長期滞在することを、研究室の学生に宣言しました。その時、一番困った顔をした学生(右記写真参照)を物性研究所に連れてきました。その学生(大久保健一君(当時 D2))はたまたま実家が東京

にあり、毎日の様に物性研にて研究の議論をしたのですが、本人が満足していたのは、写真の笑顔が証明しています。同室の渡辺宙志さん、大久保毅さん、セミナールームを毎日貸していただいた加藤岳生所員に、研究から、研究者としての生き方などアドバイスしていただき、指導教員として大変ありがたかった次第です。



#### **最後に :**

今回の2016年前期の物性研での客員滞在一番誇りを持って言えるのは、前期を通した滞在期間の長さだと思います。特に2016年の8月の滞在は、自分の研究者人生にとっても忘れられないことの連続でした。ただ、これらの経験だけで満足してしまうのでは滞在時間だけ長かった客員所員(記録的な一過性の台風男?)として記録されるだけで、意味がありません。今後、この普段と異なる素晴らしい環境で議論し、考えたことを基礎に、今後の物理やモンテカルロ計算のブレイクスルーとなる様な研究を継続的に進め、物性研との共同研究の成果として、発表につなげていきたいと思えます。最後に、この様な機会を与えていただきました物性研の皆様をはじめとしまして、何から何まで私の客員としての滞在を支えていただきました川島直輝先生と秘書の光富さんに、改めて感謝申し上げます。どうもありがとうございました。

# 客員所員を経験して

愛媛大学 大学院理工学研究科 中村 正明

私は 2016 年 10 月から半年間、物性研で客員所員をさせていただきました。

物性研は私にとって、以前からなじみ深いところで、博士号取得直後の 2 年余りの間、ポスドク (COE 研究員) として、当時の高橋實研究室に在籍させていただき、研究者としてのキャリアをスタートさせたところでありました。ちょうど柏に移転する直前の六本木時代で、都心の研究所という今ではあまり見られなくなった環境で貴重な時間を過ごすことができ、業績を積むことができました。その後も、高橋研、押川研にはセミナーに参加させていただいたり、研究室のメンバーと議論させていただいたり、共同研究をするなど、大変お世話になっておりました。

その後、東京理科大、東工大などを経て、2015 年秋から、現在の愛媛大学に着任しましたが、ちょうど地方大学の研究環境が厳しくなりつつあり、2016 年度から運営費は大幅に削減され、学内のスタートアップ予算なども取得が困難になる状況でしたので、交通費だけでなく、研究予算もつけていただいている客員所員の制度は大変助けになりました。また、地方にいと疎くなりがちな情報も取り入れることができたことも大きいです。月に 1~2 度ほど訪問させていただき、議論させていただくことができました。

客員所員の受け入れ先である押川研究室では、トポロジカル絶縁体や低次元強相関係の研究を中心に議論をさせていただきました。トポロジカル絶縁体とはスピン軌道相互作用により試料の端にギャップレス状態が生じる絶縁体で、現在盛んに研究されているテーマですが、2005年に Kane と Mele によって予言され、2009年に量子化された縦抵抗率の測定により、その存在が確認できたといういきさつがあります。私は系がトポロジカル絶縁体であるか、それとも通常の絶縁体であるかを輸送係数の直接の測定をせずに、非接触型の実験手段で検出できる方法はないかと考え、その一つとして、電子スピン共鳴 (ESR) による動的スピン磁化率の測定が使えないかということで、主にそれについて議論させていただきました。押川教授はスピン系の ESR に関して有名な研究をされており、議論させていただくには最良の環境にありました。

ESR とは固体中の電子のスピンを磁場でゼーマン分裂させ、それに対して垂直方向にかけた振動磁場の吸収率から系の情報を知る手段で、吸収率は理論的には動的スピン磁化率と対応付けられます。通常、この実験手法は磁性体など局在スピン系に対して用いられますが、遍歴電子系に応用した場合にどうなるかについて考え、その対象としてスピン軌道相互作用のある 2 次元電子系がトポロジカル相にあるか否かについての判定に使えるのではないかと考えました。遍歴電子系では、局在電子と異なり、電子の軌道運動が何らかの余計な寄与を与えるのではないかとナイーブには予測されますが、少なくとも 2 次元系に限定すると、面内での運動はランダウ量子化されるのに対し、面に垂直な運動は存在しないので、横磁場による軌道運動の変化は起こらず、遍歴電子系の場合の議論がそのまま使えることがわかります。

そこで、トポロジカル絶縁体を記述する Kane-Mele 模型 (グラフエン型の蜂の巣格子にスピン軌道相互作用を加えた 2 次元電子模型) において、磁場下での ESR スペクトルを計算したところ、エネルギー分散がディラック的であるため、正負のエネルギー領域にランダウ準位が形成されて、その指標  $n$  の絶対値が同じランダウ準位間でしか遷移が起きないことがわかりました。また、エネルギーギャップのあるディラック分散をもつ系に特徴的な  $n=0$  のランダウ準位の配置がトポロジカル相であるか否かで異なったものになるのですが、その配置の違いが  $n=0$  に対応する吸収ピークの有無として反映されることから、それによってトポロジカル相か否かが判定できることがわかりました。これはまだ実験的には確認されていませんが、未知のトポロジカル絶縁体を解析するのに有用な手段となるのではないかと考えています。また、同様の計算を HgTl などのより現実的なトポロジカル絶縁体を記述する 2 次元模型である Bernevig-Hughes-Zhang (BHZ) 模型や、Rashba 型スピン軌道相互作用のある系へも拡張しました。さらに、3 次元トポロジカル絶縁体やワイル半金属にも応用できないか検討中です。

これ以外にも、物性研 2 次元フラストレートしたハバード模型の厳密基底状態を構成する問題、また、Lieb-

Schultz-Mattis 定理で登場する偏極演算子に関する研究についても議論させていただき、研究を進めています。

また、任期終了間際の3月末には、客員所員で頂いた予算で、ドイツのドレスデンにあるマックス・プランク研究所での研究会 DYNPRO17(Dynamical Probes for Exotic States of Matter)に参加させていただきました。そこでいろいろな方々と議論ができ、そこから、また新たな研究テーマが生まれ、研究が進展しつつあります。

最後に、客員所員として受け入れていただいた押川教授、また議論していただいた押川研の皆様方、出張手続きでお世話いただいた5階の秘書の方々や共同利用係の方々に改めて感謝したいと思います。



## 物性研究所短期研究会

# 「光で見る・操る電子物性科学の最前線～強相関、トポロジー、低次元、ダイナミクス～」の報告

日時：2017年6月12日(月)～6月14日(水)

場所：物性研究所本館 6階大講義室(A632)

研究会提案代表者：近藤猛(物性研)

共同提案者：和達大樹(物性研)、秋山英文(物性研)、木村昭夫(広大)

物質の電子物性を司る電子構造を直接観察できる光電子分光は、電子物性科学において強力かつ汎用な実験ツールとしての地位をすでに確立しています。この潮流と立ち位置は今後も維持されていく一方、次世代を担う若手研究者には、光電子分光が持つさらなるポテンシャルの拡大が大きく期待されています。これまで、高温超伝導体の発見に伴う超伝導ギャップ同定や、トポロジカル絶縁体の電子構造が背負うスピン偏極観察など、新物質発見の各局面が光電子分光技術の進展を力強く後押ししたことは周知の事実です。これら見たい物質からの要請と相まって、光電子分光技術は光源の進展とも足並みを揃えて発展して来ました。近年、独立に進歩を続けてきた放射光とレーザーが波長領域の守備範囲で大きな重なりを持つようになり、光電子分光利用においてもその目的に応じて横断的に使い分け可能な時代に突入しています。制御されて整った光が持つコヒーレンス、偏光、パルス性といった3大特徴を駆使すれば、見るツールとして光電子分光の幅が広がるだけでなく、電子状態を操る側面を併せ持ち、光電子分光を基軸とする物性科学への夢は大きく広がります。本研究会では、光電子分光が持つ秘められた可能性を模索しつつ、近未来物性科学へ活かす機会と捉え、気鋭の若手研究者を集結させ議論しました。三日間にわたり31件の口頭発表と53件のポスター発表が物性研究所本館6階大講義室で行われました。参加者は、初日118名(学外38名、学内80名)、二日目121名(学外55名、学内66名)、三日目96名(学外42名、学内54名)であり、のべ335名(学外135名、学内200名)の賑やかな研究会となりました。

初日の6月12日(月)は、趣旨説明と瀧川所長の挨拶でオープニングがあったのち、セッション1でスピンとトポロジーをテーマに議論がありました。村上修一氏は、ワイルド半金属・ディラック半金属・ノーダルライン半金属などのトポロジカル半金属を対象とするトポロジーと具体的な物質探索について、理論的立場から発表されました。石渡晋太郎氏は、極性—非極性転移を示す珍しい半金属であ

る層状カルコゲナイド-MoTe<sub>2</sub>の化学置換量や圧力により発現する熱電特性や超伝導性を紹介しました。低温のゼーベック係数が異常な増大を示すこと、また、臨界領域近傍から非極性構造相にかけて超伝導転移温度が急激に上昇することを見だし、これらの異常の振る舞いの起源として、極性構造転移に関わるソフトフォノンによる非弾性散乱の効果や、極性転移に伴うスピン分裂効果の可能性について議論しました。石坂香子氏は、スピン分解角度分解光電子分光により明らかにした超伝導体PdBi<sub>2</sub>および極性半金属MoTe<sub>2</sub>のトポロジカルな性質について議論しました。臨界温度5.4Kを持つ超伝導体PdBi<sub>2</sub>においては、フェルミ面を形成するスピン偏極した表面バンドの在を観測するとともに、バルクの第一原理バンド計算を基に得たZ<sub>2</sub>不変量の考察により、そのトポロジカルな性質を明らかにしました。自己組織化によって形成された磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合に着目した成果を発表しました。Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>上に磁性絶縁体MnSeを成長させることでヘテロ構造を作製し、時間反転対称性の破れを検証した結果、ディラックコーンに約80meVのギャップが開くことを直接確認しました。宮本幸治氏は、2枚のBiS<sub>2</sub>層にLa-(O,F)層が挟まれたLa(O,F)BiS<sub>2</sub>超伝導体(Tc=10.6K)について紹介しました。理論計算から、この物質の超伝導現象を引き起こす電子が、BiS<sub>2</sub>層の特異な電子スピン構造であることが示唆されています。等エネルギー面のスピン構造がRashba型のものからDresselhaus型へと変化するとする理論予想と対応するスピン偏極状態の観測結果が紹介されました。

セッション2では、非平衡ダイナミクスについての議論を行いました。岡隆史氏は、レーザー光を用いた超高速分光技術の発展に伴って、電子をコヒーレントに駆動するフロケ状態に関する理論的研究の成果を発表しました。フロケ状態を相転移につなげていく「フロケ・エンジニアリング」とその周辺の話題についても紹介がありました。岡崎浩三氏は、大強度超短パルスレーザーを希ガスに集光して発生させる高次高調波レーザーを用いたポンプ-プ



ローブ型時間・角度分解光電子分光の実験結果を報告しました。鉄系超伝導体母物質  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  に対して、それぞれブリルアンゾーン中心と端にあるホール面及び電子面双方において、コヒーレントフォノン励起による光電子強度の振動に位相反転があることを見出しました。また、励起子絶縁体の候補物質と考えられている  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  の測定で、絶縁体-半金属転移を観測した結果の紹介がありました。木村昭夫氏は、トポロジカル絶縁体の非平衡キャリアダイナミクスに着目して発表しました。バルクキャリア制御が連続的に可能な  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  を用いて、バルクキャリアと光起電力シフトとの関係を紹介しました。また、 $(\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x)_2\text{Te}_3$  試料において持続時間の長い緩和過程を見出し、ディラック点がフェルミレベルに接近していることに起因するとの解釈を与えました。

短期研究会二日目となる 6 月 13 日(火)は、セッション 3 として強相関物質に焦点を当てて議論されました。今田正俊氏は、レーザーによる超伝導の制御と観測、とのテーマで、熱平衡では実現できない新奇な電子相を、時間分解分光などの新しい実験手法を用いて解明できる可能性及び難しさについて、超伝導とその周辺に焦点を絞って議論をしました。一つの例として、銅酸化物の擬ギャップや高温超伝導の機構を理解する上での新たな概念的な変革として提唱された隠れたフェルミオンを検証する方法を議論し、今後の展開の方向を述べられました。藤原秀紀氏は、局所的な強相関軌道における占有軌道対称性が物性発現機構の鍵を握るとの視点に立ち、強相関 Yb 化合物の“角度分解” Yb 3d 内殻光電子スペクトルに直線偏光依存性(線二色性)を見出し、4f 軌道の対称性を実験的に決定する手法について紹介しました。吉田鉄平氏は、高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}(\text{Bi}2212)$  の ARPES スペクトルから、アンチノード方向で超伝導状態の自己エネルギーを求め、さらに異常自己エネルギーを求めた結果を紹介しました。正常自己エネルギーと異常自己エネルギーは同一のエネルギーに構造を持ち、Cluster DMFT 計算の結果と定性的に一致する結果を得たことに基づき、ペアリング機構について議論しました。山地洋平氏は、時間反転対称性を破ることで生じるワイル半金属や、電子相関がもたらすトポロジカル絶縁相の発現が理論的に予測されているパイロクロア構造イリジウム酸化物  $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  ( $R$ :希土類元素)の理論的研究を紹介しました。ワイル電子対消滅が金属磁壁状態を生じることを理論的に見出し、All-in-all-out 磁性相内で、時間反転対称性の破れによって生じたワイル電子が簡単に対消滅を起こすため、ワイル半金属相が不安定である一方、

その対消滅後に、結晶対称性に保護された金属磁壁状態が出現することを予測し、(光学)異常ホール効果や円二色性を示すことを提唱しました。

集合写真及び昼食時間をとったのち、午後最初のセッションとして、引き続き強相関の話題について議論が行われました。柳瀬陽一氏は、強相関電子系に数多く見られる  $d$  波超伝導体などのギャップレス超伝導体を「強いトポロジカル超伝導体」に変えることが出来る一般的な方法を提案しました。その条件は、スピン-重項超伝導であること、空間反転対称性が欠如していること、スピン偏極していること、の3つであり、これらの条件が満たされれば、超伝導対称性やバンド構造の詳細に依らず、一般的にトポロジカル超伝導になることが示され、銅酸化物高温超伝導体において既にこれらの条件が実現していることを指摘しました。小林正起氏は、酸化物エレクトロニクスへの応用や低次元強相関電子系の基礎的な理解に向けて多くの注目を集めている酸化物ヘテロ構造や酸化物表面における強相関電子の量子閉じ込め効果を紹介しました。レーザー分子線エピタキシー成膜装置と角度分解光電子分光(ARPES)測定装置を組み合わせた複合装置を用いて、強相関酸化物  $\text{SrVO}_3$  極薄膜において、量子閉じ込め方向と軌道の幾何学により決まる軌道選択的量子化、量子数に依存して有効質量が変化する異常有効質量増大、次元性低下によるフェルミ液体の破綻など、通常の金属量子井戸状態では見られない特異な現象を示しました。

セッション4では、非平衡ダイナミクスの議論を行いました。腰原伸也氏は、電荷-スピン-軌道の複合ダイナミクスが切り開く強相関光物性について、動的X線観測装置及び、動的電子線回折を用いた様々な研究結果を紹介しつつ議論しました。時間分解解析技術の動向ならびにその物質科学的意味合いを、実例に基づきながら解説し、非平衡状態にある物質の特性を最大限引き出し巨大光誘起効果を生み出して行く上で、加器ベースの各種ビーム源とレーザー光源の協働が生み出す果実の重要性、さらには今後急速な発展が期待される軟X線領域の動的構造科学が果たす役割に付いて議論しました。佐藤正寛氏は、電子スピンの主役となる多彩な磁性体におけるレーザーによる磁性制御の研究について紹介しました。マルチフェロイクスに円偏光レーザーを印加して引き起こされる現象として、レーザー中のマルチフェロイクスで生じるレーザー誘起相互作用の一般公式を簡単な1次元磁性体に応用することで、スピカイラリティやスピン流を制御できることを示しました。また、軌道角運動量を持つレーザー(光渦)を適当な



におけるスピン偏極、及び、スピン偏極バレーと非渦型のスピンテクスチャを有するバンドといった、特異な Rashba 効果を紹介しました。矢治光一郎氏は、東大物性研で開発されたレーザースピ分解光電子分光によるスピン偏極表面電子状態の研究に関して発表しました。Bi 単結晶をはじめとする様々なスピン偏極表面電子状態について *p* 偏光及び *s* 偏光条件で実験を行い、鏡映面垂直方向にのみ観測されるスピン偏極が *p* 偏光と *s* 偏光で反転することを見出すと共に、光学遷移選択則を考慮することでそれが解釈できることを紹介しました。田中慎一郎氏は、グラファイト及びグラフェンを舞台として、非占有バンド間の電子フォノン散乱過程を高分解能 ARPES で検出する研究について紹介しました。間接遷移過程を通して観測する電子構造と、電子の始状態との比較から、フォノン散乱の詳細を抽出する手法を議論しました。木須孝幸氏は、レー

ザーARPES による分子性導体研究と、SPring-8 における高効率光電子分光装置の開発について発表しました。6 eV の真空紫外レーザーを励起光とする光電子分光により、金属絶縁体転移を避けて合成された  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X 超伝導体で初となるバンド分散の実験結果を紹介しました。

閉会にあたり、辛埴氏より短期研究会の総括があり閉会となりました。

最後に、短期研究会を開催するにあたり多大なご支援をいただきました物性研スタッフの皆様、特に事務担当をして頂きました辛・岡崎・近藤研秘書の新榮幸子さん、SOR 施設秘書の吉澤泉子さん、また、辛・岡崎・近藤研究室の学生、ポスドクの皆様、写真撮影に協力して頂いた工藤博文さんには、この場を借りて感謝致します。

## プログラム

6月12日(月)

13:00-13:05 趣旨説明：近藤猛(東大)

13:05-13:10 所長あいさつ

[セッション1 スピン・トポロジー1] (座長：近藤猛(東大))

- 1) 13:10-13:55 村上修一(東工大) 「トポロジカル半金属のトポロジーと物質探索」
- 2) 13:55-14:40 石渡晋太郎(東大) 「極性-非極性転移を示す半金属 MoTe<sub>2</sub>における特異な輸送現象」
- 3) 14:40-15:05 石坂香子(東大) 「トポロジカル金属・半金属におけるバルクと表面の電子構造」
- 4) 15:05-15:30 平原徹(東工大) 「自己組織化によって形成された磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合」

休憩 15:30-15:50

- 5) 15:50-16:15 宮本幸治(広大) 「スピン分解光電子分光法による隠れた電子スピン構造の探索とその実験手法の将来展望」

[セッション2 非平衡ダイナミクス1] (座長：秋山英文(東大))

- 6) 16:15-17:00 岡隆史(Max Planck) 「フロッケ・エンジニアリング：光誘起相転移と冷却原子系の共通言語」
- 7) 17:00-17:25 岡崎浩三(東大) 「高次高調波時間分解光電子分光による非平衡電子状態の観測」
- 8) 17:25-17:50 木村昭夫(広大) 「トポロジカル絶縁体の非平衡キャリアダイナミクス-光で表面ディラック粒子を見る・操る-」

6月13日(火)

[セッション3 強相関] (座長：藤森淳(東大))

- 9) 10:00-10:45 今田正俊(東大) 「レーザーによる超伝導の制御と観測」
- 10) 10:45-11:10 藤原秀紀(阪大) 「高エネルギー光電子分光による強相関電子物性研究の新展開」
- 11) 11:10-11:35 吉田鉄平(京大) 「高温超伝導体の超伝導状態の自己エネルギー」
- 12) 11:35-12:00 山地洋平(東大) 「パイロクロア構造遷移金属酸化物におけるワイル電子の対消滅と磁壁金属」

集合写真・昼食 12:00-13:05



- 13) 13:00-13:25 柳瀬陽一 (京大) 「2次元強相関電子系を用いたトポロジカル超伝導のデザイン」
- 14) 13:25-13:50 小林正起 (東大) 「強相関酸化物における新奇金属量子井戸状態」

[セッション4 非平衡ダイナミクス2] (座長: 木村昭夫 (広大))

- 15) 13:50-14:35 腰原伸也 (東工大) 「電荷-スピン-軌道の複合ダイナミクスが切り開く強相関光物性」
- 16) 14:35-15:00 佐藤正寛 (茨城大) 「光によるスピンの超高速操作の提案〜光でスピンをひねる&光をスピんに転写する〜」

休憩 15:00-15:20

- 17) 15:20-15:45 下志万貴博 (理研) 「フェムト秒パルス電子を用いた超高速格子ダイナミクスの観測」
- 18) 15:45-16:10 石田行章 (東大) 「ディラック電子系の時間分解ARPES」
- 19) 16:10-16:35 辻直人 (理研) 「偏光分解した光で見る超伝導体のヒッグスモードと電荷密度揺らぎ」
- 20) 16:35-17:00 羽田真毅 (岡大) 「時間分解電子線回折法の液晶分子ダイナミクスへの展開」

17:00-18:00 ポスタープレビュー (座長: 和達大樹 (東大))

18:00-20:00 懇談会・ポスターセッション

6月14日 (水)

[セッション5 顕微] (座長: 齋藤智彦 (東理大))

- 21) 10:00-10:25 岩澤英明 (Diamond) 「Diamond Light Sourceにおけるnano-ARPES」
- 22) 10:25-10:50 谷内敏之 (東大) 「化学状態・磁気状態のナノイメージングを可能にするレーザー励起光電子顕微鏡」
- 23) 10:50-11:15 永村直佳 (NIMS) 「走査型光電子顕微鏡"3D nano-ESCA"を利用した機能性微小クラスターのピンポイント分析とそのオペランド分析への展開」
- 24) 11:15-11:40 松井文彦 (奈良先端大) 「光電子回折を利用した局所構造と電子状態解析」

[セッション6 スピン・トポロジー2] (座長: 和達大樹 (東大))

- 25) 11:40-12:05 大坪嘉之 (阪大) 「トポロジカル近藤絶縁体清浄表面の電子状態とスピン・軌道偏極構造」

昼食 12:05-13:00

- 26) 13:00-13:45 中辻知 (東大) 「磁性体におけるトポロジーと機能性」
- 27) 13:45-14:10 酒井英明 (阪大) 「多層ディラック電子系 EuMnBi<sub>2</sub>における磁気秩序とカップルした電気・熱輸送現象」
- 28) 14:10-14:35 坂本一之 (千葉大) 「固体表面上の特異なラッシュバースピン」

休憩 14:35-14:50

- 29) 14:50-15:15 矢治光一郎 (東大) 「レーザースピ分解光電子分光によるスピン偏極表面電子状態の研究」
- 30) 15:15-15:40 田中慎一郎 (阪大) 「電子格子相互作用の素過程の高分解能ARPESによる検出」
- 31) 15:40-16:05 木須孝幸 (阪大) 「レーザーARPESによる分子性導体研究とSPring-8における高効率光電子分光装置開発」

16:05-16:25 終わりに: 辛埴 (東大)

ポスターセッション

- P01) 明比俊太郎 (東大物性研) 「レーザー角度分解光電子分光で研究するルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の表面電子状態」
- P02) 伊藤俊 (東大物性研) 「Photo-induced ultrafast potential shift observed at a metal- semiconductor interface of a Bi thin film」
- P03) 大江日南子 (東理大) 「硬 X 線光電子分光による  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  の電子構造」
- P04) 小野頌太 (岐阜大) 「準平衡近似を超えたフォノン熱化過程」
- P05) 川北純平 (東大物性研) 「レーザー励起光電子顕微鏡を用いた次世代不揮発性メモリ ReRAM の非破壊観測」
- P06) 川田萌樹 (阪大) 「X 線電子分光線二色性による重い電子系  $\text{CeCu}_2\text{Ge}_2$  の 4f 基底状態軌道対称性の決定」
- P07) 國定総 (東大物性研) 「レーザーARPES で精密観測する  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  の超伝導ギャップと擬ギャップ」
- P08) 栗原暢人 (東大物性研) 「Bi/Cu(111)界面における Rashba パラメータの酸素曝露の影響」
- P09) 興石佳佑 (東大理) 「角度分解光電子分光で観測する Te アニール  $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$  の電子構造」
- P10) 近藤広康 (阪大) 「レーザー角度分解光電子分光における  $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$  の重い準粒子状態の観測」
- P11) Yi-Tao Cui (東大物性研) 「 $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  adsorption on Pt nanoparticles revealed by in situ hard-x-ray photoemission spectroscopy」
- P12) Zhigang Zhao (東大物性研) 「Realization of a mW-level 10.7-eV laser by cascaded third harmonic generation of a Yb: fiber CPA laser at 1-MHz」
- P13) 齋藤成之 (東大物性研) 「赤外極短パルス OPCPA 光源によるアト秒軟 X 線科学の開拓」
- P14) 坂野昌人 (東大工) 「キラルな結晶構造を有するテルル単体のバンド構造の観測」
- P15) 鈴木剛 (東大物性研) 「時間分解光電子分光法による FeSe におけるコヒーレントフォノンの観測」
- P16) 染谷隆史 (東大物性研) 「Intrinsic carrier cooling in high mobility graphene on SiC(000-1)」
- P17) 祖利目和明 (阪大) 「紫外レーザー光電子分光における繰り返し周波数通倍器を用いた空間電荷効果の抑制」
- P18) 高三和晃 (京大) 「銅酸化物薄膜におけるレーザー誘起トポロジカル超伝導」
- P19) 高野彩佳 (阪大) 「強相関希土類化合物  $\text{DyB}_2\text{C}_2$  の異方性 4f 電荷分布を反映した内殻光電子線二色性の観測」
- P20) 高橋健吾 (東大工) 「ミスフィット層状化合物  $(\text{PbSe})_{1.16}(\text{TiSe}_2)_2$  におけるバンド構造の観測」
- P21) 高橋謙太 (東理大) 「Polarization-emission angle dependent hard x-ray photoemission study on Cu-based delafossite oxides」
- P22) 高橋裕也 (東理大) 「角度分解光電子分光法による層状 Mn 酸化物の電子構造の研究」
- P23) 高柳亮平 (東理大) 「Co 2p 内殻硬 X 線光電子分光によるペロブスカイト型 Co 酸化物のスピン状態」
- P24) 竹内健悟 (東大物性研) 「高強度中赤外光源の開発と固体における高次高調波発生」
- P25) 都築章宏 (東大物性研) 「Nb との近接効果によるトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の超伝導電子状態の直接観測」
- P26) 中島脩平 (東大物性研) 「走査トンネル顕微鏡と放射光 X 線磁気円二色性による Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の原子構造と磁性研究」
- P27) 中田勝 (東大理) 「角度分解型光電子分光で調べる銅酸化物超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Tl}_2$  のネマティシティ」
- P28) 中谷泰博 (阪大) 「軟 X 線角度分解光電子分光による  $\text{CeNi}_2\text{Ge}_2$  の重い準粒子状態の実証」
- P29) 中山充大 (東大物性研) 「 $\text{Sr}_3(\text{Ru}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{O}_7$  における軌道選択的的金属絶縁体転移の観測」
- P30) 中村飛鳥 (東大工) 「金属薄膜の時間分解電子線回折」
- P31) 中村飛鳥 (東大工) 「遷移金属ダイカルコゲナイド  $\text{VTe}_2$  の超高速格子ダイナミクス」
- P32) 並木航 (東理大) 「軟 X 線分光による  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$  の電子構造」
- P33) 野口亮 (東大物性研) 「レーザースピ分解 ARPES で調べる巨大ラッシュバ分裂表面状態の軌道とスピン」
- P34) 萩原健太 (東大理) 「角度分解光電子分光による  $\text{PrFeAsO}_{1-y}$  の超伝導ギャップ」



- P35) 挟間優治 (東大物性研) 「光電子分光法を利用した太陽電池における光起電力高速ダイナミクスの測定」
- P36) 橋本嵩広 (東大物性研) 「鉄系超伝導体 FeSe のネマティックドメインに敏感な超伝導ギャップ異方性」
- P37) 濱本諭 (阪大) 「内殻光電子線二色性による強相関立方晶 Pr 化合物 4f 基底状態対称性の観測」
- P38) 檜垣聡太 (広大) 「 $\eta$ -Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub> の異方的バンド構造の観測」
- P39) 松下雄一郎 (東大物性研) 「Ni<sub>1/3</sub>TiS<sub>2</sub> に対するアンフォールド DFT バンド構造と ARPES との直接比較」
- P40) 松田旭央 (広大) 「W(111)のスピンの偏極二重交差バンドの研究」
- P41) 松丸大樹 (東大物性研) 「偏光依存スピン分解 ARPES で見るスピン軌道結合:トポロジカル絶縁体 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> と TlBiSe<sub>2</sub>」
- P42) 馬場基彰 (阪大) 「光を照射しない光誘起相転移の探索」
- P43) 道前翔 (東大物性研) 「高次高調波レーザー時間分解 ARPES による銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 における準粒子ダイナミクスの観測」
- P44) 三石夏樹 (東大工) 「ジグザグ鎖構造をもつ 1T''-(V,Ti)Te<sub>2</sub> の電子状態の研究」
- P45) 宮脇淳 (東大物性研) 「共鳴非弾性軟 X 線散乱の磁気円二色性で見る  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の弱強磁性」
- P46) 元結啓仁 (東大物性研) 「レーザーPEEM で観測する Ti 酸化物の界面強磁性」
- P47) 山神光平 (阪大) 「銅酸化物高温超伝導体における内殻光電子線二色性の観測」
- P47) 山神光平 (阪大) 「銅酸化物高温超伝導体における内殻光電子線二色性の観測」
- P48) 吉田訓 (東大工) 「角度分解光電子分光による V<sub>1/3</sub>NbS<sub>2</sub> の電子構造の研究」
- P49) Chun Lin (東大理) 「Effects of pseudogap opening in the anti-nodal region of Bi2212 studied by ARPES」
- P50) 渡邊光 (京大) 「BaMn<sub>2</sub>As<sub>2</sub> が示す奇パリティ秩序とその応答の理論的研究」
- P51) 渡邊真莉 (東理大) 「時間分解光電子分光による 2H-NbSe<sub>2</sub> の光励起電子状態の観測」
- P52) 藤原弘和 (岡大) 「ハーフメタル強磁性体 CrO<sub>2</sub> の高分解能スピン分解光電子分光」
- P53) 新田淳 (千葉大) 「高品質ルプレン単結晶の電子構造」





# 物性研究所談話会

標題：光子を用いた量子情報科学と量子計測  
日時：2017年7月27日(木) 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：竹内 繁樹  
所属：京都大学大学院工学研究科  
要旨：

量子を重ね合わせた状態や、不確定性原理、量子もつれ(Quantum Entanglement)といった、量子力学の本質的な性質を利用した新たな機能の実現をめざす、量子情報科学が近年急速に進展している[1,2]。また、その応用の一つとして、量子計測が最近注目されている。広範に利用される光計測との関連から非常に重要である「光子を用いた量子計測」においては、光子間の量子のもつれが重要な役割を担う。

本講演では、まず光量子回路について、2光子量子干渉を用いたゲート素子、それらを組み合わせて構築した「量子もつれフィルター[3]」、「量子制御スワップゲート[4]」などの研究を紹介する。次に、光子を用いた量子計測について、量子もつれ光を用いた高感度位相差計測[5]を応用した「量子もつれ顕微鏡[6]」、および量子光を利用した光コヒーレンストモグラフィ(OCT)[7]に関する最近の研究成果を紹介する。また、光ファイバの一部を光の波長以下にまで引き伸ばしたナノ光ファイバへの微小共振器を組み込み、それと単一発光体を集積化した高効率単一光子源[8]や、低次元半導体中の結晶欠陥などの新規単一光子源などの研究[9]を紹介する。

これらの研究の一部は、JST-CREST ならびに科学研究費の支援を受けた。

- [1] 竹内繁樹、日本物理学会誌、vol. 69, No. 12, 853 (2014).
- [2] S. Takeuchi, Jpn. J. Appl. Phys. vol. 53, 030101 (2014).
- [3] R. Okamoto et. al., Science, vol. 323, 483 (2009).
- [4] T. Ono et. al., Scientific Reports, vol. 7, 45353 (2017).
- [5] T. Nagata et. al., Science, vol. 316, 726, (2007).
- [6] T. Ono, R. Okamoto, and S. Takeuchi, Nature Communications, vol. 4, 2426 (2013).
- [7] M. Okano, et. al., Scientific Reports vol. 5, 18042 (2015).
- [8] A. W. Schell et. al., Scientific Reports vol. 5, 9619 (2015)
- [9] A. W. Schell et. al., ACS Photonics, vol. 4, 761 (2017).

標題：重力波天文学の夜明けと展望 –それを支える超技術–

日時：2017年9月14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：川村 静児

所属：東京大学宇宙線研究所・重力波観測研究施設

要旨：

2015年9月14日、アメリカの重力波検出器 Advanced LIGO が重力波の初検出に成功した。アインシュタインが一般相対性理論の帰結として、重力波の存在を予言してからちょうど100年、人類はついに宇宙を観るための新しい手段を手に入れたのである。

実際、初めて見つかった重力波は、13億光年遠方で起こった太陽の30倍程度のブラックホール連星の合体から放射されたものであり、これはブラックホール連星の発見という天文学上の大きな発見を伴うものであった。まさに、重力波の



初検出により重力波天文学の夜明けが訪れたのである。この偉業を支えたのが、様々なシステムにおける超技術の開発であり、重力波の引き起こす 10-21 というごく僅かな空間のひずみを計測することを可能にしたのである。今後も、重力波天文学はヨーロッパの Virgo や日本の KAGRA の重力波観測ネットワークへの参加により、そして更なる超技術の開発により、ますます発展していくことが期待される。さらに将来は、日本が推進しているスペース重力波アンテナ DECIGO により、宇宙初期からの重力波を検出し、宇宙誕生の謎に迫ることも期待できる。

本講演では、重力波の説明から始め、その検出方法、重力波天文学の概要、重力波の初検出、量子光学などいくつかの超技術、KAGRA、DECIGO などについて詳しく解説する。

**標題：物性研談話会&平成 29 年度 森野レクチャー「Small and Fast: Coherent Å-fs Chemistry」**

**日時：2017 年 10 月 10 日(火) 午後 4 時～**

**場所：物性研究所本館 6 階 大講義室 (A632)**

**講師：Wilson Ho**

**所属：University of California, Irvine**

**要旨：**

Inhomogeneity of different length scales is one of the fundamental characters of space and matter that has its origin in the spatial variations of the charge and mass distributions. While many changes in nature and in the laboratory can be observed with the naked eyes, ultimately the interactions that lead to these changes occur at the atomic scale. In addition, heterogeneity influences the time scale that transformations occur at different locations, and the average time may differ significantly from the local times. The desire to understand and control changes in the charge and mass distributions would require experimental tools that possess simultaneous spatial and temporal resolutions to reveal the heterogeneity.

The relevant scales in chemistry relate to the motions of atoms in molecules that occur at fraction of a vibrational period and  $<0.1$  nm distance. This joint Å-fs resolution can be achieved by the combination of a femtosecond laser with a low temperature scanning tunneling microscope (fs-STM) in ultrahigh vacuum that probes chemical transformations of single molecules. As a first demonstration, the dynamics of the conformational change in a single molecule adsorbed on a metal surface was followed in the time domain, revealing the vibrational reaction coordinate and the temporal decay of the coherently excited state that drives the conformational change [1]. In addition, the effects on the single molecule dynamics by a nearby molecule were determined. These experiments demonstrate the fs-STM approach in probing the effects of heterogeneity in space and time on the chemical dynamics in single molecules.

[1] S. Li, S. Chen, J. Li, R. Wu, and W. Ho, Phys. Rev. Lett., submitted (2017).

**標題：平成 29 年度 後期客員所員講演会**

**日時：2017 年 10 月 19 日(木) 午前 10 時～午前 11 時 40 分**

**場所：物性研究所本館 6 階 大講義室 (A632)**

**要旨：10:00-10:10 所長挨拶 (瀧川 仁：物性研所長)**

10:10-10:40 吉田 鉄平 (京都大学大学院)  
「光電子分光で探る高温超伝導体のクーパー対」

10:40-11:10 Mario NOVAK (University of Zagreb)  
「Fermiology of the 3D Dirac line-node semimetal ZrSiS」

11:10-11:40 Ingo SALZMANN (The Humboldt University of Berlin)  
「Control over Structure and Charge Density in Organic Semiconductor Nanomaterials」



**標題：**スピン流とスピントロニクス

**日時：**2017年11月30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：**齊藤 英治

**所属：**東北大学 金属材料研究所 材料科学高等研究所

**要旨：**

物質中の電子スピン角運動量の流れ「スピン流」は、スピントロニクスのみならず物性物理のいろいろな領域に登場するようになり、新しい現象を開拓する有用な指導原理の役割を果たしてきた。基礎物理においては、幾何学的位相や相対論など現代物理学の面白く美しい部分との深いつながりが明らかになりつつある。他方でスピン流はメモリデバイス開発等への応用が進み、その一部は実用化に至っている。スピン流に多くの注目が集まるようになったきっかけのひとつが、スピンホール効果・逆スピンホール効果の発見である。この発見によって、スピン流を容易に検出することが可能になった。この発見により、スピンゼーベック効果やスピン流トルクなどのスピン流の生み出す様々な現象が発見され、スピン流物理の対象は電磁現象、熱現象、光現象、ナノ機械運動にまで広がってきている。本稿では、スピン流の物理の基礎から最近の話題までを易しく紹介したい。

**標題：**Topological Semimetals : How to find them

**日時：**2017年12月14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：**Prof. Hongming Weng

**所属：**Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences and Collaborative Innovation Center of Quantum Matter

**要旨：**

In this talk, I will introduce the family of topological semimetals (TSM) including Dirac semimetal (DSM), Weyl semimetal (WSM), and triply degenerate nodal point semimetal (TPSM). In ideal case, they have and only have nodal points at the Fermi level, but they are classified according to the distribution and degeneracy of these nodal points. The quasiparticles of low energy excitation in DSM and WSM can be described by massless Dirac and Weyl equation, respectively, while those in TPSM have no counterpart in the high-energy field theory. To find realistic materials hosting these exotic topological quantum states is very challenge and crucial to the further experimental studies. We noticed that the unusual temperature dependent diamagnetism is a strong hint of existence of linear Dirac cone like bands around Fermi level. This has been confirmed in DSMs Na<sub>3</sub>Bi and HfTe<sub>5</sub> at phase transition. It also leads to the success in locating TaAs, the first available WSM. The experimental studies of these materials have stimulated many research works, including the characteristic chiral anomaly and Fermi arcs. Finally, the TSM family members and their relationship with each other are summarized.

# 物性研究所セミナー

**標題：機能物性セミナー：タンパク質膜透過チャンネル Sec トランスロコンを経由するタンパク質輸送のメカニズム**

**日時：2017年7月6日(木) 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：塚崎 智也**

**所属：奈良先端科学技術大学院大学**

**要旨：**

生体内で合成されたタンパク質の多くは生体膜をこえて輸送されたり、生体膜に組込まれたりして、その機能を発揮する。生体膜には Sec トランスロコンとよばれる進化的に保存されたタンパク質膜透過チャンネルがあり、ここを経由して多くのタンパク質が運ばれる。大腸菌では、膜タンパク質 SecY, SecE, SecG からなる複合体が Sec トランスロコンを形成しており、ここを経由するタンパク質輸送のモータータンパク質として SecA ATPase, 膜タンパク質 SecDF が存在する。SecDF はプロトンの濃度勾配を利用していると考えられている。これらのモータータンパク質は基質タンパク質を伴ったダイナミックな構造変化を繰り返すことによって膜透過を駆動する。この分子メカニズムの解明は、本研究分野の最優先課題の一つであり、構造情報が必要とされていた。2003年ごろから筆者らのグループをはじめいくつかのグループが Sec ならびに関連因子の構造解析を進めてきた結果、タンパク質の膜透過・膜組込みの理解が深まった。本セミナーでは、我々が進めてきた X 線結晶構造解析ならびに機能解析を中心に解説し、考えられるタンパク質輸送のモデルを紹介する[1]-[5]。また、現在進行中のタンパク質輸送の動的メカニズム解明にむけたリアルタイム計測の試みについてもふれたい。

**【参考文献】**

- [1] Tsukazaki et al., Nature 455, 988-991 (2008).
- [2] Tsukazaki et al., Nature 474, 235-238 (2011).
- [3] Kumazaki et al., Nature 509, 516-520 (2014).
- [4] Tanaka et al., Cell Rep. 13, 1561-1568 (2015).
- [5] Furukawa et al., Cell Rep. 19, 895-901 (2017).

**標題：量子物質・ナノスケールセミナー：第8回：半導体、半金属、絶縁体二次元界面におけるスピン輸送物性評価**

**日時：2017年7月10日(月) 午後1時30分～**

**場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)**

**講師：安藤 裕一郎**

**所属：京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻**

**要旨：**

純スピン流(スピン角運動量の流れ)やスピン偏極電流(スピン偏極した電流)を生成・輸送・検出する技術はスピントロニクスデバイスにおいて不可欠である。スピン流を情報輸送や演算に用いる場合には非平衡状態のスピン流を用いる必要がある。このような非平衡状態のスピンは必ずスピン緩和を伴う。従って、スピン寿命、スピン拡散長などのスピン輸送物性の理解は、デバイス設計の指針を得る上で極めて重要と言える。スピン輸送物性の解明にはスピン流を強磁性体から対象物質に注入するのが一般的である。対象物質が金属中の場合、スピン流を注入することは比較的容易であり、解析もシンプルな場合が多い。一方、半導体に注入する場合には数多くの障害が発生し困難を極める。しかし、そ



の一方で、注入されたスピン流に関しては豊かな物理を内包しており、基礎学理の観点でも、応用の観点でも極めて重要な研究対象と言える。本講演では一般的な半導体(Si, Ge, GaAs, および GaAs 二次元電子ガス等)中や[1-3], スピン軌道相互作用が大きい半金属 Bi 膜中[4]、d 軌道電子がスピン輸送を担っていると期待されている LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 二次元界面[5]におけるスピン流物性の解明に関する、我々の最近の研究成果を中心に紹介する。研究対象は多岐に渡るが、それぞれの特徴を鑑み、適したスピン流評価手法を選択しなければ徒労に帰す恐れもある。各々のスピン輸送物性の評価手法について、利点・欠点、工夫すべき点、注意すべき点等を解説する。

- [1] T. Sasaki, Y. Ando et al., Phys. Rev. Appl. 2, 034005 (2014).
- [2] A. Yamamoto, Y. Ando et al., Phys. Rev. B 91, 024417 (2015).
- [3] S. Dushenko, M. Koike, Y. Ando et al., Phys Rev. Lett. 114, 196602 (2015).
- [4] H. Emoto, Y. Ando et al., Phs. Rev. B 93, 174428 (2016).
- [5] R. Ohshima, Y. Ando et al., Nat. Mater. in press.

**標題：極限コヒーレント光科学セミナー：第 53 回：Out-of-Equilibrium Electronic Properties of Topological Insulators Investigated by Time Resolved ARPES**

**日時：2017 年 7 月 11 日(火) 午後 2 時～**

**場所：物性研究所本館 6 階 第一会議室 (A636)**

**講師：Alberto Crepaldi**

**要旨：**

Optical injection of spin in topologically protected surface states is a promising route towards realization of spintronics devices based on topological insulators (TIs).

The control over spin current requires the understanding of the electron and spin scattering processes, as well the direct imaging of the coupling between electrons and the optical excitation. Time and angle resolved photoelectron spectroscopy (tr-ARPES) represents the ideal experimental tool to shed light upon these aspects.

We have recently carried out a systematic study of the prototypical TIs, Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, by combining tr-ARPES with high photon energy, spin resolution and by comparing its out-of-equilibrium electronic properties to one of several other TIs, characterized by different doping level. All together our results suggest that spatial diffusion of the excited electrons towards the bulk plays a critical role. This effect can be mediated by bulk states and by unoccupied surface resonance, whose presence have been identified by means of spin resolved tr-ARPES.

**標題：量子物質セミナー：空間群の表現に基づくトポロジカルバンド構造の指標**

**日時：2017 年 7 月 12 日(水) 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：渡辺 悠樹**

**所属：東京大学工学系研究科 物理工学専攻**

**要旨：**

我々の身の周りの非磁性結晶は 230 個の空間群、磁性結晶は 1651 個の磁気空間群に分類される。本講演では「これらの対称性を持つ物質がどのようなトポロジカルバンド構造を実現しうるか?」という重要な問題について議論する。

よく知られているように、Z<sub>2</sub> トポロジカル絶縁体の指標はもともと Paffian を k 空間で積分したもので与えられるが、系が反転対称性を有する場合にはこの煩雑な計算を実行する必要はなく、TRIM における占有軌道のパリティを掛け合わせればよい。この事実は単に指標の計算を簡略化するとどまらず、より一般に「バンド反転(band inversion)

を起こせばトポロジカル絶縁体になる」という指導原理を与え、具体的なトポロジカル絶縁体の物質を探索する上で役立ってきた。

この「反転対称性のパリティに基づくトポロジカル絶縁体の指標」を一般化した「(磁気)空間群の表現に基づくトポロジカル(結晶)絶縁体・トポロジカル半金属の指標」について説明し、具体例として、磁性体中のワイル半金属について議論する。

[1] Hoi Chun Po, Ashvin Vishwanath, HW, Nature Communications, 8, 50 (2017).

[2] HW, Hoi Chun Po, Ashvin Vishwanath, in preparation.

標題：LASOR セミナー：Ultrafast electronic band gap control in an excitonic insulator

日時：2017年7月13日(木) 午前10時30分～

場所：物性研究所本館6階 第一会議室 (A636)

講師：Claude Monney

所属：University of Zürich, Department of Physics

要旨：

It has been proposed in 1961 by Mott that a semimetal may be unstable towards an insulating ground state, when electrons and holes bind together through the Coulomb interaction and form excitons [1]. On this basis, it was elaborated a few years later that both a semimetal and a semiconductor can undergo this instability [2]. A phase transition occurs at low temperature, when the excitons condense in a macroscopic state, giving rise to the so-called excitonic insulator phase. Experimental observation of this phase has proven to be very challenging since its theoretical prediction and not much is known about the time-domain dynamics of this exotic phase.

In this talk, I will discuss the case of the semiconductor  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ , which has a direct band gap and displays a semiconductor-semiconductor phase transition at about 330 K [3].  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  has already been proposed for the realization of an excitonic insulator phase, based on angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) data [3]. Its valence band at  $\Gamma$  shows a peculiar flattening at low temperature and is anomalously broad, explained as the consequence of strong excitonic fluctuations [4].

Here I will present time-resolved ARPES data of  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ . I will show how the band gap of  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  can be *controlled* in a pump-probe experiment by varying the pump fluence. While for low fluences the band gap is transiently decreased, we observe that it can be *increased* for high fluences. I will argue that this observation is a direct consequence of the exciton condensate being trapped in a non-thermodynamical state where it is transiently strengthened.

References:

[1] N. Mott, Phil. Mag. 6, 287 (1961).

[2] D. Jérôme et al, Phys. Rev. 158, 462 (1967).

[3] F.J. Di Salvo et al., J. Less Common Metals 116, 51 (1986).

[4] Y. Wakisaka et al., Phys. Rev. Lett. 103, 026402 (2009).

[5] K. Seki et al., Phys. Rev. B 90, 155116 (2014).

[6] S. Mor et al., submitted, arXiv:1608.05586.



標題：理論インフォーマルセミナー：Multiplons and Doublon Dynamics in the Hubbard Model

日時：2017年7月14日(金) 午後2時～

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：Roman Rausch

所属：University of Hamburg

要旨：

This talk aims to provide a better understanding of the role and behaviour of “doublons” (repulsively bound holes or electrons) which inevitably govern the physics of the Hubbard model in many regimes.

In the first part, the two-hole excitation spectra of the one-dimensional Hubbard model are studied for all fillings using the density-matrix renormalization group (DMRG) in combination with the Chebyshev polynomial expansion technique. Experimentally, this corresponds to Auger Electron Spectroscopy (AES). The spectra reveal what can be called “multiplon” physics, which means that the relevant final states are not only characterized by two holes (doublon), but also by three (triplon), four (quadruplon) and more; potentially forming stable compound objects or resonances with finite lifetime.

A comparison with the Bethe ansatz reveals the decay channels of the initial doublon excitation into spinons and holons in one dimension. Surprisingly, one discovers that the doublon lifetime becomes infinite at the Brillouin zone edges despite interactions. This can be traced back to the “hidden” charge-SU(2) symmetry of the Hubbard model. In the second part, the fate of a local two-hole doublon excitation is studied in real-time. It shows a mixed ballistic-diffusive propagation through the lattice with a partial decay. The dynamics of this decay is discussed as a function of filling and interaction strength. The ambivalent role of singly occupied sites is key to understanding the time-dependent doublon physics: For high fillings, ground-state configurations with single occupancies strongly relax the kinematic constraints and open up decay channels. For fillings close to half filling, however, their presence actually helps the doublon to propagate ballistically.

標題：理論セミナー：First-principles simulation of electrochemical reactions at solid-liquid interface

日時：2017年7月18日(火) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：Dr. Minoru Otani

所属：CD-FMat, AIST

要旨：

Interfacial electrochemistry, which deals with complex catalytic processes in the electrochemical double layer (EDL), is a plentiful source of challenging research as well as a highly dynamic field owing to the rapid development of surface-sensitive techniques and computational tools. We have been working on this subject by developing several methodologies for first-principles molecular dynamics (FPMD) simulations to model an electrochemical interface. First, we proposed a method to incorporate the electric field in the EDL with an appropriate boundary condition by solving the Poisson equation using Green’s function method, which is called effective screening medium (ESM) method [1]. Second, we have developed a simulation scheme to mimic a constant electrode potential in which we can control the Fermi energy of the electrode by connecting the system to a potentiostat [2]. Recently we have developed a novel calculation technique for the solvation structure of EDL by combining the FP simulation with the classical liquid theory [3].

In the seminar, I will introduce the simulation techniques developed by us and present recent simulation results for the cyclic voltammogram of oxygen evolution reaction (OER) and oxygen reduction reaction (ORR) [4]. I will



case studies including Si-Ge nanostructure design, optimization of grain boundary structures and discovery of low-thermal-conductivity compounds from a database.

Reference:

S. Ju, T. Shiga, L. Feng, Z. Hou, K. Tsuda, and J. Shiomi, Designing Nanostructures for Phonon Transport via Bayesian Optimization, *Physical Review X*, 7, 021024, 2017.

S. Kiyohara, H. Oda, K. Tsuda and T. Mizoguchi, Acceleration of stable interface structure searching using a kriging approach, *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 045502, 2016.

A. Seko, A. Togo, H. Hayashi, K. Tsuda, L. Chaput, and I. Tanaka, Prediction of low-thermal-conductivity compounds with first-principles anharmonic lattice-dynamics calculations and Bayesian optimization, *Physical Review Letters*, 115, 205901, 2015.

**標題：機能物性セミナー：試験管内タンパク質合成法による人工細胞膜の構築**

**日時：2017年7月26日(水) 午前11時～**

**場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)**

**講師：車 兪澈**

**所属：東京工業大学 地球生命研究所**

**要旨：**

試験管内タンパク質合成系は、目的のタンパク質を試験管の中で人工的に合成するバイオ技術である。大腸菌などの生物を利用しないため、理論上夾雑物を全く含まない PURE な状態でタンパク質サンプルを入手することができる。この試験管内合成系は細胞膜上で機能する膜タンパク質に対して特に有効であり、脂質膜と組み合わせることで細胞を模した人工細胞膜を再構築することが可能である[1]。そのため、これまで困難であった細胞膜の機能解析や性状解析を大きく進展させる可能性を持つ、学術的・産業的に重要な技術である。さらに生きた細胞を丸ごと再構築する、人工細胞研究の基盤技術としても注目されている[2]。試験管内合成系を用いてこれまでに、タンパク質を脂質膜に組み込む機能を持つ Sec トランスロコン[3]、膜内外のプロトン濃度勾配依存的に ATP (化学エネルギー貯蔵分子) を合成する ATP 合成酵素[4,5]、光エネルギー依存的にプロトン濃度勾配を形成するバクテリオロドプシンの再構築に成功している。また最近では、脂質分子を膜小胞内部で合成することで誘発される、膜の物性変化や形態変化の解析についても取り組んでいる。本セミナーでは、試験管内合成系を利用した人工細胞膜構築についての取り組みと、その応用について紹介したい。

**【参考文献】**

[1] Kuruma et al., *Biochem Biophys Acta-Biomem.* (2009) 1788, 567-574.

[2] Stano et al., *Journal of Materials Chemistry* (2011) 21, 18887-18902.

[3] Matsubayashi and Kuruma et al., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* (2014) 53, 7535-7538.

[4] Kuruma et al., *Biochem. J.* (2012) 442, 631-638.

[5] Kuruma et al., *Nature Protocols* (2015) 10, 1328-1344.



**標題：機能物性セミナー：フェムト秒レーザーを用いたタンパク質の動的構造解析**

**日時：2017年7月26日(水) 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：久保 稔**

**所属：理化学研究所放射光科学総合研究センター・専任研究員**

**要旨：**

タンパク質は構造変化を起こすことで機能する。したがってその機能発現機構を理解するためには、タンパク質の構造の動的性質やダイナミクス(動的構造)を理解することが重要である。我々は種々のフェムト秒レーザーをヘムタンパク質に適用し、ヘムやタンパク部位の動的構造を調べてきた。

(1) ヘム(鉄ポルフィリン)の電子状態については古くからよく研究されているが、低振動や揺らぎといった核の振る舞いはまだよくわかっていない。そこで我々はフェムト秒コヒーレンス分光(ラマン分光の一つ)を用いて、ヘムタンパク質のヘムの低振動数モードを解析した。その結果、低振動数モードがヘム面の歪みと関連していることを明らかにした[1]。ヘム面の歪みは、鉄-ポルフィリン間相互作用を変化させるため、電子状態との相関について理論研究が待たれる。

(2) ヘムを取り巻くタンパク部分(反応場)の状態解析には赤外分光が有用である。ただし、タンパク質の赤外分光は水の強い赤外吸収が測定の妨害となるため、これまで適用が限られてきた。そこで我々は高輝度のフェムト秒赤外レーザーを用いて、水試料を扱える時間分解赤外分光装置を開発した。装置をチトクロム酸化酵素という巨大なヘムタンパク質(分子量21万)に応用し、配位子脱離後のダイナミクスを観測した結果、構造変化の途中で準安定状態が現れることを明らかにした[2]。

(3) 分光では実空間情報を直接得られないが、X線結晶構造解析は原子分解能でそれが可能である。これまで結晶構造解析はダイナミクス研究に対して十分に力を発揮してこなかったが、X線自由電子レーザー(XFEL)の出現により動的解析に新たな道が拓かれた。我々は最近、フェムト秒のXFELパルスを用いた時間分解結晶構造解析の装置を開発し、光合成タンパク質(光化学系II)などに適用した[3,4]。チトクロム酸化酵素の配位子脱離後の準安定状態の構造解析にも適用し、ヘムのスライドやそれに起因した機能部位への構造変化の伝播を原子スケールで観測した[5]。

本セミナーでは、上記研究を中心にヘムタンパク質の動的性質を紹介するとともに、今後の展望について触れる。

**【参考文献】**

[1] Kubo et al. J. Am. Chem. Soc. (2008) 130, 9800-9811.

[2] Kubo et al. J. Biol. Chem. (2013) 288, 30259-30269.

[3] Suga, Akita, Sugahara, Kubo, Nakajima et al. Nature (2017) 543, 131-135.

[4] Nango, Royant, Kubo et al. Science (2016) 354, 1552-1557.

[5] Shimada, Kubo, Baba et al. Sci. Adv. (2017) Accepted.

**標題：量子物質・ナノスケールセミナー：第9回：Exploration of ferromagnets with large anomalous Nernst effect for energy harvesting applications**

**日時：2017年7月27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：桜庭 裕弥**

**所属：国立研究開発法人 物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点磁性材料グループ**

**要旨：**

Developing energy harvesting technologies is an urgent task for coming IoT society to supply electric energy (uW-mW level) to the numerous sensors independently. Thermoelectric power generation is one of the important



techniques to obtain electricity from various types of heat surrounding us, i.e. environmental heat, exhaust heat, body heat etc. In my previous study, I proposed to use anomalous Nernst effect (ANE) in magnets for novel thermoelectric applications. [1-3]. Because ANE generates the electric field to the outer product direction between magnetization and temperature gradient, we can expect to realize different types of TEG having high flexibility, cost-effectiveness, and expandability to large area heat source, compared to conventional Seebeck-based TEG. However, it is necessary to explore ferromagnets having large thermopower of ANE for realizing practical TEG. In this talk, I would like to introduce a strategy to explore materials having large ANE. I also want to show one of my recent studies, ANE in  $\text{Co}_2\text{MnAl}_{1-x}\text{Si}_x$  Heusler compounds, which has successfully obtained the highest thermopower of ANE in ferromagnetic metals ever reported. First principle calculation for the off-diagonal part of electric and thermoelectric tensors agrees with the experimental result, which suggests that first principle calculation is strong to explore new materials having large ANE.

[1] Y. Sakuraba et al., APEX 6, 033003 (2013).

[2] Y. Sakuraba, Scripta Materiali 111, 29-32 (2016).

[3] Y. Sakuraba and K. Takanashi, パリテイ 2014, 6月号

標題：理論インフォーマルセミナー：Origin of the spin reorientation transitions in antiferromagnetic MnPt-based alloys

日時：2017年7月28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. Po-Hao Chang

所属：Department of Physics and Astronomy, University of Nebraska-Lincoln

要旨：

Antiferromagnetic MnPt exhibits a spin reorientation transition (SRT) as a function of temperature, and offstoichiometric Mn-Pt alloys also display SRTs as a function of concentration. Here we describe the origin of these SRTs using first-principles calculations based on the coherent potential approximation, treating chemical and thermally-induced spin disorder on equal footing. We find that the experimentally observed SRTs are related to specific features in the band structure, and we perform a detailed analysis of the effects of temperature and concentration on the magnetocrystalline anisotropy.

Reference:

P.-H. Chang, T. Markussen, S. Smidstrup, K. Stokbro, and B.K. Nikolic, Phys. Rev. B 92, 201406(R) (2015).

J.M. Marmolejo-Tejada, K. Dolui, P. Lazic, P.-H. Chang, S. Smidstrup, D. Stradi, K. Stokbro, B.K. Nikolic, arXiv:1701.00462.

標題：理論セミナー：準周期系における強相関効果

日時：2017年8月1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：古賀 昌久

所属：東京工業大学 理学院 物理学系

要旨：

最近、Au-Al-Yb 準結晶において比熱や帯磁率にべき的な発散が出現する量子臨界性が観測され[1]、準結晶に関する研究がさらに注目を集めている。準周期構造の最もシンプルなものとして、二種類の菱形から構成されるペンローズ格子がある。この格子のタイトバインディング模型には、無限に縮退した束縛状態があり、ハーフフィリングにおいては、そのエネルギーがフェルミレベルに一致している特徴がある[2,3]。そのため、この系に相互作用を導入すると、興味深い相関効果が期待されている。本講演では、この束縛状態に関する議論を深めることにより、弱相関極限における磁気秩序に関するいくつかの厳密な結果を導出する。また、異なる磁気構造をもつ強相関極限[4]へどのようにクロスオーバーするのかについても議論する。

[1] K. Deguchi, S. Matsukawa, N. K. Sato, T. Hattori, K. Ishida, H. Takakura, and T. Ishimasa, Nat. Mat. 11, 1013 (2012).

[2] M. Kohmoto and B. Sutherland, Phys. Rev. B 34, 3849 (1986).

[3] M. Arai, T. Tokihiro, T. Fujiwara, and M. Kohmoto, Phys. Rev. B 38, 1621 (1988).

[4] A. Jagannathan, A. Szallás, S. Wessel, and M. Duneau, Phys. Rev. B 75, 212407 (2007).

標題：国際強磁場科学セミナー：2017年度第3回：30 T ミニコイルパルスマグネットを使った強磁場下分光

日時：2017年8月3日(木) 午後3時～

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室 (A612)

講師：勝谷 郁也

所属：ライス大学電気コンピュータ工学科

要旨：

パルス磁場下での分光実験はしばしば光ファイバーを用いて行われるが、ファイバーの分散により超短パルスがチャープされることや、テラヘルツ波を伝搬することができない、また顕微分光が困難である等の欠点がある。我々はピーク磁場 30 テスラを周期約 5 分で繰り返し発生できるテーブルトップ型のミニコイルパルスマグネットを開発した。光学窓一つを通して試料に直接アクセスでき、パルス強磁場下での超高速分光、非線形光学分光、顕微分光に最適である。このシステムを使って行った最近の実験から、近赤外分光およびテラヘルツ分光の幾つかの例を紹介する。

半導体量子井戸での時間分解発光実験では、インコヒーレントに励起された電子・正孔系が巨視的コヒーレンスが自発的に発生する Dicke superradiance の特殊例である superfluorescence を観測した[1]。これにより、有限の遅延時間の後にコヒーレント放射のバーストが生じる。アメリカ国立強磁場研究所における以前の我々の測定[2]と比較して、光パルスの光ファイバーによる分散がないことにより時間分解能を改善し、superfluorescence の遅延時間とパルス幅の最大値を決定することに成功した。

真性シリコン中の光励起キャリアのサイクロトロン共鳴を、30 T パルスマグネットとシングルショットテラヘルツ時間領域分光器を組み合わせることによって測定した[3]。階段状光学素子の導入によって空間的にプローブ光に遅延を与え、単一のパルス光からテラヘルツ帯での時間分解実験が可能となる。光励起キャリアのサイクロトロン共鳴吸収の磁場依存性から、キャリア有効質量  $m^*$  は  $m_0$  を真空中の自由電子質量として  $0.19m_0$  と求まる。



我々はまた、近赤外領域のバンド端でのセレン化インジウム (InSe) の円偏光依存磁気吸収分光を行った。0 T で約 1.32 eV に観測される 1s 励起子ピークの磁場による反磁性シフトとゼーマン分裂を 30 T まで測定し、反磁性シフト定数  $\sigma = 4.08 \times 10^{-3} \text{ meV/T}^2$  および有効 g 因子  $g_{\text{eff}} = 2.12$  を決定した。

[1] Rev. Sci. Instrum. 84, 123906 (2013).

[2] Nature Physics 8, 219 (2012).

[3] Optics Express 24, 30328 (2016).

**標題：理論セミナー：Molecular simulation and modeling of functional dynamics in biomolecular motor**

**日時：2017年8月3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：岡崎 圭一**

**所属：分子科学研究所 理論・計算分子科学研究領域**

**要旨：**

EF<sub>0</sub>F<sub>1</sub> ATP synthase is one of the most important biomolecules, synthesizing most of ATP in the cell. Especially the catalytic part, F<sub>1</sub>-ATPase, has been extensively studied by both crystallography and single-molecule experiments, revealing atomistic structures and detailed mechanochemical coupling scheme, respectively. However, connection between these two aspects are not well established: structural basis of the functional cycle has been controversial. We previously performed systematic structural analysis [1] and molecular dynamics simulations [2] to clarify the connection. We have been recently working on multiscale dynamics of this rotary motor, to understand how the ATP hydrolysis reaction drives the large-scale rotational motion. For the whole F<sub>0</sub>F<sub>1</sub> ATP synthase, we built a simple viscoelastic model to explain symmetry mismatch between F<sub>0</sub> and F<sub>1</sub> motors [3].

References:

[1] Mitsuhiro Sugawa, Kei-ichi Okazaki, et al. (2016) "F<sub>1</sub>-ATPase conformational cycle from simultaneous single-molecule FRET and rotation measurements" Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 113 (21): E2916-E2924.

[2] Kei-ichi Okazaki and Gerhard Hummer (2013) "Phosphate release coupled to rotary motion of F<sub>1</sub>-ATPase" Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 110 (41): 16468-16473.

[3] Kei-ichi Okazaki and Gerhard Hummer (2015) "Elasticity, friction, and pathway of  $\gamma$ -subunit rotation in F<sub>0</sub>F<sub>1</sub>-ATP synthase" Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 112 (34) 10720-10725

**標題：ナノサイエンスセミナー：全反射高速陽電子回折 (Total-reflection high-energy positron diffraction, TRHEPD) による結晶表面の構造解析**

**日時：2017年8月9日(水) 午後1時30分～**

**場所：物性研究所本館6階 第一会議室 (A636)**

**講師：兵頭 俊夫**

**所属：KEK 物質構造科学研究所**

**要旨：**

物質の特性や機能は、構成原子の種類と配置で決まる。したがって、物質・材料の構造（詳細な原子配置）解析は、物性・機能の研究を支える基盤である。三次元物質では、Bragg等によって見出されたX線回折法が100年の間に発達し、放射光を使った構造解析が、タンパク質や複雑な機能性化合物・合金などの結晶にも有効な、標準的構造解析手法となっている。一方この間、二次元的な表面についてもさまざまな構造解析法が開発されてきたが、単独の標準的手法として、

三次元物質に対する X 線と同じような精度で結晶表面とその直下の詳細な原子配置を決めることができる手法は未だ存在しないとよい。

全反射高速陽電子回折 (TRHEPD、トレプト) は、反射高速電子回折 (RHEED) の陽電子 (電子の反粒子) 版 [1] であるが、すべての固体に共通な、内部の静電ポテンシャルが正であるという基本物性に基づく、他に類を見ない表面超高感度をもっており、表面構造決定の標準的な手法になる可能性がある [2]。

現在、KEK 物質構造科学研究所低速陽電子実験施設では、高強度低速陽電子ビームを用いた世界唯一の TRHEPD 装置を共同利用に供している。これまでに、起伏が大きいため 10 年来決着していなかった Ge(001)-(4×2)-Pt ナノワイヤ構造 [3]、30 年来決着していなかったルチル型 TiO<sub>2</sub>(110)-(1×2) 表面の構造 [4, 5] を決定した。また、基板上に合成したグラフェンの基板との距離が基板の種類 (Cu と Co) によって大きく異なることの実証 [6]、Ag(111) 面上のシリセンのバックリングの大きさと基板からの距離の実測 [7]、Al(111) 面上のゲルマネンのバックリングがそれまでの予想と異なって非対称的であることの解明 [8] などを行ってきた。

ここでは、TRHEPD 法の原理とその表面超高感度の由来、測定法および具体的な測定例について解説する。

#### 参考文献

- [1] 一宮彪彦, 日本物理学会誌 70, 683 (2015).
- [2] Y. Fukaya, et al., Appl. Phys. Express 7, 056601 (2014).
- [3] I. Mochizuki, et al., Phys. Rev. B 85, 245438 (2012).
- [4] I. Mochizuki et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 18, 7085 (2016).
- [5] 望月出海他, 表面科学 37(9), 451 (2016).
- [6] Y. Fukaya, et al., Carbon 103, 1 (2016).
- [7] Y. Fukaya, et al., Phys. Rev. B 88, 205413 (2013).
- [8] Y. Fukaya, et al., 2D Materials, 3, 035019 (2016).

**標題:** LASOR セミナー: Low Dimensional Systems on Silicon Carbide Surfaces

**日時:** 2017 年 8 月 9 日(水) 午前 10 時 30 分～

**場所:** 物性研究所本館 6 階 第一会議室 (TV 会議: 播磨)

**講師:** Dr. Marie D'angelo

**所属:** Institut des Nanosciences de Paris & 松田巖研

#### 要旨:

Silicon carbide is a wide band gap semiconductor which has attracted a lot of interest due to its physical properties making this material particularly suitable for high temperature, high power and high frequency applications. The different SiC polytypes show a great variety of surface reconstructions which were extensively studied in the last decades. Now, we have reached the point where the surface reconstructions are sufficiently well understood and controlled to move to the next step and use them as a template to create new nanostructures and low dimensional systems.

In this presentation, I will address two examples of these low dimensional nano-objets created on silicon carbide surfaces.

In the first part, I will concentrate on the cubic 3C-SiC and more particularly on hydrogen adsorption on the 3C-SiC(001)-3×2 surface reconstruction. I will explain how, by combining valence-band photoemission, ab-initio calculations and vibrational spectroscopies, we could establish the formation of nano-tunnels due to hydrogen atoms interaction with the subsurface region of the semiconductor [1].

In a second part, I will focus on graphene on hexagonal 6H-SiC samples. Silicon intercalation under the carbon



terminated ( $6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3}$ )R30 layer was followed step by step by means of core level photoemission spectroscopy. The results show that sequences of Si deposition and annealing can lead to a fully decoupled graphene layer on 6H-SiC(0001). For partial decoupling, we can evidence the formation of nanometric metal-semiconductor heterojunctions.

[1] P. Soukiassian, E. Wimmer, E. Clasco, C. Giallombardo, S. Bonanni, L. Vattuone, L. Savio, A. Tejada, M. Silly, M. D'angelo, F. Sirotti and M. Rocca, Nature Communications 4, 2800 (2013).

[2] M. Silly, M. D'angelo, A. Besson, Y.J. Dappe, S. Kubsky, G. Li, F. Nicolas, D. Pierucci and M. Thomasset, Carbon 76, 27 (2014).

**標題：機能物性セミナー：等方性の高移動度と高発光特性を有する単結晶有機半導体**

**日時：2017年8月10日(木) 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：後藤 修**

**所属：北京大学深圳研究生院**

**要旨：**

高いキャリア移動度と高い発光特性を有する有機半導体材料は、高性能発光トランジスタや電流注入型有機半導体レーザの実現に不可欠となる。我々は、単結晶を用いた発光トランジスタ構造をベースに、有機半導体レーザの作製に取り組んでいる。高移動度と高発光特性を同時に満たす有機半導体材料は極めて珍しいが、アントラセンコアを持つ誘導体はこれらの特性を同時に満たす。問題は、単結晶成長では、大きさと膜厚を独立に制御することが極めて難しいことである。

2015年に Wenping Hu 教授のグループが 2,6-diphenylanthracene (DPA)を合成した[1]。単結晶 FET のホール移動度は  $34 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、かつ、高い発光特性を示した。しかしながら、この材料では大きく薄い単結晶を成長することができない。我々は、フェニル基にアルキル基や、O を介したアルキル基を付加し側鎖に用いた誘導体を合成し[2]、単結晶成長条件と単結晶 FET の特性を調べた[3, 4]。

単結晶成長装置は通常、原料を昇華させる領域と結晶を析出させる領域の 2 つの加熱領域を持つ。今回は、結晶成長のメカニズムを理解するために、成長領域が 2 つある合計 3 つの加熱領域を持つ成長装置を用い、核形成と成長を制御するための「飽和-過飽和曲線」を実験的に得た。2,6-bis[4-ethylphenyl]anthracene (BEPAnt)では、成長温度を  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  から  $250^\circ\text{C}$  に変えることで、直径  $0.1 \text{ mm}$ 、膜厚  $400 \text{ nm}$  から、直径  $1.0 \text{ mm}$ 、膜厚  $50 \text{ nm}$  まで形状を制御できた。大きく薄い単結晶を用い、放射型のソース・ドレイン電極を用いた FET を作製、ホール移動度の角度依存性を調べ、二次元面内で等方的なホール移動度 ( $7.2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) を得た。2,6-bis(4-methoxyphenyl)anthracene (BOPAnt)でも同様の実験結果が得られ、等方的なホール移動度は  $16.6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  に達した。このような単結晶では、デバイス作製の際に電極の形成方向を考慮する必要がないため、デバイス作製上大きな利点となる。なぜ等方的な移動度が得られるのかを調べるために、ホッピング移動度の計算を行った。これらの材料では、二次元面内で P, T1, および T2 方向の移動度に特徴があり、T1 と T2 が同じ値になる一方、P 方向の移動度が T1(T2) に対して無視できるほど小さくなる。私が Zhenan Bao 教授の研究室で扱った 2,7-di-tert-butyl[1]benzothieno[3,2-b]benzothiophene (ditBu-BTBT) もまた等方的な高移動度を示す材料であるが[5]、この材料では P, T1, および T2 方向の移動度はほぼ等しかった。こうした知見は、材料設計上の重要な指針となると考えられる。今後、これら 2 つの有機半導体単結晶のレーザ材料としての特性を調べつつ、デバイス作製プロセスを構築して行く。

[1] J. Liu, H. T. Zhang, H. L. Dong, L. Q. Meng, L. F. Jiang, L. Jiang, Y. Wang, J. S. Yu, Y. M. Sun, W. P. Hu, A. J. Heeger, Nat. Commun. 2015, 6.

[2] L. J. Yan, Y. Zhao, H. T. Yu, X. Hu, Y. W. He, A. Y. Li, O. Goto, C. Y. Yan, T. Chen, R. F. Chen, Y. L. Loo, D. F. Perepichka, H. Meng, W. Huang, J. Mater. Chem. C 2016, 4, 3517-3522.

- [3] A. Li, L. Yan, C. He, Y. Zhu, D. Zhang, I. Murtaza, H. Meng, O. Goto, J. Mater. Chem. C 2017, 5, 370-375.  
[4] C. He, A. Li, L. Yan, D. Zhang, Y. Zhu, H. Chen, H. Meng, and O. Goto, to be submitted.  
[5] G. Schweicher, V. Lemaire, C. Niebel, C. Ruzie, Y. Diao, O. Goto, W. Y. Lee, Y. Kim, J. B. Arlin, J. Karpinska, A. R. Kennedy, S. R. Parkin, Y. Olivier, S. C. B. Mannsfeld, J. Cornil, Y. H. Geerts, Z. Bao, Adv. Mater. 2015, 27, 3066-3072.

標題：理論インフォーマルセミナー：Triply Degenerate Nodal Point Semimetals

日時：2017年8月24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. Hongming Weng

所属：Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

要旨：

Searching for the analogues of high-energy particles in solids has become a hot topic since the discovery of Dirac semimetals  $\text{Na}_3\text{Bi}$  and  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , and Weyl semimetals TaAs family. The massless Dirac fermions described by Dirac equation behave in the similar way as the low energy excitation around the four-fold degenerate nodal points formed by band crossing in solids. The chiral Weyl fermions are described by two-component Weyl equation with two nondegenerate bands touching at a point. In solids, the space group can protect energy nodes with other degeneracies, such as three, six and eight-fold one, which might lead to massless fermions that have no counterpart particles in high-energy physics[1]. In this talk, I will introduce our recent theoretical proposals of triply degenerate nodal point semimetals. They are crystals with symmorphic space group symmetry of WC type crystal structure, including TaN[2], ZrTe[3], HfC[4], MoP[5,6] and WC[7,8]. The unconventional three component fermions in them are formed by crossing of nondegenerate and double degenerate bands, protected by both rotational and mirror symmetries. As an intermediate fermion between Dirac and Weyl fermion, the host semimetal has different magnetoresistance from Dirac semimetal and Weyl semimetal.

- [1] B. Bradlyn et al., 353, aaf 5037 (2016); H. Weng et al., Nat. Sci. Rev. doi:10.1093/nsr/nwx066.  
[2] H. Weng et al., Phys. Rev. B 93, 241202 (2016).  
[3] H. Weng et al., Phys. Rev. B 94, 165201 (2016).  
[4] R. Yu et al., Phys. Rev. Lett. 193, 036401 (2017).  
[5] Z. Zhu et al. Phy. Rev. X 6, 031003 (2016); J. Sun et al. Chin. Phys. Lett. 34, 027102 (2017).  
[6] B. Q. Lv et al., Nature 546, 627 (2017).  
[7] J. B. He et al., Phys. Rev. B 95, 195165 (2016).  
[8] J. Z. Ma et al., arXiv: 1706.02664.

標題：物質・物性セミナー：第13回：From  $\text{CaFe}_2\text{As}_2$  to  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ : physical properties and effect of pressure

日時：2017年8月28日(月) 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：Dr. Sergey L. Bud'ko

所属：Ames Laboratory US DOE, and Department of Physics and Astronomy, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA

要旨：

An overview of the synthesis and anisotropic thermodynamic and transport properties of single-crystalline, single-phase  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  will be presented. [1] The samples were grown out of a high-temperature, quaternary melt. Temperature-dependent measurements of x-ray diffraction, electrical and thermal transport, magnetization, specific heat, and  $^{57}\text{Fe}$  Mossbauer spectroscopy measurements, combined with field-dependent measurements of electrical resistivity and field and pressure-dependent measurements of magnetization indicate that  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  is an ordered, stoichiometric, Fe-based superconductor with a superconducting critical temperature,  $T_c = 35$  K. Other than superconductivity, there is no indication of any other phase transition for  $1.8\text{K} < T < 300$  K. All of these thermodynamic and transport data reveal striking similarities to those found for optimally or slightly overdoped  $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ , suggesting that stoichiometric  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  is intrinsically close to what is referred to as “optimally-doped” on a generalized phase diagram for Fe-based superconductors. Additionally, pressure response of  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  will be discussed. [2] With increasing pressure, both resistivity and magnetization data show that the bulk superconducting transition of  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  is suppressed and then disappears at  $P > 4$  GPa. High pressure x-ray data clearly indicate a phase transition to a collapsed tetragonal phase in  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  under pressure that coincides with the abrupt loss of bulk superconductivity near 4 GPa. Band structure calculations also find a sudden transition to a collapsed tetragonal state near 4 GPa, as As-As bonding takes place across the Ca-layer. Bonding across the K-layer only occurs for  $P \geq 12$  GPa. These findings demonstrate a new type of collapsed tetragonal phase in  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ : a half-collapsed-tetragonal phase.

These data will be compared in detailed with the literature data for  $\text{CaFe}_2\text{As}_2$ . [3]

1. W. R. Meier, et al., Phys. Rev. B 94, 064501 (2016).
2. Udhara S. Kaluarachchi et al., arXiv:1702.06622.
3. P. C. Canfield et al., Physica C 469, 404 (2009).

標題：理論インフォーマルセミナー：Skyrmion crystal as a promising thermoelectric converter: A prediction from first-principles

日時：2017年8月29日(火) 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：Mr. Yo Pierre Mizuta

所属：Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

要旨：

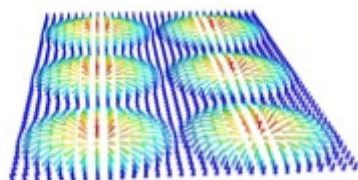
The anomalous Nernst effect (ANE), a heat-to-electric conversion in mutually transverse directions, can be driven by an emergent magnetic field  $B$  originating from inhomogeneous magnetic moments in solids. Large ANE has been experimentally confirmed in various ferromagnets, and only very recently, also in an antiferromagnet [1]. Here we theoretically propose that, the Skyrmion crystal (SkX), in which magnetic topological objects *Skyrmions* are crystallized, is another candidate to host large ANE.

We have found through first-principles calculations on a single  $s$ -orbital model using the package *OpenMX* [2] and *Wannier90* [3] that, **in a two dimensional SkX phase a large ANE would appear when chemical potential  $\mu$  is properly tuned** (Figure) [4]. This was interpreted as due to its characteristic distribution of Chern numbers among the bands (each Chern number representing quantized flux of  $B$  field through each electronic band in momentum space).

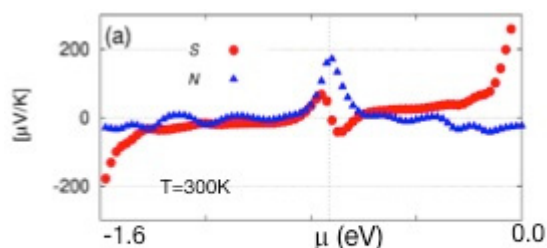


Following such an observation in the simplest model of square SkX [4], our subsequent computations on a more realistic oxide film also predict large ANE.

This motivates further studies of ANE in the SkX family, in quest of better thermoelectric materials that exploit this effect.



An example of square SkX



Predicted large ANE coefficient (blue) in a SkX (s-orbital model of Ref. [4])

- [1] M. Ikhlas *et al.*, Nature Physics (2017) doi:10.1038/nphys4181.
- [2] T. Ozaki *et al.*, *Open source package for Material eXplorer*, <http://www.openmx-square.org/>
- [3] A. A. Mostofi *et al.*, <http://www.wannier.org>.
- [4] Y. P. Mizuta and F. Ishii, Scientific Reports 6, 28076 (2016).

標題：ナノサイエンスセミナー：Quantum state readout of individual quantum dots by electrostatic force detection

日時：2017年9月14日(木) 午前10時30分～午前11時30分

場所：物性研究所本館6階 第2会議室 (A635)

講師：Dr. Yoichi MIYAHARA

所属：Department of Physics, McGill University, Canada

要旨：

Electric charge detection by atomic force microscopy (AFM) with single-electron resolution (e-EFM) is a promising way to investigate the electronic level structure of individual quantum dots (QD). The oscillating AFM tip modulates the energy of the QDs, causing single electrons to tunnel between QDs and an electrode. The resulting oscillating electrostatic force changes the resonant frequency and damping of the AFM cantilever, enabling electrometry with a single-electron sensitivity. Quantitative electronic level spectroscopy is possible by sweeping the bias voltage. Charge stability diagram can be obtained by scanning the AFM tip around the QD. e-EFM technique enables to investigate individual colloidal nanoparticles and self-assembled QDs without defining nanoscale electrodes. e-EFM is a quantum electromechanical system where the back-action of a tunneling electron is detected by AFM. The technique can also be considered as a mechanical analog of admittance spectroscopy with a radio frequency resonator, which is emerging as a promising tool for quantum state readout for quantum computing. In combination with the topography imaging capability of the AFM, e-EFM is a powerful tool for investigating new nanoscale material systems which can be used as quantum bits such as nanowires and single molecules and dopants.



標題：極限コヒーレント光科学セミナー：第 54 回：遷移金属ダイテルライドの電子構造と格子ダイナミクス

日時：2017 年 9 月 15 日(金) 午前 10 時～

場所：物性研究所本館 6 階 第一会議室 (A636)

講師：石坂 香子

要旨：

遷移金属ダイカルコゲナイドは超伝導、電荷密度波をはじめとする多彩な電子相を示すファンデルワールス物質群であり、近年ではバレー分極[1]やトポロジカルな性質の観点からも盛んに研究されている。我々はこのなかで、大きな格子歪と金属ジグザグ鎖形成に特徴づけられる特異な構造相転移を示すテルル化合物に注目し、レーザー角度分解光電子分光による電子構造の解明や、時間分解電子線回折[2]による格子ダイナミクスの研究を進めている。本講演では、MoTe<sub>2</sub>におけるワイル半金属状態の極性ドメイン依存性[3]、VTe<sub>2</sub>の二重ジグザグ鎖状態における電子構造の解明[4]、および VTe<sub>2</sub>の構造相転移を利用した新規なコヒーレント音響フォノン生成[5]について、最近得られた成果を紹介する。

[1] R.Suzuki, M. Sakano et al., Nature Nanotechnology 9, 611 (2014).

[2] A.Nakamura et al., Struct, Dyn. 3, 064501 (2016).

[3] M. Sakano et al., Phys. Rev. B 95, 121101(R) (2017).

[4] N. Mitsuishi et al., in preparation.

[5] A. Nakamura et al., in preparation.

標題：LASOR セミナー：When THz meets X-rays: Ultrafast Magnetism

日時：2017 年 9 月 25 日(月) 午前 10 時 30 分～

場所：播磨会議室 (TV 会議：物性研究所第一会議室)

講師：Dr. Ilie Radu

所属：Max-Born Institute Berlin, Germany

要旨：

The fundamental interactions and excitations governing magnetism and correlated matter occur on nanometer length-scales and femtosecond time-scales. Examples are phonons, magnons and electrons as well as their mutual interactions. A direct and selective excitation of these quasiparticles is possible with electromagnetic pulses at THz frequencies, whereas space-, element- and spin-resolved probing is provided by X-rays. Combining these two techniques will allow us to explore magnetic materials with unprecedented temporal, spatial and elemental resolution and to obtain quasiparticle-specific information, these being the key ingredients for understanding ultrafast magnetic phenomena.

Here, I will review the latest developments in our projects on ultrafast magnetism using both X-rays and THz radiation with a focus on magnetization switching phenomena.

# 東京大学物性研究所研究員の公募について

このたび、東京大学物性研究所では、下記の要領で研究員を公募いたします。

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

## 記

1. 公募職種：特任研究員
2. 公募人員：若干名
3. 職務内容：物性科学における実験的または理論的研究
4. 応募資格：次の2条件を満たしている者
  - (1) 博士号取得後10年程度までの者、ただし着任時までに博士号取得が確実に見込まれる者も含む
  - (2) 着任予定時に主たる職、あるいは大学院生および研究生等の身分を有しないこと

\* なお、応募に際しては、関連する物性研究所所員（教授または准教授）と連絡をとって研究計画等の調整を行うこと。  
また、複数の研究室にまたがる研究テーマに取り組む方も歓迎する。
5. 任期：原則として2年間（年度更新）  
その後再応募も可（但し、1年間）
6. 勤務態様・手当・給与等：  
週5日、裁量労働制（週当たり38時間45分相当）  
雇用保険・文部科学省共済組合に加入、通勤手当有  
給与は「東京大学年俸制給与の適用に関する規則」に定める第4条、第5条及び第6条による（年額約430万円程度）
7. 選考方法：原則として書類選考とし、場合によっては面接を行う
8. 提出書類：
  - (1) 履歴書
  - (2) 発表論文リスト
  - (3) 主な論文別刷り（3編以内）
  - (4) これまでの主な業績のまとめ（2000字以内）
  - (5) 研究計画（2000字以内）
  - (6) 指導教員または推薦者による本人に関する意見書
9. 公募締切：平成30年4月13日（金）必着
10. 採用予定日：平成30年9月1日から平成31年2月末日までに着任すること
11. 書類提出方法：  
郵送又はメール送付  
郵送 「物性研究所研究員（〇〇研究室（連絡をとった所員名を記載）と朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること。  
メール 件名は「物性研究所研究員（〇〇研究室応募）」とし、総務係までメールを送付すること。総務係から書類送付先フォルダを連絡するので、そちらに応募書類一式を保存すること。
12. 書類提出先：  
〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号  
東京大学物性研究所総務係  
電話 04-7136-3501 e-mail: [issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp)
13. その他：  
東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。お送りいただいた応募書類等は返却いたしませんので、ご了解の上お申込み下さい。また、履歴書は本応募の用途に限り使用し、個人情報とは正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

## 編集後記

もうすぐ、冬期オリンピックです。ジャンプの高梨さん、ここ数年世界トップの座を維持してきましたが、前回のオリンピックも含めてシーズン後半に調子を落ちることから、今シーズンはオリンピックに合わせてスロースタートで迎えたものの、急成長の外国選手が現れて思うように成績が出ないまま本番を迎えることになりました。予想したより実験が進まないまま迎えた学会発表とは比較になりませんが、彼女の落ち着いた表情の向こうには相当なプレッシャーがあるのは容易に想像できます。この編集後記がお手元に届く頃には結果がどうなっているのか。

さて、今回の物性研だよりでは、客員所員の記事が3つありますが興味深く読まさせていただきました。お3人とも物性研にゆかりがある方で昔話から歴史が垣間見えるお話があり、また、携帯が繋がらないゲストハウスが研究に専念できる最高の環境というくだりでは、思わず吹き出してしまいました。一方で、客員所員の方の交流が無いというご指摘や、地方の大学の方のお立場からのお話は、共同利用研の運営側にとって貴重なご意見です。短期研究会の報告では、光電子分光の今後の発展について、主催者の熱意が感じられる気合いの入った記事になっています。順番が逆になりましたが、松田巖先生のディラックノードルラインの記事では、その研究の経緯も書かれて楽しく拝見できるとともに、「表面科学のルネサンス」と銘打たれているだけあり、既に Citation も上がっているようです。以前の編集後記でも述べましたが、最近プレスリリースが急増しています。その勢いそのまま、物性研だよりも是非ご協力頂ければと思います。

鈴木博之

