

物性研だより

BUSSEIKEN DAYORI

第56巻

第3号

2016年10月

2016年度ノーベル物理学賞

「トポロジカル相転移と、

物質のトポロジカル相の理論的発見」

時間結晶 (time crystal) は存在するか

パイロクロア型イリジウム酸化物において

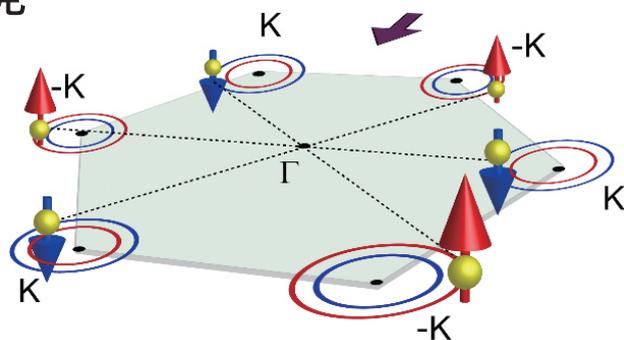
磁場印加方向に敏感な金属・絶縁体転移を発見

強相関半金属で直接観測するフェルミノード状態

50テスラ超強磁場まで維持される2次元超伝導状態

質量ゼロのディラック電子の流れを制御できる

新しい磁石を発見



東京大学物性研究所

Copyright ©2016 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.

ISSN 0385-9843

contents

-
- 1 2016年度ノーベル物理学賞
「トポロジカル相転移と、物質のトポロジカル相の理論的発見」 押川正毅
-
- 10 時間結晶 (time crystal) は存在するか 渡辺 悠樹、押川正毅
-
- 14 パイロクロア型イリジウム酸化物において磁場印加方向に敏感な
金属・絶縁体転移を発見 小濱 芳允、金道 浩一、Tian Zhaoming、中辻 知
-
- 17 強相関半金属で直接観測するフェルミノード状態 近藤 猛、中辻 知、辛 埴
-
- 20 50 テスラ超強磁場まで維持される2次元超伝導状態
斎藤 優、岩佐 義宏、小濱 芳允、徳永 将史
-
- 23 質量ゼロのディラック電子の流れを制御できる新しい磁石を発見
酒井 英明、増田 英俊、徳永 将史、石渡 晋太郎
-
- 26 第20回日本表面科学会学会賞を受賞して 吉信 淳
-
- 28 国際会議 ICSM2016 にて Best Poster Award を受賞して 東野 寿樹
-
- 30 物性研を離れて 末元 徹
-
- 32 客員所員を経験して 石渡 晋太郎
-

【物性研究所短期研究会】

- 34 ○「第1回固体化学フォーラム研究会：固体物質・材料研究の現在と未来」
37 ○『強磁場コラボラトリー、国際協力と強磁場科学の将来』報告

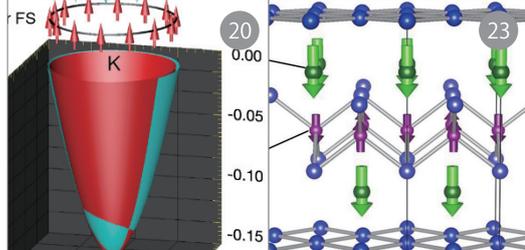
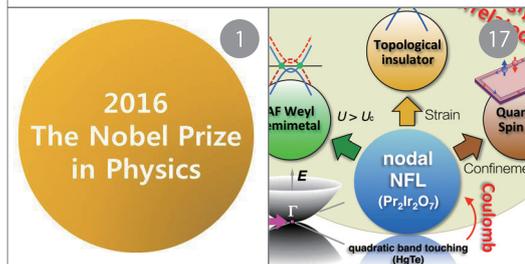
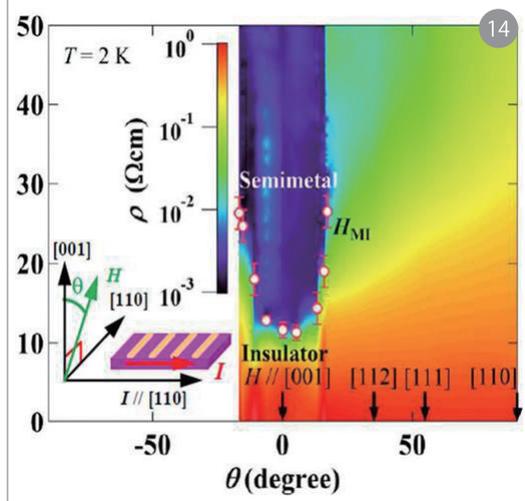
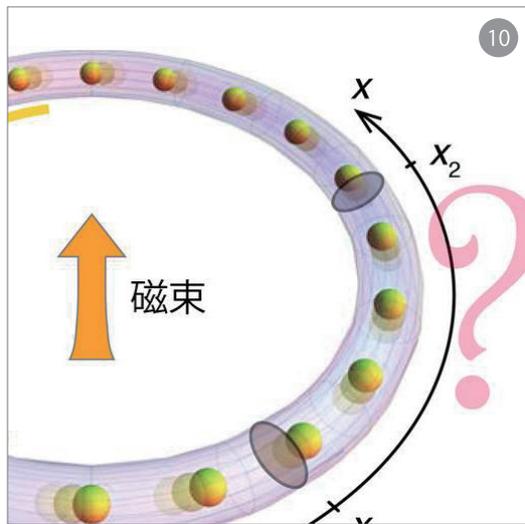
【物性研究所談話会】

【物性研究所セミナー】

【物性研ニュース】

- 56 ○人事異動

編集後記



2016年度ノーベル物理学賞「トポロジカル相転移と、物質のトポロジカル相の理論的発見」

物性研究所 量子物質研究グループ
押川 正毅

1. はじめに

2016年10月4日、スウェーデン王立科学アカデミーは、本年のノーベル物理学賞が「トポロジカル相転移と、物質のトポロジカル相の理論的発見」について、デイビッド・サウレス(David Thouless)、ジョン・コステルリッツ(John Kosterlitz)、ダンカン・ハルデン(F. Duncan M. Haldane)の三名に与えられることを発表した。

トポロジーの概念は現代の物性物理学に必要不可欠なものとなっており、その基礎を築いた業績が顕彰されることは、物性物理学にとって、またより広く基礎科学にとっても、大変喜ばしいことである。「トポロジカル相転移」「トポロジカル相」の例は現在では多岐に渡るが、このような概念を確立するきっかけとなった先駆的な業績として、特に以下の3件が今回のノーベル物理学賞の授賞対象として挙げられている。

a) (ベレジンスキー)-コステルリッツ-サウレス ((B) KT) 転移

b) サウレス・甲元・ナイチンゲール・デンニイス (Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs, TKNN)による、トポロジカル量子数としてのホール伝導度

c) 1次元量子スピン系におけるハルデンギャップ

この中で、b) のトポロジカル量子数としてのホール伝導度という概念の確立には、物性研究所の元所員である甲元眞人が重要な貢献を行った。そこで、ここでは、甲元の貢献にも注目しつつ、本年のノーベル物理学賞の受賞業績について簡単な解説を行う。c) ハルデンギャップに関して、その後の筆者を含めた多くの研究者によるさまざまな発展も含めて簡単に触れたい。なお、以下の記事中で番号による引用 ([51]など) はノーベル財団提供の解説資料 [N2016]の引用文献を指すが、本記事で引用したものは末尾に文献情報を再掲した。それ以外に付け加えた引用文献は、イニシャルと年号による引用 ([H1976]など)を行った。また、本記事中では敬称は全て省略させて頂く。

2. TKNN とトポロジカル量子数

量子ホール効果は、半導体界面などで実現される2次元電子系が磁場中で示すホール伝導度が e^2/h の整数倍、または分数倍に高精度で量子化される現象である。(標準的な)量子ホール効果の実験では、電子密度は一定であり磁場を変化させることになる。このとき、磁場の関数としてホール伝導度が一定となるプラトーが現れる。このプラトー上でのホール伝導度が上述のように量子化されるのである。この量子ホール効果は、さまざまな意味で現代の物性物理学において極めて重要な意味を持つ現象であり、整数量子ホール効果と分数量子ホール効果についてそれぞれノーベル物理学賞が与えられている。さらに、以下で述べるように、量子ホール効果の発見は、TKNN を通じて、量子ホール効果自体にとどまらないより一般的な状況での「物理量のトポロジカル量子化」、さらにはトポロジカル量子数によって特徴づけられる、物質の「トポロジカル相」という概念の確立につながったと言える。

量子ホール効果の実験の実験の状況はいったん忘れて、思考実験として、一定の磁場のもとで化学ポテンシャルを変化させて2次元電子系のホール伝導度を測定することを考えよう。また、電子間の相互作用はとりあえず無視することにする。磁場中では2次元電子のエネルギー準位はランダウ準位に量子化されている。したがって、絶対零度では、化学ポテンシャルがランダウ準位のエネルギーを超えるたびに、そのランダウ準位が電子で完全に満たされる。それぞれのランダウ準位はホール伝導度に e^2/h の寄与をすることが知られているので、化学ポテンシャルの関数としてホール伝導度は階段状に変化し、ステップ部分を除いて e^2/h の整数倍の値を取るようになる。これは実験的に観測されている整数量子ホール効果と類似しているが、考えている状況が違うため整数量子ホール効果の説明にはなっていない。(実際の実験の状況での量子ホール効果を説明するには、不純物を考慮することが必要である [Y1998]。)しかし、この仮想的な「量子ホール効果」も示唆的であり興味深いものである。TKNN は、この仮想的な「量子

3. 運動量空間の仮想ベクトルポテンシャル

先述のように、甲元の論文 [33]では、「TKNN 整数」がブリルアンゾーン上の $U(1)$ ファイバー束のトポロジカル不変量であるチャーン数に他ならないことを示している。この議論は数学的であるが、同時に、甲元は TKNN 整数について非常に物理的な描像も与えている。すなわち、線形応答理論によるホール伝導度は、ブリルアンゾーン上の、あるベクトル場の回転を積分したもので与えられる。このベクトル場は、ブロッホ関数の微分によって与えられ、現在ではしばしば「ベリー接続」と呼ばれるものである。このベリー接続は、ブリルアンゾーン上の仮想的なベクトルポテンシャルとみなすことができ、すると、ホール伝導度は対応する仮想的な磁場をブリルアンゾーン全域で積分したもの（仮想的な全磁束）である。ブリルアンゾーン全域は閉曲面である 2 次元トーラスであり、これを貫く「全磁束」は磁束量子の整数倍に量子化される。これが、TKNN が見出したホール伝導度の e^2/h の整数倍への量子化を与えることになる。

このような描像を得ると、ホール効果について新たな考え方が可能となる。すなわち、磁場によるローレンツ力に起因する古典的なホール効果を離れて、運動量空間におけるベリー接続に起因する仮想的な磁場があればホール効果が起きることになる。後にトポロジカル絶縁体の理論でも重要な役割を果たす、「ハルデン・モデル」における量子ホール効果 [22]も、この一つの実現と言え。時間反転対称性は破るものの単位胞あたりの全磁束がゼロである「ハルデン・モデル」のように、古典的なホール効果よりも TKNN 量子数によって理解できる量子ホール効果を示す系は現在では（整数）チャーン絶縁体と呼ばれ、その「分数版」も含めて盛んに研究が進められている。

現実の物質で観測されるホール効果のうち、外部磁場に依存しない寄与を指す「異常量子ホール効果」の一部も、ここで述べた運動量空間における仮想磁場の効果として理解することができる。実はこの効果は、TKNN 以前にカープラスとラッティンジャーによって指摘されていた [KL1954]。しかし、その重要性や意義は、TKNN からの研究の発展によって認識されるに至り [CN1996]、近年の研究の隆盛につながったと言えるだろう [NSOMO2010]。また、最近注目されているワイル電子系 [NN1983, WTVS2011]においては、「ワイル点」が運動量空間におけるモノポールに対応 [V1987, M2007, O1994]し、そのためにワイル点の周囲に仮想磁場が集中することになる。この仮想磁場のさまざまな効果は、現在の物性物理学にお

けるホット・トピックの一つとなっている [YLR2011]。このように、運動量空間におけるベリー曲率およびそれに起因する仮想磁場は物性物理学の基礎概念として重要な地位を占めているが、その原点は TKNN であり、甲元の論文 [33]に至って概念が確立されたといつても良いだろう。なお、筆者も論文 [33]を学生時代に何ページに何が書いてあるか覚えてしまう程度に何度も読んだが、今見返しても全く古さを感じない、非常に美しくまた教育的な論文である。ファイバー束のトポロジーについての物理学者向けの解説としても秀逸であり、この分野に興味のある若手には必読の文献として薦めたい。

甲元は物性研着任後もトポロジー的な観点からの量子物性物理の研究を推進した。たとえば、3 次元系への TKNN の一般化 [KHW1992]は最近のトポロジカル相の研究の観点からも興味深い。今でこそ、このような研究は当然のものとしてされている（むしろ流行り過ぎている？）が、最近まで、特に日本国内では比較的マイナーな分野だったと言えるだろう。そのような時代に、甲元による先駆的な研究が物性研究所で行われたことには意義があったものと思われる。たとえば、物性研究所の甲元研究室には助手・助教として初貝安弘、白石潤一、佐藤昌利の 3 名が在籍した。当時はトポロジカルな量子物性物理の研究者人口が少なかったこともあり、自然と分野外からの採用となったが、これが現在の日本でのこの分野の研究の発展に大きく寄与していることは異論のないところであろう [S2011b]。

4. トポロジカル絶縁体と TKNN

近年の物性物理学の重要なトピックに、トポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体があげられる [A2014, B2013]。トポロジカル絶縁体とは、バルクの性質は「自明な」バンド絶縁体と同じであるが、量子ホール状態と同様にギャップレスな端状態（もしくは表面状態）を持つような絶縁体である。この端状態（表面状態）は時間反転対称性によって保護されるので、時間反転対称性がある限りトポロジカル絶縁体を明確に相として定義することができる。ここではその詳細には立ち入らないが、トポロジカル絶縁体は、時間反転対称性の存在下においてブリルアンゾーン上で定義される「 Z_2 トポロジカル量子数」によって定義できる。もちろん、具体的な性質や応用は大きくことなるが、思想としては、TKNN を一般化したものがトポロジカル絶縁体の理論だと言えるだろう。

たとえば、以下は、トポロジカル絶縁体の概念を最初に明確に提唱したケーンとメレの論文 [KM2005]の冒頭の段



アフレック・ケネディ・リーブ・田崎(Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki, AKLT)による AKLT 模型であった [1,2]。AKLT 模型は、たとえば $S=1$ の場合には、標準的な 1 次元ハイゼンベルグ反強磁性体に双二次相互作用を加えたものになっている。このハミルトニアン基底状態は厳密に求めることができ、AKLT 状態と呼ばれる。この模型は基底状態の上にゼロでない励起ギャップを持つこと、また基底状態 (AKLT 状態) におけるスピン相関関数が指数関数的に減少することが厳密に証明されている。すなわち、 $S=1$ に関するハルデン予想が、当初の模型を若干変更したものについては厳密に証明されたことになる。

スピン相関関数の振舞いからは、AKLT 状態は量子揺らぎによって秩序が乱された状態だと解釈できる。しかし、AKLT 状態は、開放端において $S=1/2$ の「端状態」スピンを持つこと [K1990]、また、非局所的なストリング秩序パラメータによって検出できる隠れた秩序を持つこと [16]が見出された。端状態とストリング秩序は、一見全く関係のない独立な性質であるように見えるが、ケネディと田崎は、これら 2 つが「隠れた対称性の破れ」の帰結として理解できることを示した [30]。これらの研究により、AKLT 状態を含む新しい物質相として「ハルデン相」の概念が成立した。ただし、そのより深い意味は、以下に述べるように 17 年後になってようやく解明されることになる。

なお、ハルデン相における端状態スピンは実験的に検出されており [Y2005]、また非物理的に見えるストリング秩序も最近の冷却原子系の実験で検出されている [E2011]。筆者は 1990 年の「第 35 回物性若手夏の学校」で田崎による講義 [T1992] に出席したことをきっかけに、ケネディと田崎による $S=1$ スピン鎖の「隠れた対称性」を、一般の整数スピンの拡張した。これが最初の出版論文 [O1992] になった。このとき、元のハルデン予想では全ての整数スピン鎖は等価に見えるが、隠れた対称性は奇数スピンの AKLT 状態でのみ自発的に破れており偶数スピンの場合には破れていないことも見出した。この当時はその意義がよくわからなかったのだが、17 年後にこの問題に戻ってきてポールマンらと共同で新しい視点から再び取り組むことになった。その結果、グーとウエンの提案 [54] に引き続き、(奇数スピン鎖の) ハルデン相が「対称性によって保護されたトポロジカル相 (Symmetry-Protected Topological, SPT 相)」であることを示した [45, PBTO2012]。一方、偶数スピン鎖の「ハルデン相」は本質的には自明な相であることがわかり、17 年前の疑問に一応の回答を与えることとなった。この経緯の詳細は [O2012] に記したが、今回、ノーベル財団によるノーベル物理学賞の解説資料で

[45] を引用し言及して頂いたことは大変感慨深い。SPT 相は自由電子系のトポロジカル絶縁体を相互作用する量子多体系に一般化した概念であるが、その典型例であるハルデン相自体はトポロジカル絶縁体に先んじて見出されていたことになる。SPT 相は、一般の次元での数学的な分類や、実験的な実現など、多くの側面から現在活発に研究が行われている。

なお、1 次元の AKLT 状態は、その後行列積状態 (Matrix Product State, MPS) へ一般化された [FNS1992, KSZ1993]。MPS は、量子情報理論との関係 [V2003] から、また密度行列くりこみ群を含む、1 次元量子多体系に対する強力な数値計算手法の基礎 [S2011a] としても非常に重要となっている。さらに、AKLT の論文で与えられた 2 次元の AKLT 状態を含め、MPS の拡張として様々なテンソルネットワーク状態が議論されている [O2014]。このようなテンソルネットワーク状態は高次元量子多体系に対する数値計算手法としても将来性が期待されており、また弦理論で見出されたゲージ・重力対応 (AdS/CFT 対応) を具体化するもの [S2012] としても注目されている。

ハルデン予想を支持するもう一つの理論的な証拠として、リーブ・シュルツ・マティス (Lieb-Schultz-Mattis, LSM) 定理 [LSM1961] と、そのアフレック・リーブによる一般化 [AL1984] があった。これによると、 $S=1/2$ を含む半奇数スピン鎖では並進対称性等の対称性を保つ限り、ギャップレスになるか、並進対称性が自発的に破れて基底状態が二重 (以上) に縮退するか、のどちらかになる。すなわち、単一の基底状態が励起ギャップを持つ可能性は排除される。LSM 定理は整数スピン鎖については何の制限も与えないので、ハルデン予想そのものの証明にはならない。しかし、整数スピン鎖では単一の基底状態がゼロでない励起ギャップを持つことができることになり、確かにハルデン予想と矛盾しない。このように、半奇数スピンと整数スピンの違いについて示唆的な結果が得られていた。再び筆者の個人的な話になるが、論文 [O1992] の中で部分的に磁化した AKLT 状態の一般化を構成したが、この物理的な意義もその当時は不明だった。後にポストドクとしてブリティッシュ・コロンビア大学に着任した際にアフレックにこれを説明したところ、LSM 定理との関連を指摘され、磁化を持つ状態に LSM 定理を一般化した [OYA1997]。この一般化された LSM 定理は、量子スピン系を多粒子系として捉えなおすと、粒子密度の格子との整合性を反映したものと解釈でき、フェルミ粒子系でよく知られたラッティンジャーの定理にも対応する [YOA1997]。粒子密度の整合性は次元に特に依存する概念ではないため、高次元にも拡張

参考文献

- [1] I. Affleck, T. Kennedy, E. H. Lieb, and H. Tasaki, Rigorous results on valence-bond ground states in antiferromagnets. *Phys. Rev. Lett.* **59**, 799 (1987).
- [2] I. Affleck, T. Kennedy, E. H. Lieb, and H. Tasaki, Valence bond ground states in isotropic quantum antiferromagnets, in *Condensed Matter Physics and Exactly Soluble Models*, pages 253–304, Springer (1988).
- [5] J. E. Avron, R. Seiler, and B. Simon, Homotopy and quantization in condensed matter physics. *Phys. Rev. Lett.* **51**, 51, (1983).
- [16] M. den Nijs and K. Rommelse, Preroughening transitions in crystal surfaces and valence-bond phases in quantum spin chains. *Phys. Rev. B* **40**, 4709 (1989).
- [19] E. Fradkin, *Field Theories of Condensed Matter Physics*, Addison Wesley (1991) [Second Edition: Cambridge University Press, 2013]
- [21] F.D.M. Haldane, Continuum dynamics of the 1-D Heisenberg antiferromagnet: Identification with the O(3) nonlinear sigma model. *Phys. Lett. A*, **93**, 464, (1983).
- [22] F. D. M. Haldane, Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the "Parity Anomaly". *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2015 (1988).
- [23] F.D.M. Haldane, Nonlinear Field Theory of Large-Spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the One-Dimensional Easy-Axis Néel State. *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 1153 (1983).
- [30] T. Kennedy and H. Tasaki, Hidden $Z_2 \times Z_2$ symmetry breaking in Haldane gap antiferromagnets, *Phys. Rev. B* **45**, 304 (1992).
- [33] M. Kohmoto, Topological invariant and the quantization of the Hall conductance, *Ann. Phys.* **160**, 343 (1985).
- [37] R. B. Laughlin, Quantized hall conductivity in two dimensions. *Phys. Rev. B* **23**, 5632 (1981).
- [45] F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg, and M. Oshikawa, Entanglement spectrum of a topological phase in one dimension, *Phys. Rev. B* **81**, 064439 (2010).
- [51] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, and M. den Nijs, Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 405 (1982).
- [54] Z.-C. Gu and X.-G. Wen, Tensor-entanglement-filtering renormalization approach and symmetry-protected topological order. *Phys. Rev. B* **80**, 155131 (2009).
- [A1981] A. A. Abrikosov, L. P. Gorkov, I. E. Dzyaloshinskii, A. I. Larkin, A. B. Migdal, L. P. Pitaevskii, and I. M. Khatatnikov, Vadim L'vovich Berezinskii (Obituary), *Sov. Phys. Usp.* **24**, 249 (1981).
- [A1989] 初期のレビューとして、たとえば I. Affleck, Quantum Spin Chains and the Haldane Gap. *J. Phys.: Condens. Matter*, **1**, 3047 (1989).
- [A2014] 教科書として、たとえば 安藤陽一「トポロジカル絶縁体入門」講談社 KS 物理専門書 (2014).
- [AGD1963] A. A. Abrikosov, L. P. Gorkov, and I. E. Dzyaloshinskii, *Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics*, Prentice-Hall (1963).
- [AL1984] I. Affleck and E. H. Lieb, *Lett. Math Phys.* **12**, 57 (1984).
- [B2013] 教科書として、たとえば B. A. Bernevig (with T. L. Hughes), *Topological Insulators and Topological Superconductors*, Princeton University Press (2013).
- [CN1996] M. Chang and Q. Niu, *Phys. Rev. B* **53**, 7010 (1996).
- [E2011] M. Endres, M. Cheneau, T. Fukuhara, C. Weitenberg, P. Schauss, C. Gross, L. Mazza, M.C. Banuls, L. Pollet, I. Bloch, S. Kuhr, Observation of Correlated Particle-Hole Pairs and String Order in Low-Dimensional Mott Insulators. *Science* **334**, 200 (2011).
- [FNS1992] M. Fannes, B. Nachtergaele, and R. F. Werner, Finitely correlated states on quantum spin chains, *Comm. Math. Phys.* **144**, 443 (1992).
- [GJOS2014] 冷却原子系における人工的なゲージ場のレビューとして、たとえば N. Goldman, G. Juzeliunas, P. Ohberg, I. B. Spielman, Light-induced gauge fields for ultracold atoms. *Rep. Prog. Phys.* **77**, 126401 (2014).
- [H1976] D. R. Hofstadter, Energy levels and wave functions of Bloch electrons in rational and irrational magnetic fields, *Phys. Rev. B* **14**, 2239 (1976).
- [H2004] M. B. Hastings, Lieb-Schultz-Mattis in higher dimensions. *Phys. Rev. B* **69**, 104431 (2004).
- [HOO2016] ハルデン予想は 1 次元量子スピン系の非線形シグマ模型による記述により見出されたというのが一般に知られている (出版論文からたどることのできる) 歴史だが、ハルデン本人の回想によると実際に着想に至った経緯はこれとは異なるということである。これについては、以

- [S2011a] U. Schollwöck, The density-matrix renormalization group in the age of matrix product states. *Ann. Phys.* **326**, 96 (2011).
- [S2011b] たとえば、もともとは素粒子論の研究者であった元助手・助教の佐藤昌利がトポロジカル量子物性の分野で活躍するようになるまでの経緯について：佐藤昌利「第8回物性研究所所長賞学術奨励賞所感」物性研だより **51(2)**, 19 (2011).
- [S2012] B. Swingle, Entanglement renormalization and holography. *Phys. Rev. D* **86**, 065007 (2012).
- [T1992] この夏の学校での講義に基づく講義ノートが以下に収録されており、解説として今も価値が高い：田崎晴明「講義ノート 量子スピン系の理論 Haldane Gap, Disordered Ground States, Quantum Spin Liquid and All That in Quantum Spin Systems」物性研究 **58(2)**, 121 (1992).
- [TOYNT2001] スピンのカイラル構造が有効的な強磁場を生む例として: Y. Taguchi, Y. Oohara, H. Yoshizawa, N. Nagaosa, Y. Tokura, Spin Chirality, Berry Phase, and Anomalous Hall Effect in a Frustrated Ferromagnet, *Science* **291**, 2573 (2001).
- [V1987] G. E. Volovik, Zeros in the fermion spectrum in superfluid systems as diabolical points. *JETP Lett.* **46**, 98 (1987).
- [V2003] G. Vidal, Efficient Classical Simulation of Slightly Entangled Quantum Computations. *Phys. Rev. Lett.* **91**, 147902 (2003).
- [WPVZ2015] H. Watanabe, H. C. Po, A. Vishwanath, M. P. Zaletel, Filling constraints for spin-orbit coupled insulators in symmorphic and non-symmorphic crystals, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **112**, 14551 (2015)
- [WTVS2011] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath, and S. Y. Savrasov, Topological semimetal and Fermi-arc surface states in the electronic structure of pyrochlore iridates. *Phys. Rev. B* **83**, 205101 (2011).
- [Y1998] 教科書として、たとえば 吉岡大二郎「量子ホール効果」岩波書店 新物理学選書 (1998).
- [Y2005] 初めての実験的検出ではないが、印象的な実験の例として: M. Yoshida, K. Shiraki, S. Okubo, H. Ohta, T. Ito, H. Takagi, M. Kaburagi, and Y. Ajiro, Energy Structure of a Finite Haldane Chain in $Y_2BaNi_{0.96}Mg_{0.04}O_5$ Studied by High Field Electron Spin Resonance. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 117202 (2005).
- [YLR2011] K.-Y. Yang, Y.-M. Lu, and Y. Ran, Quantum Hall effects in a Weyl semimetal: Possible application in pyrochlore iridates, *Phys. Rev. B* **84**, 075129 (2011).
- [YOA1997] M. Yamanaka, M. Oshikawa, and I. Affleck, Nonperturbative Approach to Luttinger's Theorem in One Dimension. *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1110 (1997).



物理量の期待値 $\langle O(t) \rangle$

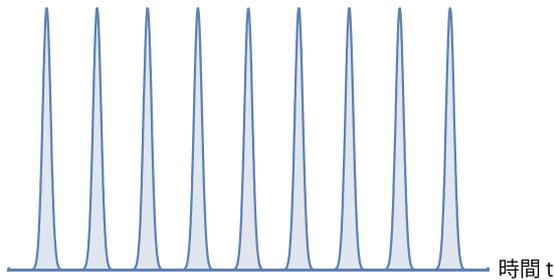


図 1: 仮に時間結晶が実現した場合に期待される振る舞い。物理量の期待値が時間的に振動する。

ウィルチェックが最初に提案した例は、超伝導体でリングを作り、その穴に磁束を通すというものでした[1]。超伝導リングに磁束を通すと、その磁束を打ち消すように基底状態・平衡状態においても超伝導電流が流れます。しかしこのままではリングの各点における電流は時間的に一定なので、時間並進対称性を破ったことになりません。ウィルチェックのアイデアは、空間的に不均一な超伝導体を使うことにありました。超伝導ギャップが空間的に変化する Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態のような超伝導体を用い、それでリングを作り磁束を導入すれば、その不均一性も超伝導電流とともにぐるぐる回ると主張したのです[図 2(a)]。その結果、リングの各点における電流密度は時間的に振動することになるはずですが。

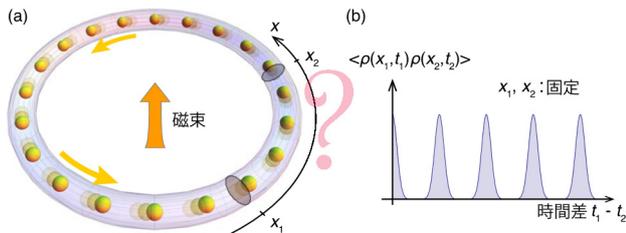


図 2: ウィルチェックが考案した時間結晶の例。(a)超伝導リングに磁束を通すと平衡状態でも超伝導電流が流れる。空間的に不均一な超伝導体を用いたとき、不均一性も超電流と一緒にクルクル回ると仮定すると、空間の各点における超電流は時間的に振動し、時間並進対称性を破る。(b)その結果、超電流の相関関数も時間差の関数として振動すると期待される。

この例は一見もっともらしく聞こえるのですが、基底状態・平衡状態において物理量が振動するという常識に反することが起こっています。そもそも量子力学によれば、ハミルトニアン固有状態は定義により位相因子を除いて時間によらず、物理量の期待値も当然振動しません。従って基底状態はもとより、固有状態での期待値をボルツマン分布に従って足しあわせた平衡状態では振動が起き得ないの

です。ウィルチェックは、多粒子系に特有の特異性によってこの困難が回避されているのだと主張しましたが、果たして本当にそのようなことが起こり得るのでしょうか。

通常の結晶の場合は、外から手で空間の並進対称性を破らなくても、系が平衡状態に達するまで待っていれば「自発的」に結晶が生じ、並進対称性を破るだろうとナイーブには期待されます。しかし現実には完全に対称性があるということではなく、元々わずかに空間の不均一があり、そこが種になって結晶が成長します。これに対応して、理論的に自発的対称性の破れを議論する際にも、わずかに対称性を破る場を外からかけておいてその外場の下で平衡状態をつくり、体積を無限大の極限を取った後に外場を切るというトリックがよく用いられます。このようにしないと、例えば絶対零度を記述する基底状態は、結晶の位置に関する重ね合わせ状態（非物理的な「シュレーディンガーの猫」状態）になり、平均密度としては原子が特定の位置に周期的に並ぶことになりません。有限温度の平衡状態を記述するボルツマン分布においても、結晶の位置についてのあらゆる状態を足しこんでしまえば、同様に原子密度の周期的な構造は互いに打ち消し合ってしまう。つまり「自発的」対称性の破れとはいうものの、それをきちんと定式化するには、まず外から対称性を破る場を予めかけた上で平衡状態を用意しておいて、その外場を切った後も対称性の破れが残るかどうかを議論するのです。

すると、時間結晶についても、通常の結晶についてのこのような標準的な定式化を適用すれば良さそうです。しかし、これはすぐに根本的な問題に直面します。時間結晶の定式化に必要な外場は、時間並進対称性を破る、すなわち時間に依存することになります。そのような外場のもとでは、「基底状態」や「平衡状態」といった概念は意味をなさなくなってしまう。この点において「時間並進対称性の自発的破れ」は、やはり他の対称性の破れとは一線を画しており、その定義から見直す必要が生じるのです。我々の研究が出るまでは、この「時間並進対称性の自発的破れ」の定義がきちとなされないうままになっていたため、果たして時間結晶は可能か不可能かという議論に決着がつかないままになっていました。

3. 長距離秩序に基づく定式化

この状況を踏まえ、私たちは、まず「長距離秩序」という観点から「自発的時間並進対称性の破れ」を数学的にきち

参考文献

- [1] F. Wilczek, *Quantum Time Crystals*, Phys. Rev. Lett. **109**, 160401 (2012).
- [2] T. Li, Z.-X. Gong, Z.-Q. Yin, H. T. Quan, X. Yin, P. Zhang, L.-M. Duan, and X. Zhang, *Space-Time Crystals of Trapped Ions*, Phys. Rev. Lett. **109**, 163001 (2012).
- [3] P. Bruno, *Comment on Quantum Time Crystals*, Phys. Rev. Lett. **110**, 118901 (2013). F. Wilczek, *Wilczek Reply*, Phys. Rev. Lett. **110**, 118902 (2013). P. Bruno, *Comment on Space-Time Crystals of Trapped Ions*, Phys. Rev. Lett. **111**, 029301 (2013). P. Bruno, *Impossibility of Spontaneously Rotating Time Crystals: A No-Go Theorem*, Phys. Rev. Lett. **111**, 070402 (2013). F. Wilczek, *Superfluidity and Space-Time Translation Symmetry Breaking*, Phys. Rev. Lett. **111**, 250402 (2013).
- [4] T. Koma, H. Tasaki, *Symmetry breaking and finite-size effects in quantum many-body systems*, J. Stat. Phys. **76**, 745 (1994).
- [5] P. Horsch and W. von der Linden, *Spin correlations and low lying excited states of the spin-1=2 Heisenberg antiferromagnet on a square lattice*, Z. Phys. B **72**, 181 (1988).
- [6] H. Watanabe and M. Oshikawa, *Absence of Quantum Time Crystals*, Phys. Rev. Lett. **114**, 251603 (2015).
- [7] D. V. Else, B. Bauer, and C. Nayak, *Floquet Time Crystals*, Phys. Rev. Lett. **117**, 090402 (2016).
N. Yao *et al.* *Discrete time crystals: rigidity, criticality, and realizations*, arXiv:1608.02589.
J. Zhang *et al.* *Observation of a Discrete Time Crystal*, arXiv:1609.08684.



持つ(現在得られる最も良い単結晶試料でも Nd/Ir 比は ~1%ずれる)。この Nd/Ir 比が~2%ずれている単結晶試料の電気抵抗の温度依存性を図 2(a)挿入図に示す。組成ずれが無い $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 粉末サンプルの相転移温度($T_N = 33$ K)と比較すると、金属・絶縁体転移はおよそ 20 K に減少しているが、それでも T_N で抵抗率はおよそ 3 桁上昇する。このため、Nd/Ir 比が~2%程度ずれているサンプルにおいても $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における金属・絶縁体転移の本質をとらえていると考え、磁気抵抗と磁化の測定を行った。

図 2(a)およびその挿入図に、定常磁場およびパルス磁場下で得られた抵抗の磁場変化および温度変化を示す。この図に見られるように、~10 T の磁場を[001]方向に印加することで金属・絶縁体転移を誘起できる。これは、電荷ギャップが 500 K 程度⁴であることを考えると、2 桁程度小さなエネルギースケールの磁場で、ギャップを消失させたことになる。図 2(b)は様々な温度や磁場下での抵抗測定から得られた、 $H//[001]$ の磁場・温度相図である。一般的な反強磁性相で見られるように、 T_N は磁場の印加により単調減少していることが確認できる。この金属・絶縁体転移の振る舞いは、磁場印加方向を[001]から[110]方向に傾けることで大きく変化する(図 2(b))。[001]方向からおよそ 15° 磁場印加方向を変化させると、3 桁程度の大きな負の磁気抵抗は消失し、 $H//[110]$ 方向ではヒステリシス現象も見られなくなる。これらのデータは、立方晶のパイロクロア化合物で異方的な磁気抵抗が存在し、 $H//[001]$ 方向のみ金属・絶縁体転移を抑制できることを示している。このような磁気抵抗の角度変化から得られた磁場・温度相図を図 2(d)に示す。 $H//[001]$ 方向では磁場印加により金属相が誘起されるが、印加磁場が[001]方向からずれると金属・絶縁体転移は起こらない。

この異方的な磁気抵抗は、磁場印加方向によって、異なる磁気構造が出現しているためと理解できる(図 1(b)-(d))。実際、我々の磁化測定から $H//[001]$, $H//[111]$, $H//[110]$ のとき飽和磁化の大きさがそれぞれ 1.4, 1.2, 1.1 μ_B/Nd となっていることが判っており、これは Nd モーメント (2.37 μ_B) が四面体の中でイジング的にふるまったときに期待できる磁化の飽和値と一致する ($H//[001]$, $H//[111]$, $H//[110]$ のとき 1.4, 1.2, 0.9 μ_B/Nd が予想される)。これから、図 1(b-d)にあるように、 $H//[001]$ では Nd モーメントが 2I2O 構造、 $H//[111]$ および $H//[110]$ では 3I1O 構造を取っていることを実験的に確認した。このような複数の磁気構造をもつ Nd の磁気モーメントと、遍歴性を持つ Ir5d 伝導電子との間に相互作用があれば、Nd モーメントの磁

気構造の変化により Ir5d 電子物性も変化が期待できる。議論の詳細は原論文に委ねるが[1]、局在した Nd のモーメントと Ir の 5d 電子間の相互作用(近藤相互作用)を取り入れることにより、 $H//[001]$ 方向ではギャップが閉じた金属状態になること、 $H//[111]$ 方向ではギャップが開いたままで絶縁体となることを理論的に示した。従って、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ で観測された磁場印加方向に敏感な磁気抵抗は磁気秩序の磁場変化が原因であると考えられる。

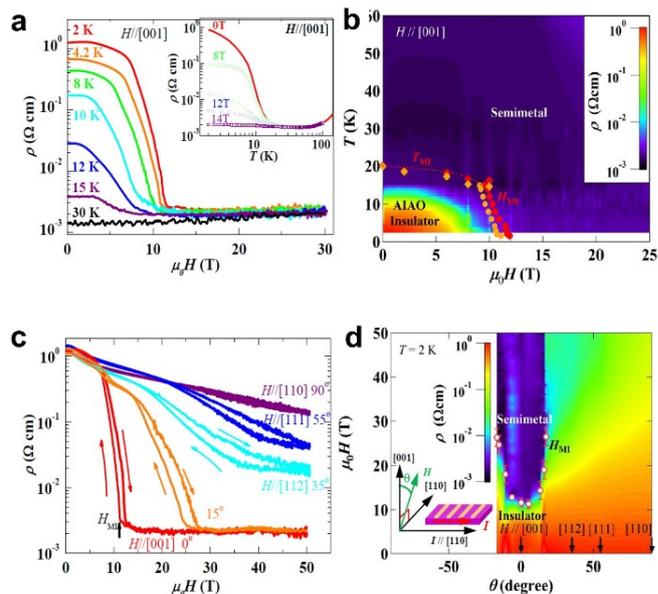


図 2 (a) $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の磁気抵抗($H//[001]$)。挿入図:抵抗の温度依存性。(b) $H//[001]$ における $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の磁場・温度相図。(c) 2 K における磁気抵抗の角度変化。(d) $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の角度・磁場相図。

まとめ

本稿で紹介した $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における異方的な金属・絶縁体転移は、特にスピン・軌道相互作用が大きな 5d 電子を持つモット絶縁体の金属・絶縁体転移を理解する上で重要と考えられる。未解決の課題は幾つかあり、例えばパイロクロア型イリジウム化合物で示唆されているワイル金属状態[4]が $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において実現しているかに興味を持たれる。これについては様々な研究が展開されているが、例えば極限コヒーレント光科学研究センターでは、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ と類似の電子状態を持つ $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において、放物線上の分散を持つバンドがフェルミ準位において接している四準縮退点(フェルミノード)を観測している[6]。さらに最近では、このフェルミノードが $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の常磁性金属状態においても確認された[7]。このフェルミノード状態で AIAO 秩序を示すと、理論的にはワイル半金属状態となることが予想されており[5]、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の低磁場相はワイル

強相関半金属で直接観測するフェルミノード状態

近藤 猛、中辻 知、辛 埴

概要:

これまでの物性研究の主な舞台は、電子相関とスピン軌道相互作用のどちらか一方を有する物質にあった。強い電子相関と強いスピン軌道相互作用の両者を兼ね備えた電子系は未開拓であり、新奇なトポロジカル量子相が理論予想されることから、次なるフロンティアとして注目されている。その候補物質として、 $5d$ 軌道を有する遷移金属イリジウム酸化物が期待されている[1-5]。 $3d, 4d, 5d$ へと電子軌道が広がると電子相関は弱くなるが、一方で、原子量の増大によりスピン軌道相互作用が強くなる。電子相関とスピン軌道相互作用の両者が同程度のエネルギースケールを持って競合するイリジウム酸化物 $5d$ 電子系は、今大変注目される新しい研究分野である。本研究では、角度分解光電子分光を用いた電子構造の直接観察から、パイロクロア型イリジウム酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ が、立方結晶対称性と時間反転対称性に守られて実現するフェルミノード状態を有することを見出した。2 次曲線的分散を持つ価電子バンドと伝導バンドがフェルミ準位上一点で接する 4 重縮退点を持つフェルミノード状態が強相関電子系で成り立つ $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ では非フェルミ液体状態が期待される。本研究の結果から、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は、トポロジカル絶縁体が初めて確認された物質として知られる HgTe の強相関バージョンであり、新奇な強相関トポロジカル量子相(トポロジカル Mott 絶縁体、ワイル半金属、量子スピン及び異常ホール効果)を発現しうる母体物質だと言える。

研究結果:

トポロジカル絶縁体の発見[1-4]に続く次なる物質科学のフロンティアが、スピン軌道相互作用と強相関が共に重要となる物質群に対し期待されている[5-11]。その中でも特に、 $5d$ 遷移金属の一種で立方晶構造を持つパイロクロア型イリジウム酸化物($\text{A}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$)は[12,13]、トポロジカル絶縁体の発現に不可欠であるバンド反転と $5d$ 軌道由来の強相関を併せ持つとの理論予想で注目を集めている[8,11]。この一連物質が描く電子相図において、 A サイトのイオン半径が最大となる $A=\text{Pr}$ と Nd の間で強相関由来の反強磁性量子臨界点の存在が示唆されており、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ はそれへ

の漸近状態にあると考えられる[13,14]。 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の特徴として、上記するパイロクロア型イリジウム酸化物の中で唯一、常磁性と遍歴性を最低温まで保持する。また、Bad metal 的振る舞いと非自明な自発的ホール伝導を示すことから、強相関電子系だと示唆される[6,14,15]。熱力学的測定による最近の研究から、ゼロ磁場下で量子臨界状態が示された点でも $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は注目されている[16]。

図 1 に示す理論計算から[10]、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は Γ 点において、2 次曲線的分散を持つ伝導バンドと価電子バンドがフェルミ準位一点で接して 4 重縮退するフェルミノードを持つことが予想される[17]。このノード状態は、対称性と群論からの要請で形成されるが、縮退点がフェルミ準位に位置するか否かは推測の範疇を超えないため、実験的実証が必要である。トポロジカル絶縁体を初めて実証したことで知られる HgTe は[18,19]、数学的にこれと同様のフェルミノード状態を実現する。もし理論予想が正しければ、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ はその強相関バージョンであり、様々なトポロジカル量子相へ遷移可能となる(図 1 参照)。フェルミノード半金属では、長距離クーロン相互作用による変調を強く受けるため、非フェルミ液体状態が期待されている。もしフェルミノード状態が実証されれば、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は強相関トポロジカル量子相と非フェルミ液体を発現しうる母物質だと言える。

角度分解光電子分光は物質の電子構造を直接観察できる強力な実験手法である。一つのフォトンエネルギーで励起される光電子の面直方向の波数 k_z は一つの値に対応するため、固定した入射フォトンエネルギーを用いて観測されるブリルアンゾーンは、ある k_z で切り取られる k_x - k_y 面に制限される[図 2(a)]。よって、3D ブリルアンゾーン全域を観察するためには、フォトンエネルギーを走査する必要がある。フェルミノードを同定するため我々は、様々なフォトンエネルギーで ARPES スペクトルを測定した。光は劈開面である(111)面に照射して測定したため、フォトンエネルギーを変えつつ観測される運動量カットは、 Γ , L , K 点を横切る面内で[111]方向に移動する。最も重要な結果として我々は、放物的なバンド分散が入射フォトンエネルギーの増大と共にフェルミ準位へ近づき、さらにはフェルミ準位に接する振る舞いを観察した[図 2(d)]。フォトン



- [9] W. W.-Krempa, G. Chen, Y. -B. Kim and L. Balents, *Annual Review of Condensed Matter Physics* **5**, 57 (2014).
- [10] E.-G. Moon, C. Xu, Y. B. Kim and L. Balents, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 206401 (2013).
- [11] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath and S. Y. Savrasov, *Phys. Rev. B* **83**, 205101 (2011).
- [12] D. Yanagishima and Y. Maeno, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, 2880 (2001).
- [13] K. Matsuhira et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 043706 (2007).
- [14] S. Nakatsuji et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 087204 (2006).
- [15] Y. Machida et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 057203 (2007).
- [16] Y. Tokiwa, J. J. Ishikawa, S. Nakatsuji and P. Gegenwart, *Nature Mat.* **13**, 356 (2014).
- [17] K. Sun, H. Yao, E. Fradkin and S. A. Kivelson, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 046811 (2009).
- [18] B. A. Bernevig, T. L. Hughes and S.-C. Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006).
- [19] C. Brüne et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 126803 (2011).
- [20] T. Kondo et al., *Nature communications* **6**, 10042 (2015).



実験結果

我々のグループは、反転対称性の破れた2次元超伝導体の性質を調べるために原子膜材料である二硫化モリブデン (MoS_2) の高品質な単結晶を用いて、EDLT 構造(図1)を作製した。 MoS_2 は遷移金属ダイカルコゲナイドの一種でスコッチテープ法により原子層レベルまで劈開でき、輸送特性だけでなく、光学特性やバレー自由度、スピン軌道相互作用の観点から精力的に研究が進められている。EDLT との組み合わせで MoS_2 の表面に極めて不純物の少なく高濃度の2次元電子ガスを誘起できる。その厚さは、第1原理計算に基づく Poisson-Schrödinger 方程式(電場による閉じ込めポテンシャルの空間分布から電荷密度の空間分布を求める Schrödinger 方程式と、逆に電子密度分布からポテンシャル分布を求める Poisson 方程式を組み合わせた自己無撞着方程式)から、超伝導が実現できるキャリア密度では、単層レベル(0.6 nm 程度)と見積もられている[11]。 MoS_2 の単層構造では、Mo と S の非等価性及び3回対称の構造から面内の反転対称性が破れている。また、 MoS_2 をはじめとする遷移金属ダイカルコゲナイド物質は、スピン-軌道相互作用が強いということが知られている。こうした面内の反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用は、運動量空間での K 点で面直方向の有効磁場によりスピン分極を引き起こす。我々はこのスピン軌道相互作用を Zeeman 型スピン軌道相互作用と呼んでいる(Ising 型スピン軌道相互作用とも呼ばれている)。さらに、K 点と-K 点は時間反転で結ばれているのでそこでの有効磁場は逆向きでなければならない。このようなスピンとバレーが結合してスピンを固定している状況 spin-valley locking は、理論的[12]にも実験的[13]にも既に証明されており、TMD 特有の物性を理解する上での重要なファクターとなっている。

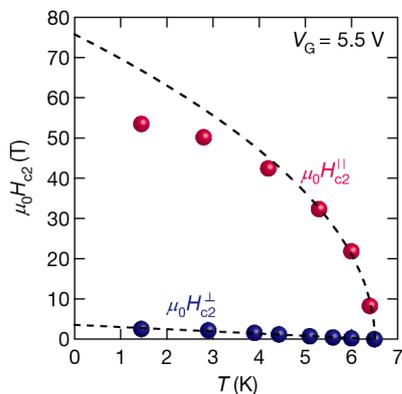


図1 上部臨界磁場の温度依存性。丸(赤:面内方向、青:面直方向)は実験データ、点線は2次元のギンツブルク・ランダウモデルによるフィッティング線。参考文献[13]から転載。

こうした特殊なスピン分極を有する MoS_2 単層超伝導の性質を調べるために東京大学物性研究所 国際超強磁場科学研究所のパルスマグネットと回転機構付き抵抗測定プローブを用いて、上部臨界磁場の詳細な測定を行った。測定で得られた、 MoS_2 の零磁場での $T_c = 6.7$ K、電子面密度 $8.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ における電界誘起超伝導の磁場-温度相図を示す。 H_{c2} は電気抵抗が常伝導抵抗の75%まで減少した時点での磁場として定義されたものである。このデータの意外な点は、低温(1.5 K)における面内の上部臨界磁場 H_{c2}^{\parallel} が 52 T と極めて大きな値であるという点である。上部臨界磁場は一般に軌道限界とパウリ限界のどちらか低い方の値で決まる。実際、軌道限界を示すギンツブルク・ランダウの式でフィットすると T_c 近傍ではよく合うが、低温では明確な乖離が見られる。そのため我々は低温ではパウリ限界で上部臨界磁場が決まっていると考えた。ところが弱結合 BCS 理論の枠組みでのパウリ限界は T_c の 1.86 倍(単位はテスラ)になるので今の場合、 $T_c = 6.7$ K に対して 12.5 T と予想される。観測された 52 T はその4倍強になるので、パウリ限界がかなり増強されたことを示唆している[13]。

このパウリ限界の増強を理解するために、運動量空間での詳細な電子状態を知る必要がある。電場下での第1原理計算によるとこの実験におけるキャリア面密度($8.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)では、フェルミエネルギーが約 150 meV、フェルミエネルギーでのスピン分裂は約 13 meV 程度であり、約 100 T の面直方向の有効磁場の存在を意味している。フェルミ面のクーパ対は、重心運動量をゼロにしてエネルギーを最小化するように、K と -K で逆向きのスピン1重項がバレー間において組まれる。すなわち、この K と -K で組まれたクーパ対は実効的に 100 T に及ぶ面直の内部磁場によって強固に保護されていると考えることができる。この時のフェルミ面のスピン分極の模式図が図2である。スピン分極によって、K 点は下向きに、K' 点は上向きにスピン分極している。このスピン分極方向に垂直な面内磁場を印加した際に軌道運動の寄与が無視でき、 H_{c2}^{\parallel} がパウリ限界によってのみ決定されるとすると、内部磁場に匹敵する程度の強磁場を印加しないと超伝導は破壊できない。これが、本研究での MoS_2 電界誘起超伝導におけるパウリ限界の増強の物理的説明である。実際、第1原理計算によるバンド構造を強束縛近似でモデル化し、それをもとに BCS 理論のギャップ方程式によって H_{c2}^{\parallel} の温度依存性を計算すると、実験結果とコンシステントな結果が得られており、上記の解釈をより一層裏付けている[13]。同時期に

質量ゼロのディラック電子の流れを制御できる 新しい磁石を発見

¹大阪大学大学院理学研究科、²東京大学大学院工学系研究科、³国際超強磁場科学研究施設
酒井 英明^{1,2}、増田 英俊²、徳永 将史³、石渡 晋太郎²

研究の背景

通常の金属や半導体中の電子状態は、有効質量を持つ荷電粒子としてシュレディンガー方程式により良く記述できる。一方、結晶構造の対称性や電子の波動関数のトポロジーに起因して、電子状態が相対論的ディラック方程式で記述できる物質が、近年大きな注目を集めている。この最も有名な例の一つが、ノボセロフとガイムらにより発見された黒鉛の単一原子層であるグラフェンである。グラフェンの蜂の巣状の結晶格子を反映し、電子の固有エネルギーが波数に比例する分散関係が成り立つため、質量ゼロの二次元ディラック電子状態を固体中で実現できることが明らかとなった。この発見を契機に、ディラック電子系物質は基礎・応用の両面から精力的に研究がなされ、最近ではトポロジカル絶縁体の表面ディラック状態や、グラフェンの三次元版とされるディラック・ワイル半金属など、続々と新しい系が開拓されている。

ディラック電子の最大の特徴は、非常に高い移動度と、それに起因する特異な磁気伝導特性である。例えばグラフェンでは、ディラック点におけるベリー位相に由来する半整数量子ホール効果が生じ、さらに強磁場中ではそれが室温でも観測され得る。もしこれらの優れた量子伝導が、外部磁場に加え固体中のスピンの制御可能となれば、新しいスピントロニクス応用も期待でき、その物理や応用用途を著しく拡張できる。実際、最近では磁性トポロジカル絶縁体の表面状態において、ゼロ磁場においても量子ホール効果（量子異常ホール効果）が観測され[1]、超低消費電力エレクトロニクスへの展開も期待されている。しかし、このような磁性ディラック電子系のバラエティーは未だ非常に限られている。そこで我々のグループではさらなる開拓を目指し、より多彩な磁気秩序を実現できるバルク磁性体を対象に新物質開発を進めきた。本稿では、近年、この過程でモデル物質として見出した層状反強磁性体 EuMnBi_2 を取り上げ、磁気秩序を利用したディラック電子の量子伝導制御について紹介する[2]。

実験結果

EuMnBi_2 の結晶構造は図 1(a)にあるように、 Mn^{2+} の周りに形式価数-3 価の Bi が四面体配位したモット絶縁体層と、形式価数-1 価の Bi 正方格子からなるディラック電子伝導層が、Eu 磁性層（形式価数 2 価の場合、スピン=7/2）を挟んで積層した構造である。Eu イオンの配位により、Bi 正方格子では最外殻の $6p_x, 6p_y$ 軌道が二次元的ディラック電子状態を形成することが理論的に予測されており[3]、最近実験的にも実証されている[4]。このような多層ディラック電子系では、絶縁層と伝導層が空間的に分離しているため、前者を化学修飾することによりディラック電子状態を保ったまま、物性パラメータや新たな機能の付与が可能となる。実際に EuMnBi_2 も、先行して報告されていた同構造の SrMnBi_2 をベースとし、元素置換 Sr^{2+} (非磁性) $\rightarrow \text{Eu}^{2+}$ (スピン=7/2) により磁氣的応答性の大幅な増大をねらい、見いだされた物質である[5-8]。

$\text{SrMnBi}_2, \text{EuMnBi}_2$ の両物質とも、室温近傍で Mn 副格子が反強磁性秩序を示すが、電気伝導には大きな影響を与えることはない。ところが、ディラック電子層に隣接する Eu 層は、より低温の $T_N=22 \text{ K}$ で反強磁性秩序を示すにも関わらず、ディラック電子の伝導に大きく作用する。磁気構造の詳細は参考文献[2]に譲るが、共鳴 X 線散乱実験により、Eu スピンは面内で強磁性的であり、Bi 正方格子層の上下で向きが反転する反強磁性的秩序[図 1(a)]を示すと推定されている。このような積層構造は、さながら多層ディラック電子系にスピンバルブ構造が天然に埋め込まれた構造と見なすことができる。実際に Eu 層の磁気秩序に伴い、面内抵抗は減少し、面間抵抗が大きく増加する振舞いが観測されており、ディラック電子の伝導が磁気秩序と強く相関していることが明らかとなった。

さらに興味深い点は、c 軸方向の外部磁場により Eu スピンの向きを面直から面内方向へフロップさせると[図 1(b)]、層間抵抗率 ρ_{zz} が約 10 倍増加する点である。図 1(c)に、国際超強磁場科学研究施設のパルス磁場を用いて測定した、代表的な温度点における ρ_{zz} の磁場依存性（約 45 T まで）を示す。最低温（1.4 K）では、 H_f 以上での ρ_{zz} の

ジャンプに伴い、巨大なシュブニコフ・ドハース(SdH)振動が観測され、その振幅は磁場と共に増大する。さらに $N=1$ 番目のランダウ準位に対応する ρ_{zz} の極小を超えた約 20 T 付近で、大きなヒステリシスを伴った鋭い抵抗ピーク(スパイク)が現れ、 H_c を超えると強制強磁性相へ転移し、 ρ_{zz} の値は急激に減少する。このため、スピントロップ相のみで ρ_{zz} が高い状態が実現している。20 T でのヒステリシスをもつ抵抗異常は ρ_{xx} でも見られるが[図 1(d)], 磁化曲線では対応する異常が見られないことから、Eu 副格子の磁気転移ではなく、伝導を担うディラック電子に起因していると考えられる。現状では未解明であるが、後述するようにスピン(またはバレー)偏極したランダウ準位間の交差と関連している可能性もある。

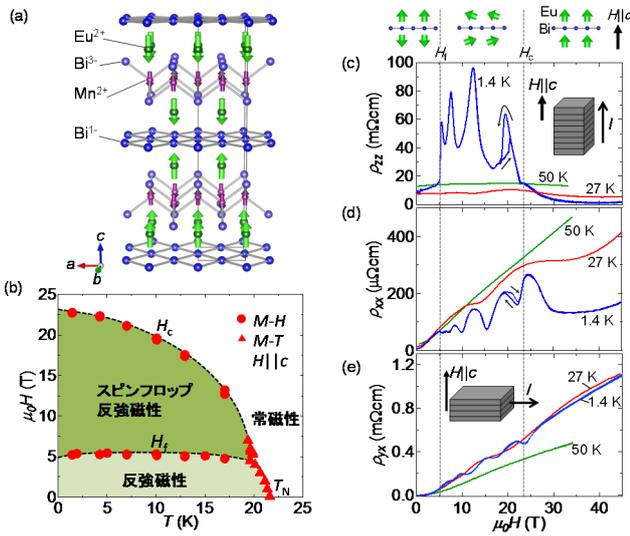


図 1: (a) EuMnBi_2 の結晶構造 ($I4/mmm$) と磁気構造の模式図。各サイトの元素名と形式価数を表示している。Eu 副格子の磁気秩序パターンは共鳴 X 線散乱実験から決定した[2]。また Mn 副格子の磁気秩序は SrMnBi_2 と同様としている[10]。 (b) Eu 副格子の磁気相図。磁場は c 軸方向に印加。 EuMnBi_2 の (c) 面間抵抗率 ρ_{zz} , (d) 面内抵抗率 ρ_{xx} , (e) ホール抵抗率 ρ_{yx} の約 45 T までの磁場依存性。垂直方向の点線は 1.4 K における反強磁性相とスピントロップ反強磁性相の相境界 H_f , スピントロップ反強磁性相と常磁性相の相境界 H_c を示す。図中には各測定における電流と磁場の方向を模式的に示す。また最上には各相における Eu 副格子の磁気構造を示す。

一方、27, 50 K の常磁性相では、 ρ_{zz} は磁場に対しほぼ一定であり、磁気抵抗効果や抵抗異常は見られないが、27 K の高磁場領域では明瞭な量子振動が観測できる。図 1(d) と (e) はそれぞれ、面内抵抗率 ρ_{xx} とホール抵抗率 ρ_{yx} の磁場依存性である。50 K での ρ_{xx} は、ディラック電子系に特有の、高磁場でも飽和しない磁場に比例する大きな正の磁気抵抗

効果を示す。(磁気抵抗効果のサイズは、35 T で約 2000% 程度に達する。) 温度を低下させると SdH 振動成分が発達し、特に最低温 1.4 K のスピントロップ相では ρ_{xx} に深い極小が現れる。ホール抵抗率 ρ_{yx} でも同様に、スピントロップ相で振動成分が著しく増大し、1.4 K ではプラトー構造が形成される。これらの特徴は、Bi 正方格子層のディラック電子状態による多層量子ホール効果を強く示唆しているため、以下ではこの観点から詳しく解析を進める。

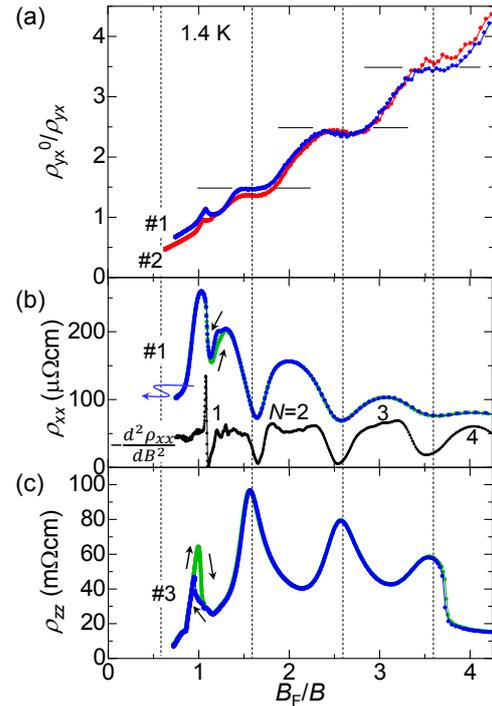


図 2: EuMnBi_2 の (a) ホール抵抗率の逆数 ($1/\rho_{yx}$ はプラトーのステップ幅)、(b) 面内抵抗率 ρ_{xx} , および (c) 面間抵抗率 ρ_{zz} (1.4 K)。横軸は規格化した充填率 (B_F は SdH 振動の周波数、 B は磁束密度 $B = \mu_0(H+M)$)。#1, #2 は厚みの異なる試料を表す。図中の矢印は、ヒステリシスにおける磁場掃引方向を示す。(b) には ρ_{xx} の B による二回微分をプロットしており、 $N=3$ 以下でランダウ準位が分裂している。

図 2(a) は ρ_{yx} の逆数、図 2(b) と (c) は各々 ρ_{xx} と ρ_{zz} をプロットしている。横軸は B_F/B であり、スピン縮退度を規格化した充填率に対応する (ここで B は磁束密度、 B_F は SdH 周波数)。 ρ_{yx} は逆数でも明瞭なプラトー構造を有し、各々のプラトー位置に ρ_{xx} の深い極小と ρ_{zz} の鋭いピークが対応するため、従来の半導体超格子などにおける多層量子ホール効果と酷似している。尚、この振る舞いは、厚みが 60% 程度異なる試料 (#1, #2) でもよく再現しており、表面状態などではなくバルクの性質に起因していることがわかる。さらにこのホール抵抗の量子化が、質量ゼロのディラック電子に起因することを裏付ける重要な特徴が二つある。一つ目は、

$1/\rho_{yx}$ プラトーのステップ幅で $1/\rho_{yx}$ をスケールすると、通常の系ではプラトーの値が整数になるが、本系ではほぼ半整数値 (1.5, 2.5, 3.5,...) に量子化すること [図 2(a)中の水平方向の実線参照]。二つ目は、 $1/\rho_{yx}$ プラトーに対応する B_F/B の値もほぼ半整数値となることである (図 2 中の垂直方向の点線参照)。このような、従来の量子ホール効果とは $1/2$ だけずれた量子化は、グラフェンでも同様に実現しており、バンド構造のディラック特異点における π ベリー位相を反映したものと考えられる。従って、本物質ではディラック電子状態が保持されたまま、局在スピント強相関状態を形成していることを示す強い証拠である。

今後の展開

本稿では、新しい多層ディラック電子系磁性体 EuMnBi_2 における磁気秩序と強くカップルしたディラック電子の量子輸送現象を紹介した。 Bi 正方格子層におけるディラック電子が、天然のスピバルブ構造を形成した Eu 磁性層のスピフロップにより、二次元的に強く閉じ込められることが本現象の肝であるが、そのメカニズムは十分な理解に至っていない。これには、 Eu スピフロップに伴う Mn 副格子の反強磁性秩序の変化や、電子軌道の重なりの変調などの微視的起源の特定が必須であり、ハイブリッド磁性層における新しいタイプの磁気抵抗効果を解明していきたい。また、ディラック電子の多層量子ホール効果においても、前述のヒステリシスを伴う抵抗異常やランダウ準位サブバンドの分裂 (図 2b 参照) 等、興味深い現象が観測されている。 Bi における強いスピン-軌道相互作用や大きな g 因子、電子間相互作用などが関連していると予想され、その起源解明は今後の課題である。さらに近年は、極限コヒーレント光科学研究センターの協力のもと、 SrMnBi_2 においてポンプ・プローブ型の時間分解光電子分光を行い、バルクのディラック電子系における超高速ダイナミクス解明にも取り組んでいる [9]。超短パルスレーザー媒質などとしての新たなポテンシャルの発掘や、強光子場との結合現象の新規開拓も重要なテーマである。

謝辞

本研究は、東京大学物性研究所の三宅厚志氏、秋葉和人氏、石田行章氏、辛埴氏、東京大学・理化学研究所の山崎裕一氏、有馬孝尚氏、十倉好紀氏、高エネルギー加速器研究機構の中尾裕則氏、村上洋一氏、東北大学金属材料研究所の塚崎敦氏、塩貝純一氏、中村慎太郎氏、淡路智氏、の協力のもと行われた。また、東京大学物性研究所の長田俊

人氏には多くの有益な議論をして頂いた。この場を借りてお礼を申し上げる。

参考文献

- [1] C-Z. Chang *et al.*, *Science* **340**, 167 (2013).
- [2] H. Masuda *et al.*, *Sci. Adv.* **2**, e1501117 (2016).
- [3] G. Lee *et al.*, *Phys. Rev. B* **87**, 245104 (2014).
- [4] S. Borisenko *et al.* arXiv 1507.04847 (2015).
- [5] J. Park *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 126402 (2011).
- [6] J. K. Wang *et al.*, *Phys. Rev. B* **84**, 064428 (2011).
- [7] K. Wang *et al.*, *Phys. Rev. B* **84**, 220401(R) (2011).
- [8] A. F. May *et al.*, *Phys. Rev. B* **90**, 075109 (2014).
- [9] Y. Ishida *et al.*, *PRB* **93**, 100302(R) (2016).
- [10] Y. F. Guo *et al.*, *Phys. Rev. B* **90**, 075120 (2014).



して勤務したピッツバーク大学化学科では、故 John. T. Yates, Jr. 先生に、表面キネティクスの考え方、精緻な測定と定量的解析の重要性を叩き込まれました。前任地の理化学研究所では、青野正和先生（現、物質材料研究機構）の研究室で初めて STM を操作し、原子スケールで表面の実空間像が観測できることに感動いたしました。それ以来、STM は表面分光法と並んで最も重要な実験手法の一つです。さらに、川合真紀先生（現、分子科学研究所 所長）の研究室では、実験装置の構築、実験データの解析と深い解釈、プロポーザルの書き方など、独立した研究者になるための素地を作っていただきました。恩師の先生方に感謝いたします。

この 10 月から物性研には部門横断型のグループができ、私の研究室は機能物性研究グループに属することになります（ナノスケール物性研究部門を兼務）。退職まで約 10 年ありますので、今後は新しい分野にも挑戦していきたいと、秘策を練っているところです。これからも、皆様のご指導ご鞭撻をよろしくお願いいたします。



Fig. 2 第20回日本表面科学会学会賞の楯

文献

[1] Jun Yoshinobu; "Physical properties and chemical reactivity of the buckled dimer on Si(100)" Prog. Surf. Sci. **77**(2004)37.
 [2] Masashi Nagao, Hirobumi Umeyama, Kozo Mukai, Yoshiyuki Yamashita, Jun Yoshinobu, K. Akagi and S. Tsuneyuki, "Precursor mediated cycloaddition reaction of ethylene to the Si(100)c(4x2) surface", J. Am. Chem. Soc. **126**(2004)9922.

[3] Kazuhiro Oguchi, Masashi Nagao, Hirobumi Umeyama, Tetsuo Katayama, Yoshiyuki Yamashita, Kozo Mukai, Jun Yoshinobu, Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki, "Regioselective cycloaddition reaction of alkene molecules to the asymmetric dimer on Si(100)c(4x2)", J. Am. Chem. Soc. **129**(2007)1242.
 [4] 吉信淳「シリコン表面の有機分子吸着-反応, 構造そして物性へ」固体物理**39**(2004)631.
 [5] 赤木和人、常行真司、吉信淳「シリコン表面における環化付加反応」表面, **47**(2008)348.
 [6] Kazuto Akagi and Jun Yoshinobu, "The chemistry of simple alkene molecules on Si(100)c(4x2): the mechanism of cycloaddition and their selectivities" Surface Science **652**(2016)304.
 [7] Takanori Koitaya, Atsushi Beniya, Kozo Mukai, Shinya Yoshimoto, and Jun Yoshinobu, "Low-temperature observation of the softened C-H stretching vibrations of cyclohexane on Rh(111)", Phys. Rev. B **80**(2009)193409.
 [8] Takanori Koitaya, Kozo Mukai, Shinya Yoshimoto, and Jun Yoshinobu, "Two-dimensional superstructures and softened C-H stretching vibrations of cyclohexane on Rh(111): Effects of preadsorbed hydrogen", J. Chem. Phys. **135**(2011)234704.
 [9] Takanori Koitaya, S. Shimizu, Kozo Mukai, Shinya Yoshimoto, and Jun Yoshinobu, "Kinetic and geometric isotope effects originating from different potential energy surfaces: cyclohexane on Rh(111)", J. Chem. Phys. **136**(2012)214705.
 [10] Takanori Koitaya, Kozo Mukai, Shinya Yoshimoto, and Jun Yoshinobu, "Energy level alignment of cyclohexane on Rh(111): the importance of interfacial dipole and final-state screening"; J. Chem. Phys. **138**(2013)044702.
 [11] 小坂谷貴典, 吉信淳「Rh(111)に吸着したシクロヘキサンにおける速度論的および幾何学的同位体効果」表面科学 **34**(2013)437.
 [12] Takanori Koitaya and Jun Yoshinobu, "The Quantum Nature of CH...Metal Interaction: Vibrational Spectra and Kinetic and Geometric Isotope Effects of Adsorbed Cyclohexane" The Chemical Record **14**(2014)848.

最後に、受賞研究の遂行にあたり、ご協力いただきました森 初果教授、上田 顕助教に深く感謝申し上げます。また、薄膜 X 線回折測定でお世話になりました物質設計評価施設 X 線測定室の矢島 健助教に厚くお礼申し上げます。

- [1] H. Akamatu *et al.*, *Nature* **1954**, 173, 168.
- [2] T. Isono *et al.*, *Nat. Commun.* **2013**, 4, 1344.
- [3] A. Ueda *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, 136, 12184.
- [4] H. Ebata *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, 129, 15732.



物性研を離れて

末元 徹

この3月に物性研究所を定年退職し、豊田理化学研究所に移籍してからそろそろ半年になろうとしています。名古屋生活にもようやくなじみ、日々実験室の立ち上げに勤しんでいるところです。まだ物性研を離れた視点から客観的に眺めるといふ段階に至っておりませんが、せっかくの機会ですので、40年におよぶ研究生活を振り返りつつ、心に行きかうことをざっくばらんに書かせていただきます。

退職記念講演でも申し上げたとおり、私が大学に入った年は大学紛争の真っ只中で、入試中止という空前絶後の事件が起こり、思いがけず京都大学理学部に入学することになりました。そして当時中井祥夫先生が主宰されていた「光物性研究室」で、光物性という分野に出会うことができました。今思い返しますと、この変則的なスタートが幸運の始まりだったような気がしなくてもありません。当時光物性の世界を牽引されていた豊沢豊先生（物性研）が京大で行なった講演に感銘を受け、大学院はシンクロトロン放射による光物性を志して物性研に入りましたが、本格的な利用にはやや時期尚早の感がありました。その後何回か参入のチャンスもあったのですが、結果的にはレーザーの人間になってしまいました。5年間の大学院生活の後、2年近くのオーバードクターを経て就職したのは東北大学科学計測研究所（現多元研）で、そこで2年弱のドイツ留学をはさんで足掛け9年間を過ごしました。これも全く偶然の所作ですが、縁あって平成元年に極限レーザーグループの助教授として物性研に戻って来ることになりました。柏移転の前後には転出を考えた時期もありましたが、新キャンパスで実現した素晴らしい研究環境に強く引かれ、結局定年までお世話になることになりました。大学院時代から勘定すると、合計34年の長きに亘り物性研で研究をさせていただいたこととなります。

学問に取り組む姿勢というか価値観の点では、学部時代を過ごした京大の影響を非常に強く受けたように思います。人脈と言う点でも京大在籍経験は大変有効で、物性研で最初の助手を務めた田中耕一郎氏（現京大教授）、最後に雇った特任助教渡邊浩氏（現阪大助教）はいずれも京大光物性研究室出身ですし、当研究室における博士号取得者のうち5名は京大出身者でした。

多くの研究者に共通のことと思いますが、私の場合も研究スタイルや実験技術の基本は大学院時代の経験に負うところが大きく、神前先生（格子欠陥部門、初代軌道放射物性研究施設長）の研究室において身につけました。学生数が少なかった当時は院生も職員と同等に近い扱いで、共同利用のお世話も随分させられました。おかげで他大学の研究者とも顔なじみになり、今に至るまでお付き合いの続けている方もあります。私自身の研究テーマは、「固体希ガスにおける自己束縛励起子」で、放射光施設を使っていたわけではありませんが、当時田無にあったSOR施設の利用者との交流もありました。また、外研制度を通じて東京理科大とのつながり、当時の神前研助手の出身地であった東北大学の人たちとの付き合いもあって、後々いろいろな場面で助けになりました。

助手として就職した東北大では、高融点酸化物や超イオン伝導体の光散乱という、それまでとかなり毛色の異なったテーマを担当し、GHz以下の高分解能分光を手がけましたが、これはこれで楽しむことができました。

物性研に戻ってからは、それまでの高分解能分光とは真逆の超高速分光を研究室の柱とすることになりました。四十の手習いでレーザーの素人にこんなことができたのは、極限レーザーの3研究室（松岡、黒田、渡部所員）に蓄積されていた知識やノウハウのおかげです。非線形光学、量子光学の知識も、松岡研（当時の部門主任）と合同で学生さんと一緒にやった勉強会や、部門セミナーで身につけることができました。矢島先生が残されたモード同期色素レーザーとの格闘から始まった超高速分光の研究室の立ち上げですが、その時期がたまたまチタンサファイアレーザー技術の勃興期に当たったため、早々に新しい技術に乗り換え、この強力で安定な光源の恩恵を定年まで享受することができました。

柏移転後に萩行先生のところから来てくれた中嶋誠助教（現阪大准教授）が立ち上げたテラヘルツ（THz）分光は、光誘起相転移を誘起または実時間プローブするという発想で導入したのですが、途中からTHz波の磁場成分によるスピン制御という思いがけない方向に展開し、定年まで成果を上げることができました。

研究室のもう一つの柱であった超高速発光分光でも、最後に LASOR（先端分光部門と軌道放射物性研究施設が合併して 2012 年に発足）のメンバーと協力できたのは楽しい経験でした。発光現象がほとんど調べられていなかったグラフィイトで、発光と光電子の結果をつき合わせて議論した論文は、辛研の時間分解光電子分光グループとの共同作業でした。また松田研や黒田氏（現近藤研）の協力で、発光が見えるとは誰も期待していなかったトポジカル絶縁体で、超高速発光を見つけることができました。ほとんど執念だけで進めて来た超高速発光の実験ですが、豊田理研に移ってからの目標は、これを小型化パッケージ化して誰でも使える手法に仕上げて普及を図ることです。これに関しては、小林研の短パルスファイバーレーザーの技術を活用することになっており、これからも外来研究員としてお世話になる予定です。光というキーワードを通じてウイークアップリングを持ちながら研究を進めていける LASOR の環境は素晴らしいものであったと思います。

所内に相手がいなければ外部との協力関係を結ばよいたとは言ふものの、実験のノウハウまで踏み込んだ関係は結びにくく、限界があります。その点、ある特定分野に機動的に人を集めることができる物性研は、国内の教育機関の中では得がたい組織と思います。必ずしも物性研の構成員全員が組み込まれる必要はないのですが、ある程度のマスを持つことで力を発揮できる研究分野を柱に立てることで、物性研のメリットを最大限に生かすことができるのではないかと思います。

更に言えば、物性研をモデルにして設立されたと言われるマックスプランク固体研究所（Stuttgart）での経験から感じるがあります。私が所属していたのは、半導体光物性の大御所 M. Cardona 先生の研究室で、分光測定が主体でしたが、すぐ下のフロアには、MBE による人工超格子技術開拓の第一人者 K. Ploog 氏がおり、密接な関係を結んでいました。さらに、H. Bilz や P. Fulde、N. E. Chrintensen、K. P. Zeyer など強力な理論家群を擁しており、面白い実験結果が出ると、ちょっと計算してみようかという話になったり、理論の提案を実験で試してみようかという話が、毎日昼食後にあったコーヒータイム（ほとんどは四方山話の会）などに進んでいたようです。このように、物質、測定、理論の三者が離合集散しながら共著論文を出していくという体制はとても新鮮でした。物性研もこう言う感じにならないかと期待していたのですが、これについてはまだ道半ばのように感じられます。

かつて物性研を外から 9 年間眺め、現在また外から眺める立場になっていますが、どこへ行っても物性研に在学、在籍、または利用したという研究者が多いことには驚かされます。人材の育成と人事交流を通じてコミュニティの循環器系という重要な役割を果たしてきたことは間違いありませんし、私自身もその流れに乗って恩恵にあずかったと思います。

物性研が日本における物質科学の新しい潮流を築くべく、勇気をもって大胆な飛躍をされることを期待する次第です。最後になりますが、物性研在学中、在籍中にお世話になった方々に深く感謝いたします。



極限レーザーグループ（六本木キャンパスにて）

子輸送現象の観測に味を占めて、新しい層状半金属として Eu^{2+} を内包する黒リン関連化合物の高圧合成を行い、パルス磁場下のトランスポート測定を進めました（修士2年、野本敦朗氏）。こちらはさらにややこしい振る舞いを示すため、結果の解釈に苦勞していますが、特異な磁気輸送現象や、ディラック点のトポロジーに起因したベリー位相の存在を示唆する結果が得られつつあります。今後の展開が楽しみな物質です。

今回の任期中は、残念ながら理論系の先生方と交流する機会をもつことが出来ませんでした。徳永先生にマシンタイムを融通して頂き、また研究会などに呼んで頂いたお陰で、物性研が身近な存在になったと感じています。今後は、多彩な手法を用いた新物質開拓とパルス強磁場を用いた新物性探索のタイアップをさらに推進し、理論家の力もお借りすることで、強磁場物性研究のコミュニティに貢献できればと考えています。突然の訪問にもかかわらず、広井研究室助教の矢島健氏と那波和宏氏（現在：東北大学多元研助教）、さらに辛研究室助教の石田行章氏には、実験室内の装置の案内を丁寧に行って頂きました。また、三宅厚志助教、秋葉和人氏（博士課程2年）、秘書の荒木和代氏にも、任務を遂行する上で大変お世話になりました。この場を借りて皆様に御礼申し上げます。

[1] H. Masuda, H. Sakai, M. Tokunaga, Y. Yamasaki, A. Miyake, J. Shiogai, S. Nakamura, S. Awaji, A. Tsukazaki, H. Nakao, Y. Murakami, T. -H. Arima, Y. Tokura, S. Ishiwata, *Science Advances* **2**, e1501117 (2016)



物性研究所短期研究会

「第 1 回固体化学フォーラム研究会：固体物質・材料研究の現在と未来」

日時：2016 年 6 月 14 日～15 日

場所：物性研究所大講義室

提案代表者：島川 祐一（京都大学化学研究所）

共同提案者：宮坂 等（東北大学金属材料研究所）

陰山 洋（京都大学大学院工学研究科）

北川 宏（京都大学大学院理学研究科）

菅野 了次（東京工業大学大学院総合理工学研究科）

高野 幹夫（岡山大学・客員教授）

廣井 善二（物性研究所）

平成 27 年秋、日本における固体物質・材料研究の推進とコミュニティ形成を目的として「固体化学フォーラム」が結成された。その趣旨は、固体化学、無機化学、錯体化学、材料科学の各分野の研究者が意見交換や情報共有をする場を提供すると共に、物性物理、理論化学・物理、計算化学、さらには放射光や中性子などの大型評価施設や産業応用などの分野との接点を作り、将来に向けた多くのコミュニティが協調して発展していくことにある。特に若手研究者が異分野の研究に接する機会を増やし、研究の新たなブレークスルーを産み出す原動力になることを期待したものである。この固体フォーラム立ち上げのキックオフ会議として、本短期研究会が企画された。上記分野の先導的研究者と若手研究者が一堂に会し、固体物質・材料研究の現状と将来展望に関して議論を行うことは重要であり、これを物性研究所において開催することは所の活動にとっても大きな意義がある。

短期研究会では、固体化学から物性物理、材料研究の幅広い分野で活躍している研究者による 6 つのレビュー講演と 11 の一般講演、さらに 45 件のポスター発表が行われた。参加者は初日に 115 名、2 日目に 102 名であった。新しい合成手法や化学反応場を用いた有機物から無機物まで様々な物質の合成、および、磁性、超伝導、誘電性などの物理的特性から反応、触媒、イオン伝導、電池材料などの化学的特性まで多くの興味深い発表があり、活発な議論が行われた。期待した通り、固体化学という共通の学問を通して、これらの分野の研究者が相互作用することに重要な意義があることが強く認識された。

また、物性研の 5 名の研究者により、所の概要と共同利用のアクティビティに関する説明があり、国際超強磁場科学研究施設および極限コヒーレント光科学研究センターの見学が行われた。これまで物性研に馴染みの薄かった外部研究者に大変好評であり、今後の共同利用および研究を促す良い機会となった。本短期研究会の成功を起点として、今後の固体化学フォーラムのさらなる発展に向けて努力することで参加者一同の意見が一致した。今後は毎年 1 回、同様の研究会を全国の大学・研究所と共同して継続していく予定である。



物性研究所短期研究会
「第1回固体化学フォーラム研究会：固体物質・材料研究の現在と未来」

物性研 6 階大講義室

6月14日				
	座長	広井 善二	物性研	
9:50	所長挨拶	瀧川 仁	物性研	はじめに
10:00	P1	島川 祐一	京大化研	異常原子価イオンを含んだ酸化物の化学と物理：最近の進展
10:30	G1	一杉 太郎	東工大・東北大 WPI	走査トンネル顕微鏡を用いた金属酸化物の電子状態研究と、酸化物エピタキシャル成長技術を活用した固体電気化学界面研究
10:55	G2	石渡 晋太郎	東大物工	ペロブスカイト型異常高原子価 3d 遷移金属酸化物の高圧合成と新奇物性開拓
11:20	G3	堀内 佐智雄	産総研	有機強誘電物質科学の創成
11:45	昼食			
	座長	遠山 貴巳	東理大理	
13:15	P2	宮坂 等	東北大金研	多孔性分子磁性体の研究
13:45	G4	細越 裕子	大阪府大理	有機磁性体の分子設計と量子スピン系への適用
14:10	G5	藪内 直明	東京電機大工	酸化物イオンの電化補償を利用した電池用高容量正極材料
14:35	休憩			
	座長	平井 大悟郎	物性研	
15:00	B1	広井 善二	物性研	物性研紹介
15:20	B2	森 初果	物性研	π 電子と水素が協奏した新機能分子性物質の開拓
15:40	B3	松田 康弘	物性研	物性研パルス強磁場の現状と展望
16:00	B4	山室 修	物性研	中性子散乱で観た新規材料中の水素のダイナミクス
16:20	B5	原田 慈久	物性研	LASOR：先端放射光と極限レーザーが推し進める軟 X 線物性科学
16:40				
17:00	ポスター			ポスター
18:00	+懇親会			+懇親会
20:00	終了			
6月15日				
	座長	小林 達生	岡山大自然	
9:00	P3	野原 実	岡山大自然	化学のアイデアに基づく超伝導物質開発
9:30	G6	佐藤 博彦	中央大理工	水熱合成法による物質探索の現状
9:55	G7	有馬 孝尚	東大新領域	ナノラチェットを作る・使う
10:20	休憩			
	座長	山本 文子	芝浦工大	
10:30	P4	北川 宏	京大理	次元交差領域における物性化学
11:00	G8	伊藤 満	東工大応セラ研	準安定 ABO ₃ の相制御と電気・磁気特性
11:25	G9	長谷川 哲也	東大理	複合アニオン化合物エピタキシャル薄膜の合成と物性
11:50	昼食			
13:00	強磁場・レーザー施設ツアー			強磁場・レーザー施設ツアー（松田康弘・辛）
14:30	休憩			
	座長	澤 博	名大工	
15:00	P5	菅野 了次	東工大	超イオン伝導体の物質探索
15:30	G10	坂本 良太	東大理	機能性低次元系のボトムアップ創製
15:55	G11	堀 彰宏	名大工	水素分子の高速核スピン転換を実現する多孔性金属錯体のナノ空間
16:20	P6	陰山 洋	京大工	アニオンの特性を活かした機能開発
16:50		高野 幹夫	岡山大工	最後に
17:00	閉会			



ポスター番号	氏名	所属略称	研究室	発表題目
1	平井 大悟郎	東大物性研	廣井研究室	レニウムペロブスカイトにおける多極子秩序の探索
2	山浦 淳一	東工大元素セ		量子ビームを用いた水素置換鉄系超伝導体の研究
3	田中 秀岳	東大物性研廣井研	廣井研究室	メラミンを用いたアニオン置換法による新物質探索
4	石崎 学	山形大・理		配位高分子ナノ結晶塗布二層薄膜の電子整流特性
5	和氣 剛	京大院工		貫入型複金属化合物の遍歴電子磁性
6	黄 博	京大院理		バルク状態では固溶しない銅-ルテニウムシステムにおける合金ナノ粒子の創出
7	山田 高広	東北大多元研		トンネル構造を有する金属間化合物の熱電特性
8	鬼頭 俊介	名大院工	澤研究室	TiSe ₂ における電気双極子の渦型反強磁的配列
9	今井 基晴	物材機構		Zintl 相太陽電池材料 BaSi ₂ の電子状態と光学的性質
10	今井 基晴	物材機構		インターカレーション型充填スクッテルダイト LaxRh ₄ P ₁₂ の超伝導
11	保坂 祥輝	京大化研	島川研究室	逐次相転移を示す異常高原子価 Fe イオンを含んだ新規ペロブスカイト構造酸化物 Ca _{0.5} Bi _{0.5} FeO ₃
12	高橋 仁徳	産総研・化プロ FMP		水蒸気バリア性を持つ粘土-改質リグニンハイブリッドフィルムの開発
13	井口 弘章	東北大院理		ヒドロキシ基を導入した MX 錯体における室温 Pd(III)モットーハバード相の実現
14	清水 啓佑	東工大	東研究室	巨大 <i>c/a</i> 比を有する単斜晶 Ga 置換 BiFeO ₃ 薄膜の圧電特性の配向依存性
15	那波 和宏	東北大多元研	佐藤研究室	擬一次元磁性体 ACuMoO ₄ (OH) (A = Na, K)における軌道秩序と磁性
16	辻本 吉廣	NIMS		配位数の変化を伴う新奇圧力誘起スピン転移現象
17	齊藤 高志	京大化研		異常高原子価遷移金属酸化物における新奇物性探索: LaCu ₃ Cr ₄ O ₁₂ における反強磁性金属状態
18	大槻 匠	東大物性研	リップマー研究室	パイロクロア型イリジウム酸化物 Pr ₂ Ir ₂ O ₇ 薄膜の合成と電気・磁気輸送特性
19	村杉 英昭	東北大院理		有機-無機ハイブリッドペロブスカイトにおける物性探索
20	中埜 彰俊	名大工	澤研究室	励起子絶縁体 Ta ₂ NiSe ₅ の構造物性研究
21	小原 勇輝	京大院工	北川研究室	マンガン系配位高分子のガラス化による機能向上
22	桜井 裕也	NIMS		異常高原子価をもつ Sr _{n+1} Cr _n O _{3n+1} (n = 1, 2, 3)の高圧合成と電子物性
23	工藤 菜央	中大理工	佐藤研究室	ホランダイト構造を基本とするバナジウム酸化物 K _{2-x} V _{8+2x} O _{16+x} の構造と物性
24	石井 雄大	中大理工	佐藤研究室	新規フラストレート磁性体 NaV ₃ Mo ₃ O ₁₁ の構造と磁性
25	脇本 聖美	中大理工	佐藤研究室	新規コバルト酸化物 Co ₂ MoO ₆ の構造と磁性
26	田中 雄大	中大理工	佐藤研究室	新規強磁性マンガン酸化物 AMg ₄ Mn ₆ O ₁₅ (A=K, Rb, Cs)の構造と磁性
27	加賀 聖守	中大理工	佐藤研究室	新規一次元磁性体 Mg ₃ MnO ₆ H _x の構造と磁性
28	高本 亘	中大理工	佐藤研究室	新規ダブルタングステン酸塩 AgFe(WO ₄) ₂ の構造と磁性
29	千代田 彩果	中大理工	佐藤研究室	マイカ構造を有する新規化合物 KFe ₃ Ge ₄ O ₁₂ の構造と磁性
30	村上 泰斗	京大工		HfMnSb ₂ :コニカル磁気秩序を示す金属秩序型ニクタイト
31	加藤 大地	京大工		可視光応答型光触媒 Bi ₄ NbO ₈ Cl の光触媒活性
32	竹入 史隆	京大工		新規層状鉄オキシカルコゲナイドの合成と物性
33	矢島 健	東大物性研	X 線測定室	新規層状オキシニクタイトの合成と物性
34	酒井 雄樹	KAST		ペロブスカイト PbCoO ₃ が示す A サイト B サイト電荷秩序
35	岡本 佳比古	名大院工	竹中研究室	秩序 Fe ₂ P 型構造をもつニクトゲン化物の電子物性
36	山本 孟	東工大 MSL		BiFe _{1-x} CoxO ₃ のスピン構造転移と電気磁気効果
37	廣瀬 陽代	東大物性研	廣井研究室	Cd ₂ O _s 2O ₇ 微小単結晶における電流による磁壁の制御
38	小林 慎太郎	名大工応物		異常原子価化合物 Cr(Se _{1-x} S _x) ₂ の構造と輸送特性
39	山本 文子	芝浦工大		高圧法による Hg-Pt-O 系の新物質合成
40	鳥巢 崇生	東大物性研	廣井研究室	Intergrowth 構造を有する新規層状オキシカルコゲナイドの合成と物性
41	石井 航	東大物性研廣井研	廣井研究室	超伝導体 BaTi ₂ PnO(Pn = Sb, Bi)における T _c の 2 ドーム構造
42	川本 徹	産総研		プルシアンブルー型錯体の構造制御と機能発現
43	高橋 顕	産総研		プルシアンブルー型錯体による高濃度アンモニア吸着
44	松林 康仁	東大物性研	廣井研究室	5d 遷移金属パイロクロア酸化物における新奇物性探索
45	芳賀 正明	中央大理工		Layer-by-layer 構築法によるホモ、ヘテロ接合膜の電子機能化学

物性研究所短期研究会

『強磁場コラボラトリー、国際協力と強磁場科学の将来』報告

日時：2016年6月23日(木)～平成28年6月24日(金)

場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)

研究会提案代表者：野尻 浩之(東北大)

共同提案者：佐々木 孝彦(東北大)、淡路 智(東北大)、清水 禎(物質・材料研究機構)、
今中 康貴(物質・材料研究機構)、太田 仁(神戸大)、萩原 政幸(大阪大)
金道 浩一、嶽山 正二郎、徳永 将史、松田 康弘(以上物性研)

遡ること15年前、2001-2002年にかけて物性研究所で行われた強磁場に関わる幾つかの短期研究会は、その後、物性研における長時間パルス磁場設備の整備、強磁場施設間の協力の枠組みである強磁場コラボラトリーの構築、あるいは強磁場分野の学術団体である強磁場フォーラムの結成等、今日の強磁場科学の学術的な基礎と組織的枠組みを築く契機となった。この間、国内の強磁場施設間の連携と人的交流によって各施設の設備整備が促進されてきたが、現在、世界最高レベルの強磁場科学の展開に向けて、現状を踏まえて新しいビジョンを構想し、それを推進する組織と人的資源を整える局面にある。その背景として、本質的にスモールサイエンスである物性研究においても、研究基盤整備とそれを利用した学術研究展開の両面において、個々の点的な研究から面的な連携研究への展開が必須になっている状況がある。

例えば、2015年に強磁場研究の世界組織である Global High Magnetic Forum が結成された。この組織の本質は、強磁場施設の Global な世界クラブ-G6 の形成であり、これに加わるアメリカ、フランス、オランダ、ドイツ、中国、日本の各強磁場施設は、今後、熾烈な国際競争と広範な国際関係という2つの側面において、それぞれの存在感を示す必要がある。このような状況では、もはや個々の大学、施設が単独で状況に臨むのではなく、強磁場コラボラトリーという枠組みを一段と高いレベルに押し上げて、日本の強磁場科学の旗幟を鮮明にする必要がある。今年度から日本国内では、パルス磁場分野で物性研と阪大の共同利用連携が開始され、金研では次世代の超伝導磁石の共用が開始された。一方、次世代の定常磁場施設の枠組みは、未だその姿を明確に示されるまでに至っていない。日本の存在感を明確に示すメッセージを内外に発することは、日本が今後も、強磁場の G6 にとどまれるかどうかを左右する。

本研究会では、このような背景の下で、1. 強磁場コラボラトリー計画の現状と今後の方向性、2. 強磁場科学の目指す課題、3. 他の極限環境（低温、高圧、レーザー光）や他施設（放射光、中性子等）との連携の方向性、4. 中国、韓国をはじめとした海外の強磁場グループとの連携のあり方、の4点をはじめとした多角的な議論を行い、今後の我が国の強磁場研究の方向性を明らかにする事を目指した。また、今後の強磁場研究の構想を担う人材の明示と発掘を意図して、准教授、助教を中心とする若手に招待講演を依頼し、自らのサイエンスと今後の分野の方向性について提示していただき、それに対して、経験ある各分野の第一人者からのコメントや問題提起を行ってもらった構成とした。また、2日目は英語とし、中国、韓国の強磁場関係者に招待講演をお願いし、各施設の研究方向、施設の紹介および国際協力について意見交換を行った。

各講演者の講演題目等については、後半に掲載のプログラムを見て頂くとして、以下ではその概要を纏める。

初日の6月23日の午前は、瀧川所長の挨拶と提案趣旨説明の後、High Field Science in the Interdisciplinary Area と題して、X線、中性子および素粒子研究と強磁場について、3名の招待講演が行われた。この中では、強磁場と他の施設との関係課題が、今後さらに発展すること明示され、研究グループや分野を超えた研究協力と研究連携の重要性が議論された。引き続き行われた High Field Science and Material Design/Synthesis のセッションでは、バルク磁性体、遍歴電子系、2次元電子系、グラフェン、表面等の物質の評価と強磁場の関わりについて、3名の招待講演と1名の一般講演が行われた。物性研の強磁場施設で、60-70テスラの利用が日常的になり、物質研究の多様性と可能性が大きく広がったことが、幾つかの実例で明確に示された。また、表面については、最近急速に研究

June 23 (Th.)

- 9:30 M. Takigawa (ISSP, UTokyo) Welcome
H. Nojiri (IMR, Tohoku) Opening address

(T1) High field science in the interdisciplinary area

- 9:35 Y. Narumi (AHMF, Osaka) “State of the art high-magnetic-field x-ray scattering and spectroscopies”
10:00 T. Masuda (ISSP) “Now and the future of neutron scattering in strong magnetic field”
10:20 T. Namba (ICEPP, UTokyo) “Fundamental physics with strong magnetic fields”

(T2) High field science and material design / synthesis

- 10:55 H. Ueda (SSPC, Kyoto) “Magnetic-field-induced transitions in fluorides with frustrated lattices”
11:20 S. Ishiwata (Dept. of Appl. Phys., UTokyo) “Search for novel itinerant magnets and their magnetotransport properties in high magnetic fields”
11:45 T. Machida (IIS, UTokyo) “Quantum Hall effect and cyclotron resonance in van der Waals junctions of graphene and h-BN”
12:10 T. Taen (ISSP) “Thickness dependent density-wave transition in graphite under high magnetic-field”

(T3) High field science studied in steady fields

- 13:25 S. Kimura (IMR) “High field ESR measurements of the quantum spin system in polarized electromagnetic wave”
13:50 R. Akiyama (Dept. of Phys., UTokyo) “Properties of topological insulators probed by a magnetic field”
14:15 Y. Ihara (Hokkaido Univ.) “High field NMR study for π - d interactions in organic superconductor”
14:40 M. Hirata (IMR) “High-field NMR study of the organic Dirac electron system”
14:55 Y. Imanaka (NIMS) “High field science in steady fields from now”

(T4) Development of physics in spin systems under high magnetic fields

- 15:10 N. Abe (Dept. of Adv. Mater Sci., UTokyo) “Gigantic optical magnetoelectric effect in high magnetic fields”
15:35 Y. Sawada (IMR) “Directional Dichroism in Spin Glass System (Ni,Mn)TiO₃”
15:50 M. Akaki (AHMF, Osaka Univ.) “Studies of magnetodielectric properties in åkermanite materials by pulsed high magnetic field”
16:05 J. Nasu (Tokyo Inst. of Tech.) “Magnetic-field-induced excitonic state in a strongly correlated electron system with spin-state degree of freedom”
16:20 T. Ono (Osaka Pref. Univ.) “Field induced phase transitions in low-dimensional frustrated spin systems”
16:40 H. Tanaka (Tokyo Inst. of Tech.) “Evidence of localization and crystallization of triplets and correlated local excitations in fully frustrated dimerized quantum magnet Ba₂MSi₂O₆Cl₂ (M=Co, Ni)”

(T5) Current status and future prospects of science in mega-gauss fields

- 17:10 Y. H. Matsuda (ISSP) “Current status and prospects of the research in megagauss pulsed magnetic fields”
17:35 D. Nakamura (ISSP) “Solid state physics research in megagauss pulsed magnetic fields”
17:55 A. Ikeda (ISSP) “Field induced spin state transitions of cobaltites at above 100 T”
18:30 – 20:00 Poster Session and Get-Together



June 24 (Fri.)

(F1) Generation of steady and quasi-steady fields and their application

- 9:30 S. Awaji (IMR) “Present status and strategy of superconducting magnets”
9:55 G. Nishijima (NIMS) “Development of beyond-1 GHz NMR superconducting magnet”
10:20 Y. Kohama (ISSP) “Generation of quasi-static pulsed magnetic fields and its application”

(F2) Current status and future prospects of non-destructive pulse magnets and their application

- 11:00 M. Tokunaga (ISSP) “Development of high-precision measurements using non-destructive pulse magnets and their application to multiferroics”
11:25 T. Kida (AHMF, Osaka) “Current status and prospects of physical properties measurement under multiple extreme conditions at AHMF in Osaka University”
11:50 S. Okubo (Kobe Univ.) “Development and application of multi-extreme THz ESR in Kobe”
12:05 M. Hagiwara (AHMF, Osaka) “Perspectives of high-field (HF) researches using non-destructive pulse magnets and introduction of HF facilities at Osaka University”

(High Magnetic Field Forum of Japan)

(F3) International Collaboration 1

- 13:20 Liang Li (WHMFC, Wuhan) “The operation of the Pulsed High Magnetic Field Facility at the WHMFC”
13:50 MingLiang Tian (CHMFL, Hefei) “Construction and Operation of Steady High Magnetic Field Facilities at CHMFL and the Related Research”
14:20 Yongmin Kim (Dankook Univ.) “Anomalous Diamagnetic Shifts in GaP-InP Lateral Nanowires”

(F4) International Collaboration 2

- 15:00 Koichi Kindo (ISSP) “High magnetic field co-laboratory – Pulsed fields –”
15:25 Hiroyuki Nojiri (IMR) “High magnetic field co-laboratory – Steady fields –”
15:50 Declaration of the Establishment of Asian High Magnetic Field Forum
16:20 closing

Poster session

1. T. Sakai (Univ. of Hyogo) “Large-Scale Numerical Diagonalization Study on Novel Field-Induced Quantum Phase Transitions”
2. D. Yoshizawa (AHMF, Osaka Univ.) “Quantum magnetism of the rare-earth spinel compound CdYb_2S_4 ”
3. S. Kawachi (ISSP) “Study of multiferroic BiFeO_3 controlled by external fields”
4. A. Okutani (AHMF, Osaka Univ.) “High-field magnetism of the two-dimensional honeycomb lattice antiferromagnet $\text{Cu}_2(\text{pymca})_3(\text{ClO}_4)$ ”
5. K. Nomura (ISSP) “The magnetization process on $S = 1$ spin ladder compound BIP-TENO in ultra-high magnetic fields up to 100 T”
6. S. Akimoto (ISSP) “Magneto-optical effect of the Shastry-Sutherland lattice $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ in high magnetic field”
7. H. Yasumura (IMR) “Development of high magnetic fields X-ray magnetic circular dichroism for low temperature experiments and study of field induced valence transition”
8. T. Ebihara (Shizuoka Univ.) “High Field Magnetization in strongly correlated electron systems CeNi_2Ge_2 and YbNi_2Ge_2 without magnetic orders”

9. T. Ichikawa (ISSP) “Magnetization measurements of valence fluctuating system EuNi_2X_2 ($\text{X} = \text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, P) in ultra-high magnetic field over 100 T”
10. T. Terashima (ISSP) “Magnetization saturation and electric state of YbB_{12} in high magnetic field”
11. A. Miyake (ISSP) “Magnetic phase diagrams of uranium compounds UPtGe and $\text{UIr}_2\text{Ir}_3\text{Si}_5$ having zigzag-chain”
12. S. Matsuzawa (IMR) “Investigation of the field-induced CDW in superconducting cuprates using X-ray free electron laser”
13. K. Akiba (ISSP) “The quantum transport phenomena and electronic structure in semimetallic black phosphorus under magnetic field and pressure”
14. H. Hayasaka (U. Electro-Communications) “Crystalline spin-orbit interaction of thermoelectric Dirac electron systems $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ”
15. M. Owada (U. Electro-Communications) “Theoretical study of magnetoresistance in bismuth under strong magnetic fields”
16. T. Osada (ISSP) “In-Plane Transport in Topological Insulator Ultra-Thin Film under Parallel Magnetic Fields”
17. K. Yoshimura (ISSP) “Metallic charge-ordering state in the vicinity of massless Dirac fermion state in an organic conductor $\alpha\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$ ”
18. K. Takehana (NIMS) “Cyclotron resonance of bilayer graphene grown on SiC”
19. Y. Imanaka (NIMS) “Magneto-transmission study in high-mobility CdTe quantum Hall systems”
20. J. Irobe (Chiba Univ.) “Local probing of dynamic nuclear polarization induced by quantum Hall breakdown current by magneto-optical Kerr effect”
21. K. Yagasaki (Chiba Univ.) “Transport properties of GaAs/AlGaAs quantum Hall electron system under optical vortex irradiation”
22. H. Mitamura (ISSP) “Development of precise magnetoresistance measurement technique in pulsed high magnetic fields in HLD, HZDR”
23. S. Noguchi (Osaka Pref. Univ.) “50 T pulsed magnetic field goes towards the very low temperature region by the adiabatic demagnetization”
24. A. Kondo (ISSP) “Development of the pressure cell with a large sample space for pulsed magnetic field”
25. T. Tahara (AHMF, Osaka Univ.) “Development of an apparatus under multiplied extreme conditions”
26. M. Tokunaga (ISSP) “Development of an insert-type imaging system combined with a pulse magnet”
27. A. Ikeda (ISSP, UTokyo) “Development of measurement systems for magnetostriction and x-ray diffraction at above 100 T”



た。一方 10QL の試料では、トポロジカル表面状態であるディラックコーンが明瞭に観測されたが、ディラックコーンの一部でギャップ内状態が存在する事を示唆するスペクトルが得られた。

コヒーレントフォノンの観測については、BaFe₂As₂ についても既に様々な手法で観測されているが、今回極紫外レーザーでの時間分解光電子分光によって初めて、ホール面、電子面それぞれにおいてコヒーレントフォノン励起を観測し、その振動の位相が反転している事を見出した。講演では位相反転の起源と光誘起超伝導の可能性について議論する。

- [1] K. Okazaki *et al.*, Science **337**, 1314 (2012)
- [2] K. Okazaki *et al.*, PRL **109**, 237011 (2012)
- [3] K. Okazaki *et al.*, Sci. Rep. **4**, 4109 (2014)
- [4] Y. Ota, K. Okazaki *et al.*, RRB **89**, 081103 (2014)
- [5] T. Shimojima, K. Okazaki, and S. Shin, JPSJ **84**, 072001 (2015)

標題：Quantum spin liquids

日時：2016年9月5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)

講師：Leon Balents

所属：Kavli Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara

要旨：

Quantum spin liquids may be considered “quantum disordered” ground states of spin systems, in which zero point fluctuations are so strong that they prevent conventional magnetic long range order. More interestingly, quantum spin liquids are prototypical examples of ground states with massive many-body entanglement, of a degree sufficient to render these states distinct phases of matter. Their highly entangled nature imbues quantum spin liquids with unique physical aspects, such as non-local excitations, topological properties, and more. I will give an overview of the different types of quantum spin liquids, the models and theories used to describe them, and describe the current status of experiments.

【講師紹介】

Leon Balents 教授はハーバード大学で学位取得後、1999年よりカリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)で教鞭を取り、2008年には同校のカブリ理論物理学研究所(KITP)の Permanent Member に任じられました。Balents 教授は物性理論の広範な分野で活躍しており、特にトポロジカル相などの理論的な新概念を現実の物質と結びつける点で世界をリードする研究者です。2013年には“*For the theory of new topological quantum phases of electrons in condensed matter.*”により米国物理学会フェローに選出されました。また、物性研が実施中の頭脳循環プログラムの連携研究者でもあります。



物性研究所セミナー

標題：第六回光量子融合連携研究開発プログラム進捗研究会「極限レーザーと先端放射光技術の融合による軟 X 線物性科学の創成」

日時：2016 年 6 月 3 日(金) 午後 1 時～

場所：姫路じばさんビル 4F 401 会議室

要旨：

近年の極限的なレーザー技術の革新により、極端紫外から軟 X 線にわたる短波長光の発生が実現し、放射光を補完する光源として期待されている。一方放射光における先端的な計測技術も着実に進展しており、X 線を用いた時間分解や顕微分光計測が可能となっており、今後は光源の垣根を越えたさまざまな利用法の開発が大きな課題となっている。本研究会は、平成 25 年度から文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」で採択された研究課題「極限レーザーと先端放射光技術の融合による軟 X 線物性科学の創成（課題責任者：辛埴）」に携わる研究グループによる進捗報告会であり、文化の異なるレーザーと放射光コミュニティ間の交流を通じてお互いの理解を深め、レーザーと放射光を共通基盤とした新しい物質科学の創成を目指す。

標題：理論セミナー：Schottky junctions studied using Korringa-Kohn-Rostoker non-equilibrium Green's function method

日時：2016 年 6 月 10 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：赤井 久純

所属：東京大学物性研究所

要旨：

A scheme that combines the non-equilibrium Green's function method with the Korringa-Kohn-Rostoker (KKR) Green's function method is proposed. The method is different from most previous attempts [1-3] in that it uses the exact Green's function whose spectrum is not bound within a finite energy range, and hence, it provides a sounder basis for quantitative discussions than the methods using the finite basis sets do. The scheme is applied to the Schottky junctions composed of a Al/GaN/Al trilayer.

Schottky contacts formed in metal/semiconductor junctions play an important role in semiconductor devices and integrated circuits [4]. They have been intensively investigated for several decades not only for possible application to electronic devices but also for gaining a fundamental understanding of the Schottky barrier formation.

Our results show that the Schottky barrier is formed between an undoped GaN and Al interface. The transport property of this system under various finite bias voltages is calculated. It is shown that the asymmetric behavior of electron transport against the direction of bias voltage occurs in this system, confirming the feature of rectification.

References

- [1] J. M. Soler, E. Artacho, J. D. Gale, A. Garcia, J. Junquera, P. Ordejon, and D. Sanchez-Portal, *J. Phys.: Condens. Matter* **14**, 2745 (2002).
- [2] D. R. Bowler, T. Miyazaki, and M. J. Gillan, *J. Phys.: Condens. Matter* **14**, 2781 (2002).
- [3] T. Ozaki and H. Kino, *Phys. Rev. B* **72**, 045121 (2005).
- [4] S. M. Sze and K. K. Ng: *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2007).

標題：機能物性セミナー：固体高分子形燃料電池におけるカーボン系カソード触媒による酸素還元反応 -N ドープカーボンは遷移金属なしで酸素還元を促進するのか？-

日時：2016年6月16日(木) 午前11時～

場所：第二会議室 (TV会議 SPring-8 会議室)

講師：難波江 裕太

所属：東京工業大学 物質理工学院材料系

要旨：

固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化において、電極触媒に用いられている白金のコスト、および希少性が、本格普及の妨げになっており、白金使用量の大幅低減を可能とする触媒が、切望されている。そこで近年、炭素、窒素を含む前駆体を少量の遷移金属と共に熱処理して得る、カーボン系カソード触媒が注目を集めている。本発表では、我々が最近取り組んでいる、鉄含有ポリイミド微粒子(Fe/PINP)由来のカーボン系触媒の開発状況と、共同研究者とともに取り組んでいるメカニズム研究について紹介する。

Reference

1. Y. Nabae et al., Sci. Rep., 6, 23276 (2016).
2. Y. Nabae et al., J. Mater. Chem. A, 2, 11561-11564 (2014).

標題：理論セミナー：超効率的なカオスモンテカルロ計算-相関の可制御性と、物理計算への応用について-

日時：2016年6月17日(金) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：梅野 健

所属：京都大学大学院情報学研究所、 東京大学物性研究所

要旨：

全てのモンテカルロ計算法の基礎には、エルゴード性がある。が、一乱数の相関の特性によってその計算スピードは異なる。用いる乱数の相関が弱く、中心極限定理が成立する状況では、誤差分散が、計算ステップ数 N に対して $O(1/N)$ となる通常の振る舞いをするが、相関が無視できない乱数を用いる場合、中心極限定理が成立しない状況-誤差分散が $O(1/N^2)$ に収束する超効率的なモンテカルロ計算が可能であることを、1998年講演者によって発見された。その計算原理自体は、まだ新しく、一部の工学の分野 (例：米国の携帯電話チップメーカーである Qualcomm 社の C-A. Yang, UCLA の Kung. Yao) で用いられてきたがメトロポリス法等のモンテカルロ法の本家となる物理分野では用いられてこなかった。

本講演では、その誤差分散が $O(1/N^2)$ となるメカニズムを、混合性を持つ乱数の相関の可制御性から説明し、物性理論分野の“新しい”超効率モンテカルロ計算法の構築につながるかという問題提起をし、議論したい。



標題：ナノサイエンスセミナー：ESR spectroscopy using nitrogen-vacancy centers in diamond

日時：2016年6月17日(金) 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：高橋 晋

所属：南カリフォルニア大学、化学科

要旨：

Magnetic resonance (MR), such as nuclear magnetic resonance (NMR) and electron paramagnetic resonance (EPR), can probe the local structure and dynamic properties of various systems, making them among the most powerful and versatile analytical methods. However, their intrinsically low sensitivity precludes MR analyses of samples with very small volumes; e.g., more than 10^{10} electron spins are typically required to observe EPR signals at room temperature. A vast improvement in the current limits of MR will enable the imaging of structures and conformational changes of molecules in solution at the single molecule level.

A nitrogen-vacancy (NV) center in diamond is a promising candidate for applications in room temperature magnetic sensing with single spin sensitivity. In this presentation, we will discuss EPR spectroscopy using on NV centers in diamond. By employing EPR and double electron-electron resonance (DEER) techniques, we investigate impurities and coherence in diamond.¹⁻³ We also demonstrate EPR of several electron spins using NV-based EPR spectroscopy. Moreover, we will discuss development of a high-frequency NV-based EPR system.⁴ This work is supported by NSF and the Searle Scholar program.

[1] F. H. Cho, ST et al., Rev. Sci. Instrum. 85, 075110 (2014).

[2] V. Stepanov and ST, arXiv:1603.07404.

[3] C. Abeywardana, ST, arXiv:1507.08744.

[4] V. Stepanov, ST et al., Appl. Phys. Lett. 106, 063111 (2015).

標題：第38回極限コヒーレント光科学セミナー「電子を用いた新しい水溶液計測法の開発とその応用」

日時：2016年6月23日(木) 午後2時～午後3時

場所：物性研究所本館6階 第1会議室 (A636)

講師：由井 宏治

所属：東京理科大学

要旨：

強いレーザーパルス光を水溶液中の物質に集光照射すると、物質は誘電破壊されプラズマ化する。発表者は、水溶液がプラズマへ相転移する前に溶液中に生み出された電子が、周囲の水分子の分極率の変化を誘起し、ラマン散乱断面積の $10^2 \sim 10^5$ 倍の増強を促すことを見出した。ラマンスペクトルは、分子の微視的構造や相互作用を鋭敏に反映するため、水溶液の微視的環境・物性の起源に関する情報を得ることができる。ラマン散乱分光法は水の強い赤外吸収に妨害されないため、発表者はこれらの特徴を活かして、これまで計測の難しかった様々な不均一系、また観測窓の限られる極限条件における水の微視的環境を明らかにした。また水溶液環境が重要となる生体・環境・様々な産業プロセスへの応用分析にも期待がもたれる。またレーザー誘起ではなく、最近の水溶液中電極間放電プラズマを用いた実験系についても紹介したい。

標題：理論インフォーマルセミナー：Local physical quantities for spin based on quantum electrodynamics

日時：2016年6月24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：福田 将大

所属：東京大学物性研究所

要旨：

The local picture of electron spin is studied in the framework of quantum electrodynamics(QED).

In the framework of QED, one of the fundamental local physical quantities is the energy-momentum tensor density, which is derived from the general principle of relativity.

Recently, the “quantum spin vorticity theory” [1] is proposed as a consequence of the general relativistic symmetry of the energy-momentum tensor.

The quantum spin vorticity theory can give the time evolution equations of the electronic momentum density and the spin angular momentum density as equations which relate local mechanical physical quantities derived from the energy-momentum tensor density.

These local images of an electronic state by the quantum spin vorticity theory can help us to understand spin phenomena in condensed matter and molecular systems from a unified viewpoint [2,3].

[1] A. Tachibana, J. Math. Chem. 50, 669 (2012); Electronic Stress with Spin Vorticity. In Concepts and Methods in Modern Theoretical Chemistry, S. K. Ghosh and P. K. Chattaraj. Eds., CRC Press, Florida (2013), pp. 235-251; J. Comput. Chem. Jpn. 13, 18 (2014); Indian J. Chem. A, 53, 1031 (2014).

[2] M. Fukuda, K. Soga, M. Senami, A. Tachibana, Int. J. Quant. Chem., 116, 920 (2016).

[3] M. Fukuda, K. Ichikawa, M. Senami, A. Tachibana, AIP Advances 6, 025108 (2016).

標題：機能物性セミナー：液相界面での分子積み木細工によるナノシート結晶の創製

日時：2016年7月4日(月) 午後0時30分～午後1時30分

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室 (A612)

講師：牧浦 理恵

所属：大阪府立大学大学院工学研究科物質化学系専攻

要旨：

電子機器に対するより軽く・薄くといった社会的要求に加え、省資源化が望まれる中、ナノメートルスケールの厚みを有する2次元物質ナノシートは、究極に薄い機能材料として注目を集めている。有機分子を構成要素として得られる分子ナノシートは、構造設計性に優れ、多様なナノシートの創製が期待される。本セミナーでは、液相界面を用いた分子ナノシート結晶に関して、液面でのその場放射光X線回折測定により解明した形成過程、構造制御、光電子機能に関して講演する。



標題：新物質セミナー：Multiferroics by design with frustrated molecular magnets

日時：2016年7月6日(水) 午後1時～午後2時30分

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：紙屋 佳知

所属：理化学研究所

要旨：

Geometric frustration in Mott insulators permits perturbative electron fluctuations controlled by local spin configurations [1]. The simplest example is an equilateral triangle, “trimer”, of spins with $S = 1/2$, where low-energy degrees of freedom consist of built-in magnetic and electric dipoles arising from the frustrated exchange interaction. Such trimers, when weakly coupled, can be used to build multiferroics by design [2]. An organic molecular magnet known as TNN [3], with three $S = 1/2$ nitronyl nitroxide (NN) radicals in a perfect C_3 symmetric arrangement, is an ideal building block, as was demonstrated by recent experiments on a single crystal comprising TNN and CH_3CN . The fascinating thermodynamic phase diagram of this molecular crystal, TNN· CH_3CN , is in excellent agreement with our theory, which predicts multiferroic behavior and strong magnetoelectric effects arising from an interplay between magnetic and orbital degrees of freedom [4]. Our study thus opens up new avenues for designing multiferroic materials using frustrated molecular magnets.

References:

- [1] L. N. Bulaevskii, C. D. Batista, M. V. Mostovoy, and D. I. Khomskii, Phys. Rev. B 78, 024402 (2008).
- [2] Y. Kamiya and C. D. Batista, Phys. Rev. Lett. 108, 097202 (2012).
- [3] Y. Nakano et al., Polyhedron 24, 2147 (2005).
- [4] Y. Kamiya et al., in preparation.

標題：LASORセミナー：規則合金における磁化ダイナミクスの制御とデバイス展開

日時：2016年7月20日(水) 午後2時30分～午後3時30分

場所：第一会議室 (TV会議 SPring-8 会議室)

講師：関 剛斎

所属：東北大学金属材料研究所

要旨：

異なる金属原子が規則的に空間配列した材料は規則合金と呼ばれ、実用材料として用いられている無秩序合金には無い優れた機能性を発現する。高い一軸磁気異方性を示す「L10型 FePt 合金」、および伝導電子が高いスピン分極率を有する「L21型 ホイスラー合金」は磁性規則合金の一種であり、それらはナノサイズにおける磁化の高い熱安定性や磁気抵抗効果の増大をもたらすなど、スピントロニクスおよびナノマグネティクスが飛躍的な発展を遂げるためのキーマテリアルとなる。本セミナーでは、規則合金の磁気構造や磁化ダイナミクスを制御することによって、低い外部エネルギーで磁化反転を誘起できること[1,2]、また高周波自励発振を高性能化できること[3]を紹介する。ナノ磁性体における多様な磁化ダイナミクスを説明し、それらを理解する上で放射光を利用した精密評価の有用性についても議論したい。

- [1] T. Seki et al., Nat. Commun., 4, 1726 (2013).
- [2] T. Seki et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 49, 075002 (2016).
- [3] T. Seki et al., Appl. Phys. Lett. 105, 092406 (2014).

標題：機能物性セミナー「ヘムタンパク質の機能操作：超分子集合体および人工酵素の構築」

日時：2016年7月21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：大洞 光司

所属：大阪大学大学院工学研究科応用化学専攻

要旨：

ヘムタンパク質は、補因子としてポルフィリン鉄錯体（ヘム）を含み、生体内で物質変換の触媒や酸素貯蔵・輸送等の役割を担っています。我々のグループでは、ヘムを除去したヘムタンパク質に、化学的に合成した人工補因子を挿入し、ヘムタンパク質の機能改変を実施しています。本セミナーでは、天然のシステムに倣った人工酵素や光補集系および新規生体材料への応用を指向したヘムタンパク質集合体について紹介します。

文献 J. Am. Chem. Soc., 135, 17282-17285 (2013)、Chem. Commun., 51, 11138-11140 (2015).

標題：第39回極限コヒーレント光科学セミナー「テラヘルツ帯のエレクトロマグノン共鳴」

日時：2016年7月26日(火) 午後2時～午後3時

場所：物性研究所本館6階 第1会議室 (A636)

講師：高橋 陽太郎

所属：東京大学大学院工学系研究科

要旨：

誘電性と磁性が強く結びついているマルチフェロイクス物質中では、磁性に由来した強誘電性が出現する。マルチフェロイクス固有の素励起は、電気双極子遷移を伴うスピン波励起であり、エレクトロマグノンと呼ばれている。エレクトロマグノンは新しい素励起というだけでなく、励起状態内部の電気磁気結合効果を反映した電気磁気光学効果と呼ばれる新奇光学応答を示すことが明らかになってきた。本発表では、スピン構造や微視的な機構に基づいて、エレクトロマグノン共鳴において実現されている巨大な電気磁気光学効果や周辺の話題について紹介する。

標題：理論セミナー：Coarse-Grained Molecular Dynamics Simulation of Self-Assembled Macromolecules

日時：2016年8月4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：篠田 渉

所属：名古屋大学大学院工学研究科

要旨：

The talk illustrates recent development of our coarse-grained (CG) molecular model using a multi-property fitting approach. The CG model, known as the SDK CG model, is designed to reproduce experimental surface/interfacial properties as well as distribution functions from all-atom molecular dynamics (MD) simulations. This bottom-up approach to construct a CG model works well for lipids and surfactants self-assemblies, and has been extended to include proteins and polymers recently. This talk will particularly focus on zwitterionic phospholipid membranes, including vesicles. Membrane fusion and morphological changes of the lipid membranes are investigated in terms of free energy computation. A comparison of the CG-MD results with the conventional continuum model based on the Helfrich Hamiltonian elucidated non-trivial free energy contribution due to the conformational changes of lipids during the membrane deformation. The effects of the lipid components on the free energy barrier will be discussed. The effects of additives such as nanoparticles and peptides on the membrane properties will also be demonstrated.



標題：理論インフォーマルセミナー：第一原理電子状態計算を用いた新奇硫化物熱電材料の物性解明とマテリアルデザイン

日時：2016年8月26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：宮田 全展

所属：北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

要旨：

熱電発電とはゼーベック効果を利用して熱エネルギーを電気エネルギーに変換する技術であり、密度の低い自然エネルギーや廃熱を用いて発電を行う“エネルギーハーベスティング”の中でも重要な位置を占めると期待されている。熱電発電素子として応用されている Bi_2Te_3 や PbTe は希少元素 Te を含むため、 Te を含まない熱電材料の開発が求められている。同じ16族で地殻に豊富に存在する硫黄 S は Te の代替元素として有望であり、 S を主成分とした硫化物熱電材料の研究が精力的に行われている。

我々は硫化物に注目し、第一原理電子状態計算と実験の両面から遷移金属硫化物ウルマナイト NiSbS が巨大な出力因子を示すことを明らかにした[1]。第一原理電子状態計算ソフトウェアパッケージ OpenMX [2]、ランダウアー理論に基づく電子輸送計算ツール QTware [3]を用いた詳細な電子構造の解析から NiSbS の高い出力因子の起源は化学ポテンシャル μ 近傍の擬ギャップ構造であることを明らかにした。本講演ではこれらの詳細について発表するとともに、第一原理電子状態計算を用いた新奇硫化物熱電材料のマテリアルデザインについても紹介する[4]。

[1] M. Miyata, T. Ozaki, S. Nishino, and M. Koyano, (submitted to J. J. Appl. Phys.).

[2] T. Ozaki, Phys. Rev. B **67**, 155108 (2003).

[3] <http://www.rs.tus.ac.jp/takahiro/QTware.html>.

[4] M. Miyata, T. Ozaki, and M. Koyano, (submitted to J. Electron. Mater.).

標題：理論セミナー：Electromagnetic response of noncollinear antiferromagnets

日時：2016年8月31日(水) 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. Hua Chen

所属：テキサス大学オースティン校

要旨：

In spite of rich properties and significant academic interest, antiferromagnets have always been overshadowed by ferromagnets in real-life applications based on magnetism, including spintronics. This is primarily due to the fact that antiferromagnet order parameter couples weakly to external magnetic field and has therefore been difficult to manipulate. In this talk I will discuss a number of recent theoretical and experimental developments that counter this conventional wisdom in a class of antiferromagnets with stable noncollinear magnetic order. As an introduction I will talk about the surprising discovery of the anomalous Hall effect (AHE), the generation of a voltage perpendicular to current in the absence of a magnetic field, in noncollinear antiferromagnets. In these materials the AHE can be used as an efficient probe to determine the global orientation of the noncollinear antiferromagnetic order. I will then discuss the coupling between the noncollinear order parameter and external electric and magnetic fields. Electric fields or currents can change the magnetization direction and induce collective dynamics through current- or electric-field-induced spin-orbit torques. I will show through both toy model and first principles calculations that the spin-orbit torque is nonzero in a prototypical noncollinear antiferromagnet, Mn_3Sn , in spite of its global inversion symmetry. As for external magnetic fields, although their direct coupling with noncollinear spin magnetization is rather weak, I will show that there is a large orbital moment in these noncollinear antiferromagnets. Coupling between the external

magnetic field and the orbital moment can lead to a torque on the noncollinear order parameter through a response function that can be viewed as dual to the current-induced torque.

標題：ナノサイエンスセミナー：Cryogenic variable temperature SP-STM study of perovskite-clad FeAs monolayers

日時：2016年8月31日(水) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：Prof. Jhinhwan Lee

所属：Department of Physics, KAIST, Korea

要旨：

I. Plaquette antiferromagnetic order coexisting with iron superconductivity

The symmetry requirement and the origin of magnetic orders coexisting with superconductivity have been strongly debated issues of iron-based superconductors (FeSCs). Observation of C_4 -symmetric antiferromagnetism in violation of the inter-band nesting condition of spin-density waves in superconducting ground state will require significant change in our understanding of the mechanism of FeSC. The superconducting material Sr_2VO_3FeAs , a bulk version of monolayer FeSC in contact with a perovskite layer with its magnetism ($T_N \sim 50$ K) and superconductivity ($T_C \sim 37$ K) coexisting at parent state, has no reported structural orthorhombic distortion and thus makes a perfect system to look for theoretically expected C_4 magnetisms. Based on variable temperature spin-polarized scanning tunneling microscopy (SPSTM) with newly discovered imaging mechanism that removes the static surface reconstruction (SR) pattern by fluctuating it rapidly with spin-polarized tunneling current, we could visualize underlying C_4 symmetric (2×2) magnetic domains and its phase domain walls coexisting with superconductivity. We find that this magnetic order is perfectly consistent with the plaquette antiferromagnetic order in tetragonal Fe spin lattice expected from theories based on the Heisenberg exchange interaction of local Fe moments and the quantum order by disorder. The inconsistency of its modulation Q vectors from the nesting condition also implies that the nesting-based C_2 symmetric magnetism is not a unique prerequisite of high- T_C FeSC. Furthermore, the plaquette antiferromagnetic domain wall dynamics under the influence of small spin torque effect of spin-polarized tunneling current are shown to be consistent with theoretical simulation based on the extended Landau-Lifshitz-Gilbert equation. (ArXiv:1608.00884, under review in Nat. Mat.)

II. Enhancement of superconductivity by interfacial phonons

The physics at the interface between monolayer iron-based superconductor (FeSC) and perovskite substrate has received considerable attention due to the unusually high T_C of ~ 100 K found recently in monolayer FeSe on $SrTiO_3$ substrate. It has been suggested that forward-scattering interfacial phonons coupled with the Fe-layer electrons can enhance superconductivity from almost any kind of pre-existing electron-based pairing, initiating the quest for perovskite-clad FeSC monolayer and its bulk heterostructure with higher coupling efficiency with interfacial phonons. Here we report a spectroscopic imaging scanning tunneling microscopy (SI-STM) study on a parent-compound superconductor Sr_2VO_3FeAs , the only currently known self-assembled bulk example of FeSC monolayers on perovskite layers with substantially high $T_C \sim 37$ K. It shows clear signatures of forward-scattering phonons with unprecedentedly strong coupling close to 1 probably due to doubled interfaces per FeSC monolayer. Our masked quasiparticle interference (QPI) analysis based on the superconducting gap map and the V-Fe hybridization strength map shows clear positive correlations between all pairs, which is the hallmark of pairing enhancement due to electron-phonon coupling with interfacial phonons. With the possibility of massive number of parallel superconducting layers

and the stronger electron-phonon coupling achieved, perovskite-clad FeSC monolayers may become a building block of the next generation Fe-based high-Tc superconductors with significantly enhanced Tc and current carrying capacity. (ArXiv:1608.00886, under review in Nat.)

標題：頭脳循環 ワークショップ "Frontier of Quantum Material Science and Nano-Technology"

日時：2016年9月5日(月) 午前10時～午後2時30分

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

要旨：10:00-11:00

講師：Hua Chen (テキサス大学オースティン校)

標題：Orbital moments and current-induced magnetization dynamics in noncollinear antiferromagnets

要旨：

Now that the anomalous Hall effect is established as a convenient order parameter probe in a class of noncollinear antiferromagnets, it is timely to examine effects that can be used for order parameter manipulation. In this talk I will discuss some of our recent theoretical results on the coupling between the noncollinear magnetic order parameter and external electric and magnetic fields. First I will briefly explain the physics of orbital magnetic moments which arise from the coupling between magnetic fields and the orbital motion of electrons. A nonzero orbital moment is present in all ferromagnets, but is usually much smaller than the total spin moments. In noncollinear antiferromagnets like Mn3Ir or Mn3Sn, which have an anomalous Hall effect, sizable orbital moments exist while the total spin moment nearly vanishes. This orbital moment can be used to manipulate the order parameter using magnetic fields. Separately, in certain noncollinear antiferromagnets with broken atomic-site-inversion symmetry, a nonzero site-dependent spin polarization can be induced by external electric fields or currents, which can exert a torque on the local spin moments and can potentially change the direction of the noncollinear magnetic order parameter or induce its nontrivial dynamics.

11:00-12:00

講師：野村 健太郎 (東北大学金属材料研究所)

標題：Spin-electromagnetic responses in topological matters

要旨：

The electrical control of spin magnetization aims to be used in next-generation magnetic devices, allowing information to be written electronically. Recently, spintronics phenomena in topological materials have been drawn interests for achieving novel electrical manipulation of the magnetization, and generation of spin currents. In this presentation we discuss theoretical proposals of spintronics phenomena in topological insulators and magnetic Weyl semimetals.

In the first part of the talk, spin-electricity conversion at the interface between a ferromagnetic material and a topological insulator[1] is discussed. Injected spins by spin pumping are converted into a charge current due to spin-momentum locking on the surface state. We formulate a theoretical model for spin dynamics and the spin-electricity conversion effect on the topological surface. The dumping constant is expressed in terms of the conductivity of the surface Dirac fermions. The electrically induced spin current is calculated using the perturbation theory.

In the second part, we discuss spintronics phenomena in magnetic Weyl semimetals. A Weyl semimetal is a new type of topologically protected gapless quantum state, with either time-reversal or spatial inversion symmetries broken in three dimensions. Weyl semimetals with broken time-reversal symmetry are more interesting and rewarding for spintronics applications. We derive an effective free energy functional of

magnetization which describes low energy excitations and magnetic textures[2]. We also demonstrate that Weyl electrons in a magnetically doped Weyl semimetal exert a spin torque on the local magnetization, without a flowing current, when the chemical potential is modulated in a magnetic field. The spin torque is proportional to the anomalous Hall conductivity, and its effective field strength may overcome the Zeeman field. Using this effect, the direction of the local magnetization is switched by gate control in a thin film. We also discuss dynamics of local magnetization by solving the Landau-Lifshitz-Gilbert equation.

- [1] Y. Shiomi, K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, K. Segawa, Y. Ando, E. Saitoh, Phys. Rev. Lett. 113, 196601 (2014).
- [2] K. Nomura and D. Kurebayashi, Phys. Rev. Lett. 115, 127201 (2015).
- [3] D. Kurebayashi and K. Nomura, arXiv:1604.03326.

13:30-14:30

講師：Lucile Savary（マサチューセッツ工科大学）

標題：Disorder-induced entanglement in spin ice pyrochlores

要旨：

I will discuss a proposal according to which, in a certain class of magnetic materials, known as non-Kramers 'spin ice,' disorder induces quantum entanglement. Instead of driving glassy behavior, disorder provokes quantum superpositions of spins throughout the system, and engenders an associated emergent gauge structure and set of fractional excitations. More precisely, disorder transforms a classical phase governed by a large entropy, classical spin ice, into a quantum spin liquid governed by entanglement. As the degree of disorder is increased, the system transitions between (i) a "regular" Coulombic spin liquid, (ii) a phase known as "Mott glass," which contains rare gapless regions in real space, but whose behavior on long length scales is only modified quantitatively, and (iii) a true glassy phase for random distributions with large width or large mean amplitude. These results may be applicable to Pr₂Zr₂O₇, in which random crystal field splittings have already been observed, and to classical spin ices, such as Ho₂Ti₂O₇, upon chemical doping.

標題：ナノサイエンスセミナー：Nanogap-Enhanced Raman Scattering (NERS)

日時：2016年9月7日(水) 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：Prof. Yung Doug SUH

所属：Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT) and SungKyunKwan University

要旨：

Started from the simple wet-chemical nanogap generation induced by Coulomb aggregation among colloidal nanoparticles in aqueous solution after adding salt onto it shown independently by S. Nie and K. Kneipp in 1997, nanogap engineering to enhance Raman scattering signal to achieve single molecule sensitivity is getting more sophisticated. In this talk, single molecule Surface-Enhanced Raman Scattering (smSERS) field formed since 1997 will be briefly reviewed and then different types of nanogap engineering strategy for smSERS developed in my lab will be discussed: single-junction 0-D external nanogap between two spherical nanoparticles connected with a double helix DNA (Nature Materials 2010), multi-junction 3-D spherical nanogap internally formed between spherical gold core nanoparticle and spherical gold shell nanoparticle connected by multiple single helix DNAs (Nature Nanotech. 2011), and 2-D nanogap arrays formed on a 4-inch polymer wafer by simple two-step process. Several reasons will be

discussed why now SERS regime and NERS (Nanogap-enhanced Raman Scattering) regime should be separated on the enhancement factor (EF) distribution histogram. Recent result including direct near-field visualization of the nanogap field of the 2-D nanogap array, single molecule behavior of cytochrome C protein's Raman signal, and ultra-uniform distribution of SERS enhancement factor (EF) of benzene thiol molecule dispersed on this plasmonic 2-D nanogap array wafer will be presented.

List of Publications Related to this Presentation

1. D. Lim, K.-S. Jeon, H.M. Kim, J.-M. Nam, and Y.D. Suh, *Nature Materials* 9, 60 (2010)
2. D. Lim, K.-S. Jeon, J.H. Hwang, H.Y. Kim, S.H. Kwon, Y.D. Suh, and J.-M. Nam, *Nature Nanotechnology* 6, 452 (2011)
3. H. Lee, J.-H. Lee, S.M. Jin, Y.D. Suh, and J.M. Nam, *Nano Letters*, 13, 6113 (2013)
4. H. Lee, G.-H. Kim, J.-H. Lee, N.H. Kim, J.-M. Nam, and Y.D. Suh, *Nano Letters*, 15, 4628 (2015)
5. Y.I. Park, J.H. Kim, K.T. Lee, K.S. Jeon, H.B. Na, J.H. Yu, H.M. Kim, N. Lee, S.H. Choi, S.-I. Baik, H. Kim, S.P. Park, B.-J. Park, Y.W. Kim, S.H. Lee, S.-Y. Yoon, I.C. Song, W.K. Moon, Y.D. Suh, and T. Hyeon, *Adv. Mater.* (2009)
6. S.H. Nam, Y.M. Bae, Y.I. Park, J.H. Kim, H.M. Kim, J.S. Choi, K.T. Lee, T. Hyeon, and Y.D. Suh, *Angewandte Chemie* 50, 6093 (2011)
7. J.-W. Oh, D.-K. Lim, G.-H. Kim, Y.D. Suh, and J.-M. Nam, *JACS* 136, 14052 (2014)
8. H.J. Seo, S.H. Nam, H.-J. Im, J.-Y. Park, J.Y. Lee, B. Yoo, Y.-S. Lee, J.M. Jeong, T. Hyeon, J. W. Kim, J.S. Lee, I.-J. Jang, J.-Y. Cho, D.W. Hwang, Y.D. Suh, and D.S. Lee, *Sci. Report*, 5, 15685 (2015)
9. H.S. Park, S.H. Nam, J.W. Kim, H.S. Shin, Y.D. Suh, and K.S. Hong, *Sci. Report*, 6, 27407 (2016)

標題：新物質・理論インフォーマルセミナー：Targeted Synthesis of Hybrid Metal Organic Spin Liquids

日時：2016年9月9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：Danna Freedman, T. David Harris

所属：ノースウェスタン大学

要旨：

Confining magnetic properties to two dimensions offers tremendous potential for the discovery of new properties. One intriguing possibility is creating a spin liquid whereby an infinitely degenerate magnetic ground state enables the realization of new quasiparticles.

Synthetic inorganic chemistry is the ideal vector by which to design spin liquids. Specifically we are targeting two dimensional kagome lattices, a structure predicted to house spin liquids. Danna Freedman will present prior results on the known spin liquid herbertsmithite, and Dave Harris will present a synthetic vision and progress towards the realization of a hybrid metal-organic spin liquid.

標題：理論インフォーマルセミナー：Field theory for symmetry protected topological properties of AKLT-type VBS states

日時：2016年9月20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：高吉 慎太郎

所属：ジュネーヴ大学

要旨：

Mapping from quantum antiferromagnets to a semiclassical field theory such as nonlinear sigma models with topological terms has contributed insights into the nontrivial behavior of quantum fluctuations since the work by Haldane in 1980's. Recently, another aspect of AKLT states is focused, i.e., short-range entangled state protected by some symmetry. We explain how such symmetry protected topological (SPT) properties in AKLT-type VBS states are described using an effective field theory in spatial dimensions one through three.

Starting from the well-understood case of one-dimensional antiferromagnets and thereby establishing its validity, we proceed to the two-dimensional square lattice. Through a path integral representation of the ground state wave functional, we conclude that the ground state is an SPT state for the spin quantum number equal to two times odd integer while it is topologically trivial for two times even integer.

We also show that this representation of the ground state wave functional is closely related with the strange correlator, which is proposed as an indicator of SPT phase. Finally, we discuss generalization of the preceding approach to the case of a cubic lattice.

標題：理論セミナー：Emergence of negative capacitance in multi-domain ferroelectric thin film capacitors under bias

日時：2016年9月30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：笠松 秀輔

所属：東京大学物性研究所

要旨：

In recent years, several experimental works have shown that “negative capacitance” can be attained in a ferroelectric thin film placed in series with a paraelectric [1]. To explain this, they claim that the negative capacitance is realized by suppression of spontaneous polarization in the ferroelectric due to the depolarizing effect coming from the paraelectric film. However, such explanation has been criticized due to the fact that any such depolarizing effects are usually cancelled in ferroelectric materials through the formation of polarization domains.

In this talk, I will try to present a more convincing explanation of the mechanism for negative capacitance based on first-principles simulation results of a multidomain ferroelectric-paraelectric bilayer capacitor under bias voltage [2]. The finite-voltage simulations are performed using the orbital-separation approach [3] within the Kohn-Sham formalism of density functional theory. We show that domains evolve in an antiferroelectric-like way, and that negative capacitance can emerge as a result of monodomain formation under bias.

Reference:

[1] G. Catalan, D. Jiménez, A. Gruverman, *Nature Mater.* 14, 137 (2015).

[2] S. Kasamatsu, S. Watanabe, C. S. Hwang, and S. Han, *Adv. Mater.* 28, 335 (2016).

[3] S. Kasamatsu, S. Watanabe, and S. Han, *Phys. Rev. B* 84, 085120 (2011); *Phys. Rev. B* 92, 115124 (2015).



○平成 28 年 10 月 1 日付け

(所属変更)

氏 名	所 属	職 名	備 考
山 下 穰	凝縮系物性研究部門	准 教 授	物性研究所 極限環境物性研究部門から
三田村 裕 幸	凝縮系物性研究部門	助 教	物性研究所 新物質科学研究部門から
内 田 和 人	凝縮系物性研究部門	技術専門職員	物性研究所 極限環境物性研究部門から
村 山 千壽子	凝縮系物性研究部門	教務職員	物性研究所 新物質科学研究部門から
吉 信 淳	機能物性研究グループ	教 授	物性研究所 ナノスケール物性研究部門から
杉 野 修	機能物性研究グループ	准 教 授	物性研究所 物性理論研究部門から
中 辻 知	量子物質研究グループ	教 授	物性研究所 新物質科学研究部門から
押 川 正 毅	量子物質研究グループ	教 授	物性研究所 物性理論研究部門から



編集後記

この10月には、物性研の改組が行われました。詳しくは前号巻頭の瀧川所長の記事や物性研ホームページに書かれています。新しく創設された2つの機能物性研究グループと量子物質研究グループの研究理念などをご理解頂き、今後の活動に注目して頂ければと思います。

そして10月と言えば、やはりノーベル賞です。物理学賞については、今号の押川所員の記事を是非ご一読頂ければと思います。一般向けの説明にはとてもハードルが高い「トポロジカル」「物性」のコンビのせいか、残念ながら受賞後全くと言ってよいほど、物理学賞に関する解説はテレビでお目にかかれませぬ。やはり物性研が頑張らなくてどこがやるか、と広報担当としては焦るところであります。また、今年も日本から生理学賞に大隅東工大名誉教授が選ばれましたが、受賞直後から「役に立つ」研究と対比させて基礎研究への理解を求める訴えをされている様子は、今までのノーベル受賞者のコメント風景とちょっと違い、グッとくるのは物性研だよりを読まれている皆様も同じかと思ひます。この度重なる訴えに刺激されるように、全国の34もの大学の理学部長による声明が出され、基礎研究への理解と支援を訴えています。ただ、その声明では運営費交付金と教員の削減の中止も求めています。子供つまりは学生数が確実に減っていく中で、ただ削減を止めろと言うだけでは、財務省の耳に届くのか、いささか不安なところではあります。

それから、10月と言えば、一般公開です、、、と、10月は書く事に事欠かない時期で、編集後記もあつという間にスペースが埋まってしまうました。研究記事紹介ができなくて申し訳ないのですが、1点、末元先生の記事にある「物性研をモデルにして設立されたマックスプランク固体研究所」については、とても気になっています。最後に、お気づきだと思いますが、物性研だよりのデザインが一新されました。それについては次号の編集後記にて。

鈴木博之

