

BUSSEKEN DAVOR 第58巻 第3号 2018年10月

室内発生世界最高磁場1200テスラの記録

強磁場から見たトポロジカルなスピン構造が織りなす 創発磁気モノポール物性

軟X線で決定する物質のバンドトポロジー -トポロジーは見かけより中身が大事 -

Topological superconductivity in iron-based superconductors

平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則

バルク結晶と薄膜結晶で異なるスピン状態を直接観測 ~スピン状態の判別に有効な計測手法を確立~

プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態

固体結晶からの高次高調波発生の偏光分解測定 ~ 高調波の偏光に電子状態の異方性が映し出されることを実証~





東京大

The Institute for Solid State Physics The University of Tokyo

Copyright ©2018 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved. ISSN 0385-9843

物性研究所





contents

1	室内発生世界最高磁場 1200 テスラの記録	嶽山 正二郎
4	強磁場から見たトポロジカルなスピン構造が織りなす創発磁 金澤直也、藤代有絵子、十倉 好紀、三宅 厚志、	絃気モノポール物性 三田村 裕幸、徳永 将史
7	軟 X 線で決定する物質のバンドトポロジー -トポロジーは見かけより中身が大事-	黒田健太、近藤 猛
9	Topological superconductivity in iron-based superconductors ZHANG Peng,辛 埴	
11	平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則 杉浦 祥、中川裕也	1、藤田 浩之、渡邉 正隆
14	バルク結晶と薄膜結晶で異なるスピン状態を直接観測 ~スピン状態の判別に有効な計測手法を確立~	横山優一、和達大樹
16	プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態	遠藤 彰、勝本信吾
19	固体結晶からの高次高調波発生の偏光分解測定 ~ 高調波の偏光に電子状態の異方性が映し出されること	とを実証 ~ 石井 順久、板谷治郎
22	市村学術賞、船井学術賞を受賞して	三輪真嗣
24	NESMCQ18 Poster prize を受賞して	長谷川 雅大
26	第 11 回分子科学会奨励賞を受賞して	上田 顕
28	外国人客員所員を経験して	Clifford HICKS

29 【物性研究所談話会】

31 【物性研究所セミナー】

編集後記

室内発生世界最高磁場 1200 テスラの記録

電磁濃縮法による超強磁場発生法は半世紀にわたり物性 研強磁場研究室が取り組んできた、いわば物性研強磁場の お家芸の一つである。この電磁濃縮法を用いて、ついに 1000 テスラを優に超える磁場発生に成功した。

1980 年初頭の物性研極限プロジェクトによる近角・三浦 等による 1000 テスラ電磁濃縮超強磁場計画が開始されて 以来、3 世代の所員により継承されて、実に半世紀が経っ て遂に目標に達成したことで感慨深い。電磁濃縮法による 超強磁場発生は、クネール(E. Cnare、1966 年)により提 案されたもので、当時 136 kJ のコンデンサを用いて 210 T の超強磁場の発生が報告されたのが最初である。近角聡 信氏が 1970 年初頭に、この方法に目を着けたのは今や先 見の明があったというほか無い。

原理は極めて簡単で、ライナーと呼ばれる金属円筒リン グをその円周方向に流れる電流の電磁応力を使って高速に 圧縮し、比較的大きな空間(直径 10-20 cm)に予め発生さ せておいた数テスラの磁束を濃縮することにより、最終的 に小さな空間に超強磁場を発生させる。これを信頼性と精 度の高い物性計測に適用するには最低数ミリ、できれば 10 mm 程度の直径及び長さ方向の磁場発生空間と磁場均 一性が必要となる。磁場発生空間の大きさとその中での磁 場均一性、パルス時間の制御は必須となる。電磁濃縮法の 実質的な開発と展開は世界で唯一物性研究所でのみ、超強 磁場発生とこれを用いた極限的環境での物性物理学への応 用研究に向けた開発を行って今日に至っている。

物性研嶽山研では、2003 年より電磁濃縮による超強磁 場発生の技術開発に注力し、極めて効率のよいコイル(銅 内張りコイル、以下 CL コイルという)の開発に成功した。 その結果、730 T という室内発生最高磁場を大幅に記録更 新した[1]。これにより、クロミウムスピネルの 600 T ま での磁化過程を5Kという極低温で精密に測定することに 成功した[2]。その後、2010 年に始まった文科省最先端研 究基盤事業「次世代パルス最強磁場発生装置の整備」の補 助金獲得を行い、1000 テスラ級電磁濃縮超強磁場発生装 置を新規導入した。その後、装置の調整と整備、開発を継 続し、2018 年 1 月に全システムをほぼ完成に導くことが できた。

国際超強磁場科学研究施設 嶽山 正二郎



図 1. 電磁濃縮用 CL コイルとそのセッティングの様子.外 枠の鉄コイルを基準にライナー、測定プローブが高い精度 で取り付けられる.

新装置では、瞬間的放電能力を引き上げるベくコンデン サ電源を刷新し、主コンデンサバンクの最大充電電圧を、 旧装置の 40 kV から 50kV に引き上げた。また、コンデン サ電源と負荷である磁場発生コイルとのインピーダンス整 合を最適化することで、全系のエネルギー伝達効率を改善 し、大きな空間を占めるコンデンサ電源に蓄積した電気エ



図 2. 電磁濃縮超強磁場発生時の磁場値の計測用に開発した 反射型のファラデー回転プローブ.a:光ファイバー、b:FRP チューブ、c:偏光板、d:ファラデー素子(石英の直径 1 mm のロッド)e:アルミミラー、f:ピックアップコイル.640 nm 波長の半導体レーザーは、一本の光ファイバーで入射、ファ ラデー素子を通過反射した帰りの光は光分岐を通して検知器 へ導かれる.

ネルギーを最終端である主コイル内の数センチ程度の小さ な超強磁場発生空間へと有効にエネルギー伝達できるよう 工夫した。

今回の濃縮実験には前記の CL コイルを用いた。CL コ イルは従来物性研で採用してきたコイルに比べ主コイルか らライナーへのエネルギー伝達効率が格段に高い。更に、 磁場発生の再現性が極めて高いだけでなく、磁場最高値を はじき出すライナーの終着点での位置が 1mm 以下という 高精度で制御可能である。図1で見てとれるように測定プ ローブのセッテイング方法も従来の方法とは全く発想が異 なる。図1の様に CL コイルの外側の最終的に破壊してし まうコイルの一番外側の鉄部を基準として全てを固定する。 これにより、磁場中心位置への高精度のセッティングが可 能となり、収縮ライナーがギリギリ(1mm 以下)近づくま で測定ができる [2]。この高精度 CL コイルでなければ 1000 T までの磁場計測は不可能である。

本実験では、主コンデンサバンクの充電エネルギーは 3.2 MJ (8 ユニット、45 kV)で、初期磁場の大きさは 3.2 テスラとした。発生した磁場強度は、ピックアップコイル による電気的計測とファラデー回転法による光学的計測を 同時に行なった。これまでの詳細な研究からピックアップ コイルでは 600 T までが測定限界であることが分かってい る。そこで、1000 T 領域での精密物性計測に於いてピッ クアップコイルに代わるものとして、光学ファイバーによ



図 3. 上図:磁場発生とともに測定されたファラデー回転角の 時間発展、下図:点線はピックアップコイルで測定された磁場 値、緑の実線が上図のファラデー回転角から換算された磁場 値. 黒い陰はライナーの断面の時間変化を予測するイラスト. 1200 T は直径 3 mm の空間に発生できたと見積もられた.

る反射型のファラデー回転磁場プローブを考案してセット した(図 2)。この方法は将来 1000 T 領域での物性計測に おいてピックアップコイルに代わるものとして活用できる。

得られた磁場値の時間発展を図3に示す。ライナーの収縮に伴って、放電開始から 40.3µ秒後に 600 テスラを超える。そこで、予測通りピックアップコイルの信号は切れ、 その後は、ファラデー回転による光学検出で磁場増大が追跡され、遂に、40.7µ秒後あたりで 1200 テスラに達しているのが明確に捕えられた。詳しい解析の結果、ライナーの収縮速度が 5 km/秒以上にも達していること、また、 1200 テスラが発生できた磁場空間のボーア径は3 mm 程度と推定された。

旧電源装置を用いて達成した 985 T を得た実験にも同形 のコイルを使用していたので[4]、この実験に比べ装置全 体が最適化された設計により、コンデンサ電源からコイル へのエネルギー伝達効率が上がり、コイル電流の立ち上が り速度が大幅に改善された。このことで 1000 T を優に超 える発生磁場の最高値の 1200 T という大幅な記録更新が 実現できたと言える[5]。

これまで、1000 テスラ以上の磁場は、複雑な構造で構 成され大掛かりな野外実験となる「爆縮法」でしか達成で きていなかった。爆縮法では再現性や磁場発生の制御性な どに問題がある。この度完成させた次世代型超強磁場発生 装置により、磁場発生効率が格段に改善され、1000 テス ラ以上の超強力な磁場を安定して発生できるようになった。 今後、1000 テスラ領域での極限的な超強磁場環境での精 密で信頼性のある物性計測が安定して実現可能となるであ ろう。

本装置で創られる 1000 テスラの磁場は発生時間および 磁場空間を制御できるため、さまざまな物理計測への適用 が広がる。1000 テスラでは物質の中の電子の運動を 1 ナ ノメートルスケールに閉じ込めたり、非常に重たい電子の 運動量(角運動量:スピン)を磁場で制御できるため、物質 の新規な機能の解明に貢献することが期待される。半導体、 ナノマテリアル、有機物質、超伝導体、磁性体、生体物質 などで未解明の固体物理量子現象の解明に、より強力な手 段となり、いよいよ 1000 テスラ超強磁場科学の次世代に 向けた新しい第一歩を踏み出したと実感する。

謝辞

本研究は、2010年および2011年度の文部科学省最先端 基盤事業「次世代最強磁場発生装置の整備」による補助金 と、中村大輔助教、澤部博信技術専門職員はじめ松田康弘 准教授、池田暁彦助教の忍耐強い共同作業と協力の下で達成された。これまでの電磁濃縮超強磁場発生技術開発には 小嶋映二元嶽山研助教の貢献も大きいことを添えたい。

最先端事業においては、東大本部、柏地区共通事務セン ター、物性研事務部の多くの方々による多大な尽力に支え られた。

参考文献

- [1] S. Takeyama, et al., J. Phys. D 44, 425003 (2011).
- [2] A. Miyata, et al., Phys. Rev. Lett. <u>107</u>, 2072031 (2011).
- [3] D. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. <u>84</u>, 044702 (2013).
- [4] D. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. <u>89</u>, 016106 (2018).
- [5] D. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. <u>89</u>, 095106 (2018).

強磁場から見たトポロジカルなスピン構造が織りなす 創発磁気モノポール物性

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 物性研究所 国際超強磁場科学研究施設

物質中に現れる磁気モノポール

磁束密度の湧出しまたは吸込みとして振舞う素粒子、す なわち磁気モノポールは未だに観測されておらず、古典電 磁気学においては存在しないと仮定されて体系化されてき ました。一方で物性物理学においては、擬似的な磁気モノ ポールを創り出すことで、今まで考えられて来なかった新 しい電磁気応答・機能を発見しようという研究が数多くな されています。

物質中に擬似的な磁気モノポールを創り出すには、モノ ポール解を表す $r/|r|^3$ に比例した磁気的性質をもたらす構造 体を、多数の分子や電子・スピンなどを駆使して設計する ことが必要となってきます。例えば、パイロクロア格子上 のイジングスピンが織りなすスピンアイス系や線形電気磁 気効果を示す物質中の点欠陥において、磁場 Hや磁化Mの モノポール型分布が提案・観測されてきました[1,2]。スピ ンアイス系においては 2-in-2-out 状態からの局所的なスピ ン反転を伴う励起状態(3-in-1-out 状態と 1-in-3-out 状態 のペア)が磁場・磁化分布の特異点として振舞ってくれます。 一方で線形電気磁気効果を示す物質中に点電荷とみなせる 欠陥が存在すると、 $M = \alpha E$ に従い点電荷の示す発散型の電 場分布がそのまま磁化分布に転写されます。共通して、秩 序状態における欠陥が古典的な電磁場分布の特異点として振 舞うことを利用してモノポール型構造を創り出しています。

これらの例においては、磁束密度 **B** の発散を伴うディ ラックが導入した磁気モノポールの性質を満たしませんが、 欠陥がトポロジカルな性質を持つと電子の感じるゲージ場 において本来の磁気モノポール構造が現れる可能性が出て きます[3]。ここで紹介するキラル磁性体 MnGe における ヘッジホッグスピン構造は、量子性を備えた磁気モノポー ルとして伝導電子に影響を与え、実際に、数多くの特異な 巨大物性をもたらします[4,5]。

キラル磁性体 MnGe における創発磁気モノポール と磁気抵抗効果

遷移金属と14族元素(Si, Ge, Sn)の1対1の化合物はしばしば B20型構造と呼ばれるキラルな立方晶の結晶構造

金澤 直也、藤代 有絵子、十倉 好紀 三宅 厚志、三田村 裕幸、徳永 将史

を形成します。図1に示したように、[111]軸方向からB20 型結晶を眺めると、原子がらせん階段状に配列していて、 その鏡像は互いに重ね合わせることができないキラルな構 造であることがわかります。一般に反転中心を持たない磁 性体においてはジャロシンスキー・守谷相互作用(DM 相 互作用)が許容され、その対称性を反映した非共線的な磁 気構造(隣り合うスピンの向きが互いに平行にならない構 造)が発現します。MnSi や FeGe といった B20 型磁性体 においては、らせん磁気構造や、同一平面上で変調してい る3つのらせん構造の重ね合わせ状態であるスキルミオン 格子と呼ばれる渦状トポロジカル磁気構造が観測されてい ます[6,7]。



図 1: [111]軸方向から見た B20 型化合物の結晶構造。青・灰色が 遷移金属・14 族元素を表している。

多くの B20 型化合物とは異なり、MnGe においては、 らせん構造の異なる重ね合わせ状態であるヘッジホッグ格 子状態が基底状態として現れます[5,8]。すなわち図2のよ うな、3 つの互いに直交したらせん構造の重ね合わせ状態 となっており、ヘッジホッグや反ヘッジホッグという3次 元のトポロジカルなスピン構造が周期的に配列しています。 ここでトポロジカルな配列とは、特異点を囲む曲面上のス ピンを1点に集めたときにそのスピンの向きが球面をちょ うど整数回覆うことを表しています。

ー般に伝導電子が非共線的なスピン構造と結合して運動 すると、電子はスピンの向きの空間的変調をベリー曲率と いうゲージ場(創発磁場)として感じとります。言い換える とスピン構造は実効的な磁場の源とも考えられ、多種多様 なスピン配列を設計できれば物質中に思い通りの強度や分 布の磁場を描きだすことができるようになります。そして MnGeに現れるヘッジホッグ・反ヘッジホッグ構造が発生 する創発磁場分布は、磁束量子 $\phi_0 = h/e$ の湧出し・吸込 みとなる磁気モノポールのものとなっているという訳です (図 2)。 パルス強磁場下(約30T,10ミリ秒幅)における高速かつ高 精度抵抗測定によって、創発磁気モノポールゆらぎが低温 (10K以上)かつ強磁場(20T以上)の極限環境においても 存在し、高効率な熱-電気変換効果といった創発電磁機能 の堅牢性に寄与していることを明らかにしました[9]。

ゼロ磁場の値で規格化した磁気抵抗効果の測定結果を図 3 に示します。カラーで示したデータは測定した抵抗率、 黒い太線で示したデータは磁化(黒い細線)から見積もった



図 2:3 つのらせん構造の重ね合わせで表されるヘッジホッグ格子状態(左)とそれに現れるヘッジホッグ(黄色)・反ヘッジホッグ(緑) スピン構造と対応する創発磁場分布(右)。

磁場印加によってヘッジホッグ格子が強磁性状態に転移 する場合をトポロジーの観点から考えると、スピン配列を 表すトポロジカル数(上記の通りスピンの向きが球面を覆 う回数)に不連続変化が必ず生じることがわかります。こ の場合では、磁場によってヘッジホッグ(トポロジカル数 +1)と反ヘッジホッグ(-1)の位置が変位し、最終的に対消 減することで非トポロジカル状態である強磁性状態(0)へ と転移します。この磁場印加過程において、ヘッジホッ グ・反ヘッジホッグ構造が対消滅直前で大きなゆらぎを示 し、それに伴い創発磁場ダイナミクスが誘起されることが 理論的に明らかとなり、実験的には数十%にのぼる大きな 正の磁気抵抗効果として観測されました[5]。本実験では、 磁化が揃うことによる従来型の負の磁気抵抗効果をそれぞ れ表しています。そして創発磁気モノポールのゆらぎが引 き起こす電子散乱、すなわち正の磁気抵抗効果はそれら2 つの差分として見積ることができます。その結果、10 K 以上の温度では、強磁性転移と考えられる磁場(破線で表 した磁化曲線に折れ曲がりに対応する磁場)以上の強磁場 においても正の磁気抵抗効果が見られ、温度減少に伴いそ の効果が急激に抑制されていることがわかりました。これ は、強磁場下においても、一部のヘッジホッグ構造が対消 滅せず準安定状態として存在している可能性やヘッジホッ グ構造といった非共線的なスピン構造が熱的に励起されて いることを示唆しています。



図 3: 様々な温度での規格化した磁気抵抗。測定した磁気抵抗(カラー)、磁化(黒細線)、磁化から見積もった従来型の負の磁気抵抗 (黒太線)、創発磁気モノポールのゆらぎがもたらす正の磁気抵抗効果(カラー網掛け)。

まとめ・展望

強磁場下での高精度抵抗測定によって、キラル磁性体 MnGe のヘッジホッグ格子状態が生み出す創発磁気モノ ポール物性が、磁場に対して強く保護されていることを明 らかにできました。またこの堅牢性にはヘッジホッグ構造 の有するトポロジーの性質が重要な役割を果たしているこ とがわかりました。現在ではフライホイールを用いた非破 壊型長時間パルス(ロングパルス)を用いることで、測定精 度を数μΩの高分解能まで向上することに成功しており、 低抵抗の金属物質中を創発磁場の効果で非散逸的に流れる ホール電流も高精度で測定することが可能になりました。 この手法を用いることによって、強磁場まで安定なトポロ ジカル磁気構造がもたらす創発物性の今後の開拓が期待さ れます。

謝辞

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

- C. Castelnovo, R. Moessner and S. L. Sondhi, *Nature* 451, 42-45 (2008).
- [2] D. I. Khomskii, Nature Commun. 5, 4793 (2014).
- [3] G. Volovik, J. Phys. C Solid State Phys. 20, L83 (1987).
- [4] N. Kanazawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 156603 (2011).
- [5] N. Kanazawa et al., Nature Commun. 5, 4793 (2014).
- [6] S. Mühlbauer et al., Science 323, 915-919 (2009).
- [7] X. Z. Yu et al., Nature 465, 901-904 (2010).
- [8] T. Tanigaki et al., Nano Lett. 15, 5438 (2015).
- [9] Y. Fujishiro et al., Nature Commun. 9, 408 (2018).

軟 X 線で決定する物質のバンドトポロジー

- トポロジーは見かけより中身が大事-

極限コヒーレント光科学研究センター 黒田 健太、近藤 猛

概要:

トポロジカル絶縁体を代表とするトポロジカル物質の非 自明なバンドトポロジーは、強いスピン軌道結合によって 生じるバンド反転で決まる。これに伴い、結晶表面に特異 な電子状態が現れることから [1] 、「見かけ(表面)で中身 (バルク)のトポロジーを知る」ことが可能であり、数十 eV 程度の真空紫外光を用いた表面敏感な角度分解光電子分光 (ARPES)で観測される電子状態を表面状態のバンド計算 と比較して、バンドトポロジーの同定が行われてきた。し かしながら、狭ギャップ半導体や半金属などでのバンド計 算では、予測される表面状態やトポロジーが計算パラメー ターに敏感に変化してしまうため、これまで行われてきた 見かけに頼る方法では不十分であった。実際に、La モノ プニクタイドや Ce モノプニクタイドなどの半金属物質で は、全く矛盾した解釈が報告されており [2-4]、「見かけ で中身を知る」測定ではなく、「中身を直接知る」測定が 求められていた。

本研究で我々は、励起光として数百 eV 程度の軟 X 線高 輝度放射光を用いたバルク敏感 ARPES を利用することで、 バンドトポロジーに対する直接的な実験を Ce モノプニク タイドで実現させた [5]。この実験は、Ce モノプニクタ イド物質群 (CeP, CeAs, CeSb, CeBi)のバルク電子構造の 系統的な観察に基づく。そしてプニクトゲンのスピン軌道 結合効果によるバンド反転を直接観ることで、トポロジカ ル相図を実験的に決定するものである。これにより、見か けの測定に頼らない、バンドトポロジーを直接決定する新 たな実験方法を確立した。

実験結果:

実験は大型放射光施設 SPring-8 の高輝度軟 X 線固体分 光ビームライン BL25SU にて開発された高効率・軟 X 線 ARPES 装置を用いて行った。Ceモノプニクタイドの電子 構造は、3 次元ブリルアンゾーンの対称点Γ点にトップを 持つプニクトゲン p 軌道由来のホールバンドと X 点にボ トムを持つ Ce t2g 軌道由来の電子バンドがエネルギー的に 重なっており、キャリア補償型の半金属として特徴づけら れる。そこで、放射光の利点である波長可変性を発揮させ、 それぞれの物質で運動量対称点にあるこれらの電子構造を カットするように軟X線の波長を選択して ARPES 測定を 行った。

図1に軟X線ARPES で得られた半金属的なバルク電子 構造の系統的な変化をまとめた。CePからCeBiまで系統 的に観察することで、プニクトゲンのスピン軌道結合がバ ンド構造に与える効果が見えてくる。スピン軌道結合の小



図 1: 放射光軟X線 ARPES で観測された Ce モノプニクタイドの半金属的なバルク電子構造の系統的な変化。 Γ 点にバンドトップ を持つプニクトゲン p 軌道由来のホールバンドとX 点にバンドボトムを持つ Ce t_{24} 軌道由来の電子バンドが観測されている。図上に フェルミエネルギー (*E*_F) での ARPES 強度の運動量分布 (MDC) をプロットした。CeSb や CeBi では、Sb と Bi の強いスピン軌道 結合とキャリア補償型の半金属バンド効果により、ホールポケット(赤線矢印)と電子ポケット(青線矢印)が形成されている。

さい CeP から CeAs や CeSb に向かって、 Γ 点で観測され たホールバンドが全角運動量 J=3/2 と 1/2 の状態へ分裂し、 スピン軌道結合の大きさを反映してその分裂が大きくなっ ている。X 点においても、ホールバンドのスピン軌道分裂 が観測されており、CeP から CeBi に向かって、分裂が大 きくなると共に高エネルギー側のバンド(赤矢印: X1)が フェルミレベル(E_F)方向に押し上げられていることがわか る。

Ce t_{2g} 軌道由来の電子バンド(青矢印)とそのフェルミポ ケットをX点で観測した。CePやCeAsではポケットは非 常に小さい一方で、CeSb や CeBi では大きくなっている。 このポケットの変化は、スピン軌道結合とキャリア補償型 の半金属バンドの効果として以下のように説明できる。 CePやCeAsと比較して、スピン軌道結合が大きいCeSb やCeBiでは、高エネルギー側に押し上げられた J=3/2の ホールバンドがΓ点でポケットを作り、ホールキャリアが 注入される。そこで物質全体の中性を保つようにこのキャ リアを補償する必要があるため、X点にある電子ポケット が大きくなるように電子バンドが動く。このように、大き なスピン軌道結合はキャリア補償型半金属特有のバンド効 果を伴う。

重要な点は、スピン軌道結合によるバンド構造の変調と これに伴う半金属のバンド効果が相まって CeBiのX点で バンド反転が生じることである。パリティ計算から、X点 で反転した二つバンドは異なるパリティを持っており、



図 2:軟X線 ARPES 測定(図 1)で決定された、X 点のエネル ギーダイアグラムとトポロジカル相図。CeP から CeSb はトポロ ジカルに自明であるが、CeBi ではバンド反転が起こるため非自 明になる。CeSb はトポロジカル相境界の極近傍に位置する。

CeBi はトポロジカルに非自明な状態にあることがわかった。 図 2 に、軟 X 線 ARPES で決定した X 点のエネルギーダ イアグラムとトポロジカル相図をまとめた。このように、 CeP から CeSb はトポロジカルに自明であるが、スピン軌 道結合が充分に大きい CeBi ではバンド反転が起こり非自 明になる。また、CeSb はトポロジカル相境界の極近傍に 位置する。

まとめと今後の展望

バルク敏感な軟 X 線 ARPES を利用して CeX 物質群の トポロジカル相図を実験的に決定した。特に、プニクトゲ ンのスピン軌道結合とキャリア補償型の半金属的なバンド 構造が発端となり、非自明なバンドトポロジーの素になる バンド反転が発生する姿を捉えた。これまで、実験的なト ポロジカル物質群の同定は、表面敏感な真空紫外 ARPES を利用した表面観測に限られていたが、本研究により軟X 線 ARPES 測定の新しい実用性が示された。軟X線 ARPES によるバンド反転観測から、表面に影響されない 物質のバンドトポロジーを直接知ることができるので、今 後の多彩なトポロジカル物質の発見や開発に向けて強力な 実験手法として期待できる。

謝辞

本研究は東京大学工学系研究科の有田亮太郎教授、大阪 大学理学研究科の越智正之博士、理化学研究所の平山元昭 博士、JASRIの室隆桂之博士、東京大学物性研の鈴木博 之博士、辛埴教授、原子力研究開発機構の芳賀芳範博士、 物質材料研究機構の北澤英明博士との共同研究として行わ れました。この場をお借りして御礼申し上げます。

- M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. 82, 3045 (2010).
- [2] L.-K. Zeng et al., Phys. Rev. Lett. 117, 127204 (2016).
- [3] X. H. Niu et al., Phys. Rev. B 94, 165163 (2016).
- [4] N. Alidoust et al., arXiv:1604.08571.
- [5] Kenta Kuroda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 086402 (2018).

Topological superconductivity in iron-based superconductors

Laser and Synchrotron Research Center

ZHANG Peng, 辛 埴

Introduction to Majorana modes and topological superconductors

In a topological superconductor, the opening of the superconducting gap is associated with the emergence of zero energy excitations that are their own antiparticles. These zero-energy states, generally called Majorana zero modes or Majorana bound states, have potential applications in quantum computing. Most of the proposed topological superconductors are realized with spin-helical states through proximity effect to *s*-wave superconductors. However, this approach generally requires complicated hetero-structures and a long superconducting coherence length which in principle prohibits the use of high temperature superconductors.

Topological superconductivity in high-T $_{\rm c}$ iron-based superconductors

In this work, we show that the Fe-based superconductor FeTe_{0.55}Se_{0.45} single crystals host topological superconducting states at the surface, paving a distinct route for realizing topological superconductivity and Majorana bound states at higher temperatures.

Fe(Te,Se) has the simplest crystal structure among Febased superconductors (Fig. 1A). First-principles calculations show that, along ΓZ , the p_z band has a large dispersion; near EF, SOC causes an avoided crossing with the d_{xz} band, and a SOC gap opens (Fig. 1B). This band inversion results in a non-trivial topological invariance. Thus, FeTe_{0.5}Se_{0.5} should host strong topological surface states near EF. To show the predicted topological surface states clearly, we project the band structure onto the (001) surface, as shown in Fig. 1C. The Dirac-cone type surface states are located near EF, inside the SOC gap between the bulk valence band and bulk conduction band.

Three evidences are necessary to experimentally prove



Fig. 1 (A) Crystal Structure of Fe(Te,Se). (B) Bulk band structure along ΓZ direction. (C) Calculated (001) surface spectrum.

that $\text{FeTe}_x \text{Se}_{1-x}$ ($x \sim 0.5$) is a topological superconductor, and they are all confirmed by our high-resolution ARPES experiments:

(i) *Dirac-cone-type surface states*. The overall band structure from the high resolution ARPES is summarized in Fig. 2A. We obtained clear Dirac-cone type band together with parabola-like band. Compare with the theory calculations, we conclude that the Dirac-cone-type band is the topological surface band, and the parabolic band is the bulk valence band.



Fig. 2 (A) Intensity plot of the Fe(Te,Se) band structure from high-resolution ARPES measurements. (B) Polar representation of the superconducting gap size. (C-D) Spin polarization curve at the two cuts indicated in A.

.....

(ii) Helical spin polarization of the surface states. Two curves at the cuts indicated in Fig. 2A were measured. The spin-resolved data show that the spin polarizations are reversed for the two cuts at the Dirac cone, whereas the background shows no spin polarization (Fig. 2CD). These data are consistent with the spin-helical texture, which is the direct consequence of "spin-momentum locking" of topological surface states.

(iii) An s-wave superconducting gap of the surface states. Since iron-based superconductors generally have isotropic s-wave superconducting gaps, it is natural that the surface states also open an s-wave gap, due to the proximity effect from bulk. Indeed, we observed a clear s-wave gap on the surface band, as shown in Fig. 2**B**.

Majorana modes in iron-based superconductors

When the spin-polarized topological surface states open an *s*-wave gap, the corresponding superconducting states are topologically non-trivial. Thus, when an external magnetic field is applied, a pair of Majorana bound states is expected to appear at the two ends of the vortices. Furthermore, if a magnetic domain is deposited on the surface, destroying superconductivity within that domain, there should be itinerant Majorana modes along the domain edge. It should be fairly easy to produce



Fig. 3 (A) Topological superconductivity on the surface of $FeTe_{0.55}Se_{0.45}$. (B) Existence of Majorana bound states and itinerant modes with vortices and magnetic domains.

Majorana bound states and Majorana edge modes with Fe(Te,Se) single crystals. The relatively high T_c and facile growth of high-quality single crystals and thin films make Fe(Te,Se) a promising platform for studying Majorana bound states and may further advance research on quantum computing.

References:

- [1] P. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. 105, 172601 (2014).
- [2] Z. Wang et al., Phys. Rev. B 92, 115119 (2015).
- [3] P. Zhang et al., Science 360, 182 (2018).
- [4] P. Zhang et al, Nature Phys. 15, 41 (2019).
- [5] D. Wang et al., Science 362, 333 (2018).

平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則

東京大学物性研究所 杉浦 祥*1、中川 裕也*2、藤田 浩之 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 渡邉 正隆 *1 現:ハーバード大学 *2 現:株式会社 QunaSys

①研究の背景

量子力学とは原子一つ一つのようなミクロな世界を記述 する物理理論です。他方、熱力学とは金属や液体のように 原子や分子が集まった物質においてマクロで普遍的な性質 に着目する理論的です。物理学の根幹をなすこの2つの理 論間の対応関係は、20世紀初頭の量子力学の黎明期から 研究されてきました。特に、外界から切り離された環境に おいて、量子純粋状態の性質を熱力学で予言できるかとい う問いは、理論的な興味はもちろん、冷却原子を使った実 験との対応からも、近年重要な課題となっています。

このようなミクロとマクロの対応の研究に重要になるの が、量子もつれです[1]。量子もつれは、量子状態を 2 つ の領域に分割した時に、その2つの間に生じる量子力学的 な相関の事です。具体的には、量子力学的な重ね合わせが その2つの領域にまたがって広がっている時に生じます。 量子もつれは量子力学に基づく現代物理学の様々な分野を 貫く基礎的な概念です。例えば、量子系の効率的なシミュ レーションや量子テレポーテーション、ブラックホールの 蒸発現象など、様々な現象が量子もつれによって理解でき ます。

量子純粋状態を用いた熱力学では、量子もつれの量が熱 力学的なエントロピーに対応します[2]。従って、熱力学 エントロピーの増大によって実現する熱平衡化は、量子力 学から説明すると系全体に量子もつれが広がることで起こ る現象と言うことが出来ます。

②研究の内容

我々のグループは、熱平衡状態を表すような量子純粋状 態における量子もつれの空間分布を研究しました。量子純 粋状態を空間的に二つに分けた時に、その領域間に存在す る量子もつれの量(エンタングルメント・エントロピー)が どのような性質を持つかを調べました(図 1)[3][4]。

まず、熱力学系との厳密な対応が確立されている量子純 粋状態である canonical thermal pure quantum state (cTPQ)に基づき、エンタングルメント・エントロピーの 空間分布を表す一般的な関数を理論的に導出しました。そ して孤立量子系のエネルギー固有状態と定常状態とが持つ 量子もつれの空間分布に対して、我々の導出した関数が共 通してよく当てはまることを、数値シミュレーションを用 いて確認しました。

エネルギー固有状態は、ある意味で熱平衡状態と非常に 近い事が知られています。つまり、任意のエネルギー固有 状態を用いて局所的な物理量の期待値を計算すると、非可 積分系と呼ばれるクラスの系において、その値が熱平衡状 態と一致する値を示す事がよく確かめられています(エネ ルギー固有状態熱平衡化仮説、ETH と呼ばれる[2])。反 対に、可積分系の場合には、固有状態を用いた期待値の値 は熱平衡状態からずれを持つことも知られています。我々 の数値シミュレーションでは、我々の理論が非可積分系の エネルギー固有状態の正しいエンタングルメント・エント ロピーの空間分布を与え、可積分系では与えないことを示 しました。つまり、ETH がエンタングルメント・エント ロピーに対しても成立していることを我々は新たに示しま した。



図1 量子もつれの空間分布の概念図。物質をAとBの2つに 分けた時に、AとBの間にどのくらいの量子もつれが生じてい るかを縦軸に、物質Aの長さを横軸にプロットしてある。

次に、定常状態は量子純粋状態を孤立させたまま時間発展させ、物理量の期待値の揺らが小さくなるまで待った後の状態であり、孤立量子系の実験で観測されている状態です[5]。これらの状態に対しては、系の可積分・非可積分に関わらず、状態が十分に混ぜ合わされたのならば我々の関数がエンタングルメント・エントロピーの分布を正しく与えることを数値的に示しました。定常状態における量子純粋状態のエンタングルメント・エントロピーは実験で測られており、我々の研究はそれらの実験の理解に大きく資する結果です。

これらにより、熱力学系と対応した量子純粋状態におけ るエンタングルメント・エントロピーが、系の詳細によら ない普遍的な性質を持つことが示されました。 さらに、得られた関数とその普遍性を利用し、量子純粋 状態における熱力学の探求において近年重要な概念となっ ている Eigenstate thermalization hypothesis (ETH)相と Many-Body Localization (MBL)相の間の相転移を調べま した。ETH 相と MBL 相の転移はスケーリング理論によ り臨界係数と呼ばれる量により普遍的に記述されると考え られています。しかし、従来の数値計算では臨界係数が理 論で許される下限より小さな値を与える事が問題となって いました[6]。この転移に対して、我々の理論を用いて解 析を行う事で、臨界係数の見積もりが改善することを示し ました。



図2 様々なエネルギーでのエネルギー固有状態の持つエンタングルメント・エントロピーの空間分布。Non-integrable(非可積 分系)では数値シミュレーション結果(点)と理論値(線)がよく一致している。反面、Integrable(可積分系)ではずれが見られる。



図 3 エンタングルメントを持たない量子純粋状態から出発した エンタングルメントエントロピーの時間発展。ごく短時間(t=5) でエンタングルメントエントロピーのシミュレーション結果(点) が理論値(点線)に一致するようになる事が分かる。

③今後の展開

この研究は、量子力学と熱平衡化現象の間のギャップを 埋める基礎的な結果の一つです。外界と切り離された孤立 量子系は従来、理論上のみの概念でしたが、近年では、冷 却原子やイオントラップといった系において実験的に可能 となっており、ミクロな量子力学から熱力学を構築すると いう統計物理学の究極の目標の実現に向け、重要な手がか りを与えると期待されます。

本研究は、量子純粋状態からの熱力学の構築にとって必 要不可欠な、孤立系における量子もつれの理解を深めるも のであり、本研究で見出された量子もつれの普遍的な関数 は、実験データの解析に大きく資するものと考えられます。 また、孤立系の量子もつれは近年、ブラックホールの情報 消失問題など量子重力分野においても重要となっており、 物性、統計物理学と素粒子物理学の共通課題となりつつあ ります。本研究は物性統計力学・素粒子の両分野に適用可 能な基本的な成果であり、分野を越えた共同研究は今後さ らなる成果を上げていく事が期待されます。

- M. A. Nielsen, and I. L. Chuang, 2000, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge University Press, Cambridge)
- [2] L. D'Alessio, Y. Kafri, A. Polkovnikov, and M. Rigol, Adv. Phys. 65, 239 (2016).
- [3] Y.O. Nakagawa, M. Watanabe, S. Sugiura and H. Fujita, Nature Commun. 9 1635 (2018).
- [4] H. Fujita, Y.O. Nakagawa, S. Sugiura, and M. Watanabe, J. Hep. 18, 112 (2018).
- [5] A. M. Kaufman, M. E. Tai, A. Lukin, M. Rispoli, R. Schittko, P. M. Preiss, and M. Greiner, Science 353, 794 (2016).
- [6] A. Chandran, C. R Laumann, and V.Oganesyan, arXiv, 1509.04285 (2015).

バルク結晶と薄膜結晶で異なるスピン状態を直接観測 ~スピン状態の判別に有効な計測手法を確立~

極限コヒーレント光科学研究センター 横山 優一* 和達 大樹 (*現:国立研究開発法人物質・材料研究機構 NIMS ポスドク研究員)

遷移金属酸化物では電子同士の強い相互作用によって電 子・スピン・電子軌道の形が多彩な秩序状態を作る。なか でも、ペロブスカイト型ランタン・コバルト酸化物 (LaCoO₃)では、電子間の相互作用と電子と格子の相互作 用が競合することで、コバルトイオンはさまざまな電子状 態をとり得る。コバルトイオンの電子状態はスピンの大き さが異なる状態となり、低スピン状態、中間スピン状態、 高スピン状態という3つのスピン状態が現れる(図1(a))。 磁気特性の測定から、高い温度領域では高スピン状態、極 低温では低スピン状態になると考えられている。その中間 の温度領域では、中間スピン状態になっている可能性や高 スピン状態と低スピン状態が混在している可能性が報告さ れていたが、スピン状態を直接的に観測する計測手法が無 かったため、長年の間、未解明のまま謎に包まれていた。 近年になって、基板上にエピタキシャル成長させた薄膜試 料が作製され、基板からの歪みの効果によってバルク結晶 とは異なるスピン状態が実現している可能性が示唆された [1]。 歪みの効果によるスピン状態変化を明らかにするこ とができれば、バルク結晶まで含めたスピン状態の全体像 解明に繋がると期待できる。



図1:(a) コバルトイオン(3価)のスピン状態。eg軌道に入る電子 数によって異なる3 つのスピン状態(低スピン状態・中間スピン 状態・高スピン状態)になり得る。(b) LaCoO₃薄膜のX線吸収ス ペクトル。基板の方位が異なる薄膜では、異なる大きさのエピタ キシャル歪みが生じている。

そこで、LaCoO3の共鳴軟X線非弾性散乱の測定を東大 物性研ビームライン SPring-8 BL07LSU に設置されてい る超高分解能共鳴軟 X 線非弾性散乱装置(HORNET) [2] で行った[3]。コバルト2p→3dの吸収が起こる780 eVの エネルギーをもつ軟 X 線を照射し、散乱された軟 X 線の エネルギーの非弾性散乱スペクトルを測定した。試料に吸 収されたエネルギーの一部は電子配置を変化させることに 使われ、スピンの大きさも変化するため、非弾性散乱スペ クトルからコバルトイオンのスピン状態を調べることがで きる。また、スピン状態と非弾性散乱スペクトルの対応関 係を明らかにするため、不純物アンダーソンモデルによる 理論計算を行い、その理論計算と実験結果と比較すること でコバルトイオンのスピン状態を推定した。スピン状態を 見分けるためには高いエネルギー分解能が必要となるが、 国内最高のエネルギー分解能(~300 meV)での実験が可能 な本装置によってスピン状態を解明することに成功した。



図2:LaCoO₃バルク結晶と薄膜結晶におけるコバルトL端の共鳴 非弾性散乱スペクトル。理論計算との比較から、▲は高スピン、 ▼は低スピン、■は歪んだ高スピンを特徴づけるピークである。

測定に用いた試料は、LaCoO3のバルク単結晶と LSAT 基板上に成長させた薄膜結晶[1]である。薄膜結晶の膜厚 は 30 nm で、基板の方位を変えることで異なる歪みの大 きさを実現した。実験では、それぞれの試料に対してコバ ルトイオンの吸収スペクトル(図1(b))と共鳴非弾性散乱ス ペクトルを測定した。これまでの研究からバルク結晶と薄 膜結晶は異なるスピン状態であると考えられているが、吸 収スペクトル形状において歪みに依存する明確な違いは見 られなかった。今回得られた非弾性散乱スペクトル(図 2) ではエネルギー損失が1 eV 付近のスペクトル形状に大き な違いが観測され、理論計算で求めたスペクトル形状と比 較することでスピン状態の構成成分と割合が違うことが明 らかになった。具体的には、LSAT(110)基板上ではすべ てが高スピンであるが、歪みによって対称性が低くなった 高スピン状態が加わっているため、高スピンと低スピンの 重ね合わせで得られるほかのスペクトルとは全く違う状態 となっている。このように、吸収測定では判別できなかっ たスピン状態を非弾性散乱測定によって明らかにすること に成功している。

- J. Fujioka, Y. Yamasaki, H. Nakao, R. Kumai, Y. Murakami, M. Nakamura, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. **111**, 027206 (2013).
- [2] Y. Harada, M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Senba, H. Ohashi, T. Tokushima, Y. Horikawa, S. Shin, and M. Oshima, Rev. Sci. Instrum. 83, 013116 (2012).
- [3] Y. Yokoyama, Y. Yamasaki, M. Taguchi, Y. Hirata, K. Takubo, J. Miyawaki, Y. Harada, D. Asakura, J. Fujioka, M. Nakamura, H. Daimon, M. Kawasaki, Y. Tokura, and H. Wadati, Phys. Rev. Lett. 120, 206402 (2018).

15 物性研だより第 58 巻第 3 号

プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態

1. はじめに

半導体ヘテロ接合界面やグラフェン中にできる2次元電 子系に磁場を印加することにより現れる現象の中で、最も よく知られているものは量子ホール効果であろう。整数量 子ホール効果は、ある磁場範囲にわたり(あるいは、磁場 を固定して電子濃度を掃引する場合には、ある電子濃度範 囲にわたり)、対角抵抗がゼロとなり ($R_{xx} = 0$)、ホール抵 抗が高い精度で基礎物理定数のみで決まる値となる(Rxv = $R_{\rm K}$ / p, p = 1,2,3,..., $R_{\rm K}$ = h/e² = 25812.807 Ω はフォン・ クリッツィング定数で、電荷素量 e とプランク定数 h のみ で決まっている)現象である。このホール抵抗値は抵抗標 準として利用されているほか、微細構造定数の導出にも用 いられている。この現象には、試料内部(バルク)が局在状 態(絶縁体)となり、試料端にのみ、一方向にのみ電子が移 動できる(すなわちカイラリティーを持つ)1 次元的な無散 逸伝導チャンネル(エッジ状態)が形成されることが重要な 役割を果たしている。エッジ状態は、後方散乱無く電荷や スピンを伝播させ得るチャンネルとしても注目され、応用 を視野に入れた研究もなされている。バルクとエッジの関 係が示唆する通り、整数量子ホール効果は、近年爆発的に

ナノスケール物性研究部門 遠藤 彰、勝本 信吾

研究されているトポロジカル絶縁体の、最も歴史の古い一 形態とみなすことも出来る。

磁場中2次元電子系の高周波での実験的研究法の一つと して、コプレーナ型導波路を用いる手法がある。コプレー ナ型導波路とは同軸ケーブルを平面に切り開いたようなも ので、半導体2次元電子系の基板表面に設置された導波路 を伝播するマイクロ波と基板に埋もれた2次元電子系との 相互作用を通して2次元電子系の情報を得る。2次元電子 系は伝導率が高いほどマイクロ波を良く吸収するので、マ イクロ波透過率は2次元電子系の高周波伝導率の周波数依 存性の測定に用いられている[1]。マイクロ波吸収により2 次元電子系が局所的に加熱されることに着目し、熱起電力 の測定にも利用された[2]。また、マイクロ波照射により 多体状態が励起されることから、ウィグナー結晶・バブル 相・ストライプ相といった、磁場下2次元電子系バルク中 に形成される、強い電子間相互作用に起因する種々の電子 固体相の振動モード(ピニングモード)の研究にも用いられ てきた[3]。本研究はこの手法を、量子ホールエッジ状態 の研究に応用したものである[4]。



図1. (a) 試料と測定法の概略。2DEG:2次元電子系、CPW: コプレーナ型導波路、CE: 中央電極、SE: 側電極。CE に負バ イアスを印加しスロット部にエッジを導入する。マイクロ波透過率および(図示されていない)オーミック電極間に発生する 熱起電力を測定する。(b) エッジ付近の拡大図。平面図(上図)と電子濃度 n(x)の位置 x 依存性(下図)。a: 空乏長。w: エッジ 状態幅。エッジ状態は交互に並ぶ圧縮性(青)・非圧縮性(黄色)の帯からなり、w は全体の幅。

2. 試料と実験方法

図 1(a)に試料と測定法の概略を示す。GaAs/AlGaAs へ テロ接合界面直下に 2 次元電子系(2DEG)を含む半導体基 板を用い、その表面上に電子ビームリソグラフィーを用い た微細加工技術でコプレーナ型導波路(CPW)を設置する。 マイクロ波は主として CPW の中央電極(CE)と両側の接地 電極(SE)との間隙部分(slot)直下の 2DEG に吸収されるの で、測定はこの部分の 2DEG への感度が高い。本研究で は、バイアス・ティー(Bias Tee)を経由して CE に負バイ アスを印加し、すなわち CE をゲート電極としても利用し、 CE 直下の電子を排除することにより静電的にエッジ状態 を、高感度で測定される slot 部へ導入する。マイクロ波透 過率の周波数依存性を測定することにより、エッジ状態で の励起が観測できる。また、図示されていないが、2DEG に直接電気的に接触しているオーミック電極が取り付けら れており、マイクロ波吸収により発生する熱起電力の測定 も可能となっている。後述するように、熱起電力からも透 過率と同様の情報を、より高い感度で得ることができる。 測定は、超電導マグネットを備えた希釈冷凍機中(ベース 温度~20 mK)で行った。

3. 実験結果

図 2 に典型的な測定結果を示す。ランダウ準位充填率 $v_0 = 4$ の整数量子ホール効果での測定結果である。図 2(a) はマイクロ波透過率 ΔT を CE に印加した負バイアス V_g と マイクロ波周波数 fに対してプロットしたものである。 V_g 印加とともに CE 直下の電子は減少し、閾値を超えると ($V_g < -0.44$ V)電子はいなくなり slot 部にエッジ状態が導入 される。それと同時に ΔT に明瞭なピークが観測され、更 に大きな負バイアスを加えていくとピークは高周波数側に

シフトしていく。これらのピークはエッジ状態へのプラズ マ振動励起である「エッジ・マグネトプラズモン」励起に よるものと解釈される。一番低い周波数の基本モード fo、 および高調波 ifo(i=2,3,...)が観測されている。負バイアス 増加による高周波側へのシフトはプラズモンの伝播速度の 増加に因るものである。伝搬速度は主として CE とエッジ 状態間の静電結合の強さにより決まる。速度増加は、より 負の Vgによりエッジ状態が CE から遠ざけられた (空乏長 a が増加した)ことの帰結である。静電的な理論[5][6]によ り、本実験に用いた2次元電子系基板の試料パラメータを 用い空乏長 aやエッジ状態幅 wを計算し、それらを用いさ らに基本モードの周波数foを導出したものを図2(a)に黄色 い太線でプロットしてある。実験のピークを非常に良く再 現していることがわかる。同等のエッジ・マグネトプラズ モンはvo = 2 から 18 までの他の整数量子ホール効果でも 観測され、foは同様の計算ですべて良く再現出来た。充填 率が大きくなると(すなわち低磁場になると)エッジ状態幅 が急激に増加することが計算から予測されるが、これが実 験的に裏付けられたことになる。図 2(a)をよく見ると -0.44 V < Vgの領域にもピークは継続しているのが見える。 CE 下の電子が完全に無くならなくても、電子濃度が異な る slot 部との境界にエッジ状態は出来、エッジ・マグネト プラズモンは励起され得る。このような状況でのエッジ・ マグネトプラズモンが観測されたのは、筆者らの知る限り 本研究が初めてである。この領域での Vg による fo の微妙 な増減は、CE下が量子ホール状態(局在状態)にあるか非局 在状態にあるかの違いによるスクリーニングの変化で定性 的に説明できる。図 2(b)に示す熱起電力からも、基本的に 図 2(a)のΔT と同等の情報が得られる。マイクロ波吸収の増 減が直接温度勾配の増減に反映されるため、と考えられる。



図 2. ランダウ準位充填率 $v_0 = 4$ 整数量子ホール効果でのバイアス V_g – 周波数 f 依存性の測定結果。(a) マイクロ波透過率 ΔT 。 黄色い太線は計算から求めたプラズモン励起周波数の V_g 依存性。(b) 熱起電力 V_1 。

熱起電力の測定では試料と無関係な配線等の影響を軽減で きるため、ノイズやバックグランドが小さく、ピークがよ り明瞭に観察される場合が多い。

4. まとめ

コプレーナ型導波路の間隙部に静電的に試料端を導入し、 マイクロ波透過率、または熱起電力を測定することにより、 量子ホールエッジ状態でのエッジ・マグネトプラズモンを 観測できることを明らかにした。励起周波数は空乏長、 エッジ状態幅に依存するため、本測定は、通常の抵抗測定 では得ることのできない試料端付近のこれら特徴的長さの 実験的探索を可能とし、量子ホールエッジ状態に関する基 礎的な知見をもたらす手法である。プラズモンをデバイス 応用するために制御する際の指針を与えることも期待され る。

参考文献

- L. W. Engel, D. Shahar, Ç. Kurdak, and D. C. Tsui, Phys. Rev. Lett. **71**, 2638 (1993).
- [2] S. Kobayakawa, A. Endo, and Y. Iye, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 053702 (2013).
- [3] 例えば H. Zhu, G. Sambandamurthy, L. W. Engel,
 D. C. Tsui, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev.
 Lett. 102, 136804 (2009).
- [4] A. Endo, K. Koike, S. Katsumoto, and Y. Iye, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 064709 (2018).
- [5] D. B. Chklovskii, B. I. Shklovskii, and L. I. Glazman, Phys. Rev. B 46,4026 (1992).
- [6] I. A. Larkin and J. H. Davies, Phys. Rev. B 52, R5535(R) (1995).

固体結晶からの高次高調波発生の偏光分解測定 ~ 高調波の偏光に電子状態の異方性が映し出されることを実証~

極限コヒーレント光科学研究センター 石井 順久、板谷 治郎

研究背景

近年、極短パルスレーザー技術の発展により、フェムト (10⁻¹⁵) 秒の持続時間を有する高強度光パルスが中赤外領 域(光の波長で3-10 μmの帯域) で発生可能である。そ のピーク電力は1GW に達し、光を集光することで10 GV/m 以上の電場強度が達成可能になっている。中赤外光 パルスの光子エネルギーは、半導体や絶縁体のバンド ギャップエネルギーに比べ十分低いため、試料を破壊する ことなく、数GV/m程度の高強度電場が印加可能である。 この値は、直流電場による典型的な絶縁耐力である10-100 MV/m を二桁以上上回り、今までにない強電界下で、 固体の応答が観測可能になりつつある。

2010年にスタンフォード大学の研究グループが、高強 度電場下での固体の極端非線形応答の先駆けとなる実験を 行った。高強度赤外レーザーを照射した酸化亜鉛結晶から、 赤外レーザーの光周波数の 25 倍までの周波数成分を持つ、 高次高調波と呼ばれる光放射が観測された [1]。高調波の 光子エネルギーは 9 eV 程度まで達しており、酸化亜鉛の バンドギャップエネルギーを超えている。この実験以来、 世界各地で固体高調波発生や強電場下での過渡吸収測定等 の実験が行われている。しかし、これまでの実験では、物 質と光電場共に1次元的に取り扱っており、3次元の自由 度を有する試料と2次元の偏光状態を有する光電場の相互 作用を記述するには不十分であった。本研究では、中赤外 光パルスを照射したセレン化ガリウム結晶(Gallium Selenide, GaSe)からの高次高調波の偏光を分解して測定 した。高調波の偏光状態は結晶方位に依存し、その依存性 が、最も低いエネルギーの伝導帯の曲率テンソルによって記述 できることを示した(物性研プレスリリース、http://www.issp.utokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=5281)[2]。

研究内容

板谷研究室で開発した波長 5 μm の高強度中赤外レー ザー[3]を集光し、1 GV/m 程度の電場を GaSe 結晶に印加 した。高次高調波スペクトルを偏光分解(直線偏光の赤外 電場に平行と直交する2成分に分解)し、その結晶方位依 存性を測定した(図 1)。偶数次高調波の平行・直交成分は いずれも 60 度の周期を呈し、奇数次高調波の場合は平行 成分が 60 度、直交成分が 30 度の周期を呈することを見出 した。偶数次高調波は、GaSe 結晶(図 2(a)参照)の反転対



図 1. 高次高調波スペクトルの偏光分解測定と結晶方位依存性



図 2. (a) セレン化ガリウムの結晶構造、(b) 最低伝導帯のバンド図、(c) 平行偏光成分を担うバンド曲率、(d) 直交偏光成分を担うバンド曲率

称性を考えることにより、60 度周期になることが理解で きる。しかし、奇数次(特に3次)の直交偏光成分は、古典 的な非線形光学では説明できない。さらに、その周期が 30度であることは、GaSeが六方晶系に属することと直感 的に相反する結果となった。

奇数次高調波(特に直交偏光成分)の結晶方位依存性の物 理的起源は明らかでなく、簡便なモデルを用いて説明を試 みた。そのモデルは、最も低いエネルギーの伝導帯のブリ ルアンゾーン内(図2(b))を電子が2次元的に運動し、それ によって生じるバンド内電流によって高調波が発生すると いうものである。このモデルでは解析的に発生する高調波 を求めることが可能で、その結果、固体から発生する放射 はバンドの曲率と関係があることがわかった。バンドの曲 率は逆有効質量に比例し、本実験条件下では2階のテンソ ルで書くことができる。この曲率テンソルの2個の成分で、 それぞれ平行偏光成分(図2(c))と直交偏光成分(図2(d))が 表せることが明らかになった。波長 5 μm で 1 GV/m の高 強度電場を加えた時、電子の運動範囲は図 2(c, d)の黒実線 円内で表される異方性が強い部分に到達する。その結果、 平行偏光成分では 60 度周期が、直交偏光成分では 30 度周 期が現れることが示された。

前述のモデル解析に加え、第一原理計算によって、固体 からの高次高調波発生のシミュレーションを行った。まず 初めに、基底の電子状態を求め、中赤外電場を印加し、 系の時間発展を精密にシミュレーションし、双極子輻射 としての固体からの放射を求めた。その結果(図 3)は、 以下の3点において実験を良く再現している、1. 偶数次 (両偏光方向)の結晶方位角依存性の60度周期、2. 奇数次 の平行偏光成分の60度周期、3. 奇数次の直交偏光成分の 30度周期。第一原理計算では2種類の放射源(バンド内電 流とバンド間電流)の高調波発生への寄与について分解す ることが可能である。その結果、偶数次高調波ではバンド



図3.3次元量子計算による偏光分解した高次高調波スペクトルの結晶方位角依存性

間電流のみが、奇数次高調波では両成分が寄与することが 明らかになった。特に GaSe では、9 次以下の奇数次高調 波でバンド内電流の寄与が強いことがわかり、前述の解析 的なモデルの適応が可能であることが示された。

まとめと展望

本研究では、高強度中赤外電場を印加された固体結晶 から放射される高次高調波の2次元偏光状態を測定した。 高次高調波の偏光状態と試料のバンド曲率の異方性を結び つきを明らかにした。将来的には、発生した高次高調波の 偏光状態に加えて、時間波形を測定することにより、バン ドの形状を再構築することが可能になると期待される。バ ンド構造決定において全光学的手法を用いることができれ ば、従来用いられている光電子分光を適用できない、高圧 力、高磁場、高電場下の極限状態や、過渡的な状態におい てもバンド構築が可能になると期待される。

謝辞

本研究は金島圭佑特任助教(研究当時・東京大学理学系 研究科物理学専攻博士課程学生、現・北海道大学工学研究 院応用物理学部門)、篠原康特任助教(東京大学工学系研究 科附属光量子科学研究センター)、竹内健吾氏(研究当時・ 東京大学理学系研究科物理学専攻修士課程学生)、今坂光 太郎氏(東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課 程学生)、梶智博氏(研究当時・東京大学大学院工学系研究 科物理工学専攻修士課程学生)、芦原聡准教授(東京大学生 産研究所)、石川顕一教授(東京大学大学院工学系研究科原 子力国際専攻)との共同研究として行われました。ここに 感謝申し上げます。物性研究所の加藤岳生准教授、秋山英 文教授、京都大学の田中耕一郎教授にご助言をいただきま したことを感謝申し上げます。

参考文献

- S. Ghimire, A. D. DiChiara, E. Sistrunk, P. Agostini, L. F. DiMauro, and D. A. Reis, "Observation of highorder harmonic generation in a bulk crystal," Nature Physics 7, 138–141 (2010).
- [2] K. Kaneshima, Y. Shinohara, K. Takeuchi, N. Ishii, K. Imasaka, T. Kaji, S.Ashihara, K. L. Ishikawa, and J. Itatani, "Polarization-Resolved Study of High Harmonics from Bulk Semiconductors," Phys. Rev. Lett. 120, 243903 (2018).
- [3] K. Kaneshima, N. Ishii, K. Takeuchi, and J. Itatani, "Generation of carrier-envelope phase-stable midinfrared pulses via dual-wavelength optical parametric amplification," Opt. Express 24, 8660– 8665 (2016).

市村学術賞、船井学術賞を受賞して

この度、公益財団法人・市村清新技術財団の第 50 回市 村学術賞、公益財団法人船井情報科学振興財団の第17回 船井学術賞を2018 年4月に受賞致しました。市村学術賞 は産業技術総合研究所の野崎隆行氏及び京都大学の塩田陽 一氏との共同受賞、船井学術賞は単名での受賞ではありま すが、文献[1]-[5]をはじめとした共同研究成果が評価さ れたものです。この場をお借りして大阪大学の鈴木義茂氏、 石橋翔太氏、松田健彰氏、塚原拓也氏、河辺健志氏、 Frederic Bonell 氏、冨田博之氏、小西克典氏、塩田陽一 氏、縄岡孝平氏、後藤穣氏、田村英一氏、産業技術総合研 究所の湯浅新治氏、福島章男氏、久保田均氏、薬師寺啓氏、 野崎隆行氏、今村裕志氏、谷口知大氏、東北大学の白井正 文氏、辻川雅人氏、高輝度光科学研究センターの中村哲也 氏、鈴木基寛氏、小谷佳範氏、豊木研太郎氏、物質・材料 研究機構の宝野和博氏、大久保忠勝氏らをはじめとした共 同研究者の皆様に深く感謝致します。また賞は過去の業績 を評価するものではありますが、私のような若輩者にとって は当然のことながらこれからの期待料を多分に含んでいるこ とと思います。これから東京大学物性研究所において、今ま で以上に身を引き締めて教育研究に邁進したいと思います。



量子物質研究グループ 三輪 真嗣

残りの紙面を使って、今回の受賞対象となった研究内容 を紹介します。受賞対象となった研究は「超省電力スピン 制御技術の開拓と応用展開」及び「ナノ磁性体における電 気的スピン制御のデバイス応用に関する研究」です。端的 に申し上げると電流電圧をナノサイズの小さな磁石に印可 して磁極を操作することにより電子部品を作ろう、といっ た内容です。

私たちは超高真空において金属を原子層レベルで精密に 積み重ねる技術を駆使して特徴的な異種材料接合を有する 新物質を作製してきました。特に電子デバイスなどへの応 用を目指した、スピンを電気的に制御するスピントロニク ス材料の研究を開拓してきました。主な業績のひとつは金 属ナノ磁石の電気応答に対する非線形効果の発見です。こ れは Fe と MgO の界面にある垂直磁気異方性(磁極の向き やすさ)を利用し、スピントルク(電流電圧が磁極の運動に 与える影響)の効率を最大化することにより実現しました。 我々はこれを非線形スピントルクダイオード効果と呼んで いますが、これにより半導体ショットキーダイオードのマ イクロ波検波感度の3倍を有するスピントロニクスデバイ スを室温で実現しました。もうひとつの業績は金属ナノ磁 石における電界効果の機構を放射光の利用により解明した ことです。具体的には電界効果の起源がキャリアドーピン グである軌道磁気モーメント機構とキャリア再配列である 電気四極子機構であることを見出しました。FeやCo等の 3d 強磁性金属では前者が、Pt 等の 5d 遷移金属では両者 が大きな寄与を有することを実験的に初めて示し、大きな 電界効果を示す材料設計指針を打ち立てました。

これまでは Fe や MgO といった単純物質の研究をして きましたが、これからは量子物質をはじめとした少し複雑 な物質のデバイス物性研究を行いたいと考えています。こ れからもよろしくお願い致します。

- S. Miwa *et al.* "Highly sensitive nanoscale spintorque diode" Nat. Mater. 13, 50 (2014).
- [2] S. Miwa *et al.* "Strong bias effect on voltage-driven torque at epitaxial Fe/MgO interface" Phys. Rev. X 7, 031018 (2017).

- [3] S. Miwa *et al.* "Voltage controlled interfacial magnetism through platinum orbits" Nat. Commun.
 8, 15848 (2017).
- [4] T. Kawabe et al., "Electric-field-induced changes of magnetic moments and magnetocrystalline anisotropy in ultrathin cobalt films" Phys. Rev. B 96, 220412(R) (2017).
- [5] S. Miwa *et al.* "Perpendicular magnetic anisotropy and its electric-field-induced change at metaldielectric interfaces" J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 063001 (2019). [Topical Review].

NESMCQ18 Poster prize を受賞して

2018 年 8 月にイタリアはエーリチェにて開催された国 際研究会、New Trends in Nonequilibrium Statistical Mechanics: Classical and Quantum Systems (NESMCQ18) にて、"Quantized pumping via a single-level quantum dot in coherent transport region"という題目でポスター 発表を行い、The NESMCQ18 Poster prize を受賞させて いただきました。

この研究会では、非平衡物理をキーワードとして古典 系・量子系の枠を超えて研究者が集まり、理論・実験にお ける最新の進展や問題意識について活発な議論が行われま した。受賞対象となった講演は、ナノスケールの回路素子 に周期的な電圧操作を行った際の電子輸送特性の理論研究 に関するものです。本研究は、フランスの研究機関である Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés 所属の Robert Whitney 氏、Étienne Jussiau 氏と共同で行いました。本成果はフォトンサイエンス・ リーディング大学院の海外派遣制度を利用してフランスに 滞在した際の成果です。この場を借りまして、本研究の遂 行にご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

受賞となった研究について簡単にご紹介します。

2016年に David J. Thouless 氏がノーベル物理学賞を受 賞したのは記憶に新しいと思います。氏の発表した重要な 成果の一つに、量子ホール系のトポロジカルな性質を指摘 した論文[1]があり、トポロジカル物性と呼ばれる研究分 野の非常に重要な文献として知られています。私の研究で は、その研究で用いられた断熱ポンピングと呼ばれる手法 を用いて、ナノスケール量子系に周期的な操作を行った際 に電子がどのように輸送されるかを調べました。

ポンピングとは、「何らかの操作を繰り返し行うことで 物質を輸送する行為」を意味します。身近な例では、水を 低所から高所へ組み上げる機械などがポンプと呼ばれるも のです。今回の研究では、ポンピングの中でも、ゆっくり と操作を行うことで必要以上に系を乱さずに最も効率よく 物質を汲み上げることができる断熱ポンピングについて議 論しました。

近年の技術発展により、原子一つ一つを操作・観測する 技術や、極低温で動作する超伝導回路といった、量子性が

物性理論研究部門 長谷川 雅大

重要になる物理が理論・実験双方で研究されており、量子 コンピューティング技術への応用等が期待されています。 ポンピングは、水や空気を組み上げる身近な技術であると 同時に、こういった量子性が強いナノスケール領域での技 術として研究が進んでいます。本研究では、そういった量 子の世界の電子回路を構成する素子の一つである量子ドッ トについて注目し、回路の中で電子を汲み上げるポンプと しての性能について調べました。

ガリウムヒ素等の物質で作られる半導体では、その接合 界面を二次元的に自由に動くことが出来る電子が形成され ます。この電子を界面上に貼付けた電極による電圧の壁で 囲うことで電子が孤立する島を作ることができ、これを量 子ドットと呼びます。量子ドットの中の電子はトンネル効 果を利用して確率的に電圧の壁を通り抜けることができ、 この確率をトンネル確率と言います。トンネル確率は電圧 の壁が高いほど低くなり、定性的に電子が量子ドットに出 入りすることが難しくなっていることを意味します。この 量子ドット素子は、例えば、量子回路の導線の間に挟み込 むことで、流れる電子数を調整するような役割をもたせる ことができます。



電圧の壁が低い方が電子が通りやすい

図、量子ドットを用いた電子ポンプの様子。電圧の壁を操 作して電子の流れやすさを左右で変えて一方向に電子を動 かすことができる。

本研究では、この量子ドットの電圧の壁の高さを操作し、 電子を接続された導線から量子ドットに取り込み、別の導 線へ吐き出させ、電子を導線間で汲み上げるということを 考えました(図)。これまでの研究で、量子ドットを表現す る複数の理論模型において、十分に大きい振幅で電圧の壁

を操作すれば、1回の操作で汲み上げることが出来る電子 の数は1に「量子化」されるということが知られていまし た[2]。本研究では、任意の量子ドット模型においても 「量子化」は起こるのか、という点に疑問を持ち、『「量子 化」するかどうかを決める要因はなにか?』という問題の 解明に挑戦しました。結果として、輸送される電子数が1 に量子化されない例外的な模型を発見しました。量子ドッ トの電圧の壁を操作すると、ラムシフトと呼ばれるドット 内の電子のエネルギー変化が発生することが知られていま す。このラムシフトの性質は量子ドットの外にいる多数の 電子のエネルギー分散関係に強く依存しています。輸送電 子数が1に「量子化」される模型では、電圧の壁を操作し た際にラムシフトにより必ず量子ドット内の電子のエネル ギー準位がドット外の電子のフェルミエネルギーを横切っ ており、そうでない模型では輸送電子数が1に「量子化」 されないことを本研究は明らかにしました。

本研究は、ナノスケールの電子輸送特性に新しい知見を 与えただけでなく、非平衡統計物理学の基礎づけにも有用 な結果をもたらしました。今回は電流特性のみを議論しま したが、熱流に議論を拡張することで、量子性が強く現れ る領域での非平衡定常熱力学の基礎を議論する理論模型を 与えることになります。今後は、理論模型を拡張してゆき、 より一般的な非平衡定常状態の物理について明らかにして いきたいと思います。

参考文献:

[1] D. J. Thouless, et. al., Phys. Rev. Lett. 49, 405 (1982).

[2] O. Entin-Wohlman, et. al. Phys. Rev. B, 65, 195411 (2002).

第11回分子科学会奨励賞を受賞して

この度、「水素ダイナミクスを有する新しい分子性導体 の開発」という題目にて、第 11 回分子科学会奨励賞を受 賞する栄誉に浴しました。本賞は、分子科学会の各種賞の 一つであり、分子科学研究分野において質の高い研究成果 を挙げ、分子科学の発展に寄与した若手研究者(38 歳未 満)に対して授与されるものであります。研究遂行にあた り、数多くの貴重なご助言・ご支援をいただきました森 初果 教授に深く御礼申し上げます。また、物性研究所の 山下 穣 准教授、下澤 雅明 助教をはじめとする所内外の 多くの共同研究者の皆様にも感謝申し上げます。

本研究では、分子性機能物質の代表例である分子性導体 を舞台として、水素結合を活用した新しいアプローチでの 物質開発とその構造物性研究に取り組みました。すなわち、 従来より用いられてきた構造制御という観点での水素結合 の「静的な」効果だけでなく、水素結合を介したプロトン の移動や授受などの水素結合の「動的な」効果(=水素ダ イナミクス)を活用することで、これまでにない新しいタ イプの分子性導体を開発することに成功し、様々な興味深 い新現象・物性を見出すことができました [1-4]。

この系の最大の特徴は、有機分子が積層してできた電気 伝導層が水素結合によって連結されていることです。従来 の分子性導体は、電気伝導層が絶縁性の対アニオン層に挟 まれた層状構造を有しており、伝導層内のπ電子相互作用 によって系全体の電子状態・物性が決定づけられています。 それに対し、本研究で開発した系は、伝導層「内」のπ電 子相互作用に加え、伝導層「間」に水素のダイナミクスを 有しており、これらが競合・連動することで、従来の分子 性導体では見られない特異な現象・物性が発現しました。

その代表例が「重水素移動をトリガーとする伝導性・磁 性スイッチング」です [1]。水素結合中に存在する重水素 が低温下 (185 K) で局在化するのに伴い、有機分子間で π電子移動が起こり、電荷秩序が発生し、伝導性・磁性が 大きく切り替わりました(半導体⇔絶縁体、常磁性⇔非磁 性)。水素ダイナミクスを起源とした固体物性変化として、 水素結合型誘電体における常誘電一強誘電転移などの例は あるものの、伝導性・磁性などの電子物性に関連した例は 凝縮系物性研究部門 森研究室 上田 顕

ほとんど未知であり、本成果は水素とπ電子の連動に基づ く新しい相転移・物性スイッチング現象として大変興味深 いものであります。さらに、この水素とπ電子の相互作用 のバランスを有機分子の化学修飾によって制御することに も成功しています [2]。

一方で、水素結合に軽水素を用いた場合、同様な相転移 は起こらず、水素は極低温まで局在化せず揺らぎ続け、量 子常誘電状態を与えることが分かりました [3]。驚くべきこ とに、この水素の量子揺らぎによってπ電子スピンの秩序 化も妨げられ、極低温でも常磁性状態のまま(量子スピン液 体状態)であることが明らかになりました。すなわち、水素 結合中の水素のダイナミクスや量子性を制御することに よって、分子性機能物質のπ電子構造や物性を制御・変調 可能であることを世界で初めて示すことに成功しました [4]。

このように、水素ダイナミクスに着目した物質開発研究 により、長い歴史を持つ分子性導体研究の新たな一面・可 能性を見いだすことができました。ごく最近、また別のタ イプの水素 $-\pi$ 電子連動型相転移を示す分子性導体の開発 にも成功しました。圧力や電場 [5] など外場応答性につ いての研究も進んでおり、「水素」と「 π 電子」が織りな すこの新しい分子科学・物性科学を今後さらに深化・発展 させていきたいと考えています。

- "Hydrogen-Bond-Dynamics-Based Switching of Conductivity and Magnetism: A Phase Transition Caused by Deuterium and Electron Transfer in a Hydrogen-Bonded Purely Organic Conductor Crystal", A. Ueda, *et al.*, J. Am Chem. Soc. **136**, 12184 (2014).
- [2] "Modulation of a Molecular π-Electron System in a Purely Organic Conductor that shows Hydrogen-Bond-Dynamics-Based Switching of Conductivity and Magnetism", A. Ueda, *et al.*, Chem. Eur. J. 21, 15020 (2015).

- [3] "Quantum-disordered state of magnetic and electric dipoles in an organic Mott system", M. Shimozawa, et al., Nature Commun. 8, 1821 (2017).
- [4] "Development of Novel Functional Organic Crystals by Utilizing Proton- and π-Electron-Donating/ Accepting Abilities", A. Ueda, Bull. Chem. Soc. Jpn. 90, 1181 (2017).
- [5] "Hysteretic Current-Voltage Characteristics in the Deuterium-Dynamics-Triggered Charge-ordered Phase of κ-D₃(Cat-EDT-TTF)₂", A. Ueda, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. in press.

......

. . .

外国人客員所員を経験して

Clifford HICKS Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids Clifford.Hicks@cpfs.mpg.de

At the start of my four-month stay at ISSP I had the fortune to overlap for a month with Profs. Premala Chandra and Piers Coleman. Along with my host, Prof. Nakatsuji, we enjoyed several after-lunch hours discussing PrV₂Al₂₀, and experiments that could be done with symmetry-breaking magnetic fields and uniaxial pressure.

I met Prof. Nakatsuji in 2014, when he invited me to give a seminar at ISSP. My specialty is using piezoelectric actuators to place samples under uniaxial stress: to reversibly lift the symmetry of a lattice, and observe how electrical and magnetic properties that depend on that symmetry change in response. The Nakatsuji group synthesises a range of materials whose magnetic and/or topological properties are expected to change qualitatively with reduction in lattice symmetry. This gives us a number of things to talk about. Prof. Nakatsuji recognised promptly in 2014 areas of overlap, and this started a discussion that culminated in my stay at ISSP in summer of 2018.

And I hope that the collaboration will continue from there. These are rewarding but challenging experiments: to withstand large strains while maintaining good strain homogeneity, samples need to be shaped precisely, and then mounted with care. Within my own research group in Dresden it has been an effort of years to develop the processes and tools to do this reliably. During my summer stay we performed preliminary measurements on a correlated metal system, with a first-generation pressure cell jerry-rigged onto the end of a cryostat insert built for general transport measurements. We then started building a dedicated insert, with more measurement wires and dedicated high-voltage lines for

the piezoelectric actuators. This project is now in the capable hands of Dr. Ohtsuki.

While at ISSP, I also completed design work on a secondgeneration pressure cell that will allow simultaneous measurement of the stress and strain applied to a sample. Our mutual goal is to put three pressure cells into service in the Nakatsuji group: the first-generation cell mentioned above, this second-generation cell, and a commercial cell with a higher force range. The simultaneous stress and strain measurement capability of the second-generation cell will be extremely useful in identifying stress-induced structural transitions. This cell will accept the same sample carrier that we use in Dresden, which I hope will facilitate long-term collaboration and exchange of samples.

I enjoyed my stay at ISSP. I am grateful for the opportunity and I am impressed by the range of activities in the Nakatsuji group. I am also grateful to the administrative staff, who made the process of settling in quick and simple. I look forward to many future visits to Japan.

物性研究所談話会

標題:近藤効果の非平衡ゆらぎ

日時:2018年7月5日(木) 午後4時~

場所:物性研究所本館6階 大講義室(A632)

講師:小林 研介

所属:大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻

要旨:

半導体や金属を微細加工して作製される微小な固体素子をメゾスコピック系と呼ぶ。その最大の特長は、量子効果が本 質的であるようなスケールにおいて、磁場や電場などの外場を利用することで、制御性の高い実験ができる点にある。た とえば、電子干渉計や人工原子等で発現するコヒーレンスや電子相関に基づく多彩な量子現象の観測とその制御は、 1980 年代以降の物性物理学の発展に大きな貢献を果たしてきた。

ところで、これまでにメゾスコピック系に対して行われてきた実験的研究の多くは、電流(あるいは電気伝導度)測定を 主体とするものである。このような測定によって検出される情報は時間平均された性質である。その一方で、近年、非平 衡状態の動的な情報を得る手段として、電流ゆらぎ測定が大きな関心を集めるようになってきた。

本談話会では、まず、メゾスコピック系における電気伝導と電流ゆらぎについて紹介する。その後、人工原子(カーボ ンナノチューブ量子ドット)を用いて、非平衡領域にある近藤効果について行った研究についてお話しする[1, 2, 3]。私た ちの成果は、非平衡量子多体系に対して、理論を定量的に検証するレベルで精密な実験的研究が可能であることを示す。

本研究は、荒川智紀、秦徳郎、藤原亮(阪大理物)、M. Ferrier、R. Delagrange、R. Deblock、R. Weil (パリ南大-CNRS)、阪野塁(東大物性研)、寺谷義道、小栗章(大阪市大理)の各氏との共同研究によります。

[1] M. Ferrier et al., Nature Phys. 12, 230-235 (2016).

[2] M. Ferrier et al., Phys. Rev. Lett. 118, 196803 (2017).

[3] 解説として、小林研介、パリティ 32, 16-21 (2017).

標題:光受容型膜タンパク質微生物型ロドプシンの機能の多様性の起源に迫る

日時:2018年8月23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:井上 圭一

要旨:

海洋や湖沼、河川、土壌などをはじめとする地球上の様々な環境中には、莫大な数の細菌や藻類などの微生物が棲息し ているが、近年のゲノム研究の発展により、その多くが細胞内に「微生物型ロドプシン」と呼ばれる光受容型膜タンパク 質を持つことが明らかとなってきている。これら微生物型ロドプシンは、我々ヒトを含めた動物の網膜中に存在する「動 物型ロドプシン」と極めてよく似た7回膜貫通型構造を持ち、さらに同じビタミンAの誘導体であるレチナールを発色団 としてタンパク質内部に結合している。そしてレチナールが光を吸収すると、全トランス型から13シス型への異性化反 応を起こし、細胞内外へ輸送する光駆動型イオンポンプや、電気化学勾配に沿って双方向にイオンを輸送する光ゲート式 イオンチャネル、走光性センサーなど非常にバラエティに富んだ生理機能が発現される。

その中で、我々はこれまでにこれら微生物型ロドプシンが7回膜貫通型構造および発色団レチナールからなる共通構造 をもとに、どの様にしてこれほどまでに多様な生理機能の発現を達成するのか、その分子メカニズムについて、過渡吸収 法や過渡回折格子法、赤外分光法などを用いた物理化学的研究を行ってきた。また最近では新たにNa+ポンプ型や内向き H+ポンプ型などの新奇なイオンポンプ型ロドプシンを独自に見出し、その輸送機構についても解明を進めている[1-3]。 さらに 2018 年には既存の微生物型および動物型のいずれとも異なる新たなロドプシンファミリーが自然界に広範に存在 することを明らかにし[4]、談話会ではこれら新奇分子を含めた微生物型ロドプシンの基礎研究から最新トピックス、さ らにはオプトジェネティクスへの応用など、我々の研究と共に世界的な現状を含めて幅広く紹介する。

- [1] K. Inoue et al., Nature Commun. 4, 1789 (2013)
- [2] H. E. Kato et al., Nature 521, 48-53 (2015)
- [3] K. Inoue et al., Nature Commun. 7, 13415 (2016)
- [4] A. Pushkarev and K. Inoue et al., Nature 558, 595-599 (2018)

標題:平成 30 年度 後期客員所員講演会

日時: 2018年10月18日(木) 午前11時~午後0時10分

場所:物性研究所本館6階 大講義室(A632)

要旨:

平成30年度後期客員所員の講演会を開催しますので、奮ってご参加ください。

新任の客員の先生方におきましては、所内はもちろん所外を含め広くかつ活発な共同研究を展開されることを期待し、 自己紹介及び物性研究所での研究目標等をご説明いただきます。

11:00-11:10 所長挨拶(森初果:物性研究所長)

- 11:10-11:40 Natalia DRICHKO (Johns Hopkins University) [Raman scattering of triangular lattice antiferromagnets:from helical order to nematic order]
- 11:40-12:10 高橋 晋(南カルフォルニア大学)「NV 中心を用いた単-スピンレベルでの磁気共鳴法」

物性研究所セミナー

標題:LASOR セミナー/ナノサイエンスセミナー:Nanoscale optical control of coherent electron waves from a nano-tip and their outlook

日時:2018年7月6日(金) 午後1時30分~午後2時30分

場所:物性研究所本館6階第2セミナー室(A612)

講師: Dr. Hirofumi Yanagisawa

所属:Ludwig-Maximilians University, D-85748 Garching, Germany

要旨:

In this presentation, we will overview our work on laser-induced electron emission from a tungsten tip. In particular, we will focus on optical control of electron emission sites on a scale of nanometers and their application for optical control of Young's electron interference.

Illuminating a sharp metallic tip with femtosecond laser pulses produces spatially and temporally confined electron pulses by plasmonic effects at the tip apex [1]. We have found that these plasmonic effects induce asymmetric electron emissions from the tip apex as schematically shown in Fig. 1. They also allow one to select the electron emission sites on a nanometer scale by changing the laser polarization [2]. Using this technique, we can manipulate electron emissions within their coherence time and area, which then enables us to control coherent electron emission in time and space. In a demonstration, we realized optical control of Young's electron interference [3]. The interference emerged between the two adjacent electron beams. The intensity of the interference could be successfully controlled by changing the laser polarization and intensity. The underlying physics that drove the interference was revealed by measuring the energy spectra [4, 5] and also by simulating the temporal evolution of the electron waves by solving a two-dimensional time-dependent Schrödinger equation [3]. Using a site-selective coherent electron source, we expect to create time-resolved electron holography with a possible time resolution in attoseconds.

In this presentation, we will overview our work on laser-induced electron emission from a tungsten tip. In particular, we will focus on optical control of electron emission sites on a scale of nanometers and their application for optical control of Young's electron interference.

References

- 1. P. Hommelhoff, et. al., Phys. Rev. Lett. 96, 077401 (2006).
- 2. H. Yanagisawa, et. al., Phys. Rev. Lett. 103, 257603 (2009).
- 3. H. Yanagisawa, et al. Sci. Rep. 7, 12661 (2017).
- 4. H. Yanagisawa, et al. Phys. Rev. Lett. 107, 087601 (2011).
- 5. H. Yanagisawa, et al. Sci. Rep. 6, 35877 (2016).

標題:極限コヒーレント光科学セミナー:アト秒高次高調波で探る光波電界周期スケール光物性

日時:2018年7月10日(火) 午後1時30分~午後2時30分

場所:物性研究所本館6階 第一会議室(A636)

講師:小栗 克弥

所属:日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

要旨:

今世紀初頭に発明されたアト秒光源技術、光時計技術、そして光位相安定化技術という3つの革新的光技術は、光を、 時間領域において10-18秒スケールで計測可能かつ周波数領域において10-18精度で制御可能な振動電界として取り扱う ことを可能にした。今や、光はサブペタヘルツ(PHz:1015Hz)周波数で振動する電界としてエンジニアリングが可能な電 磁波、すなわち"PHz波"として再定義できる時期を迎えている。このようなPHz波における光物性を考えた場合、光 波電界によって駆動されるコヒーレントな固体電子系応答と、そのコヒーレンスを消失させ、非平衡状態を経て熱平衡電 子状態に緩和させる電子系散乱過程がそのダイナミクスを支配する。その典型的な時間スケールは、光波電界の数サイク ルからサブサイクルに相当する10000~100asといった極めて短時間である。最近、大きな注目を集めている固体からの 高次高調波発生、高強度光電界による絶縁体中の動的ツェナートンネリング効果、動的フランツ・ケルディッシュ効果と いったコヒーレントな電子応答や、瞬時スクリーニングよる電荷秩序相の溶解、逆オージェ過程による電子多重励起と いった極めて速い電子緩和過程は、この光波電界周期スケール光物性の典型例と言えよう。

我々は、高次高調波発生により真空紫外~軟 X 線領域に得られるアト秒パルスと[1]、ポンププローブ時間分解計測技 術を組み合わせたアト秒パルス時間分解分光技術を開発し、光波(PHz 波)-電子相互作用が引き起こす光波電界周期ス ケール光物性を解明することを目的として研究を進めている。これまでに、世界最短時間分解能 200as 吸収分光[2]、世 界最短プローブ分解能サブ 5fs 角度分解光電子分光[3]、最高 92eV プローブ光電子分光[4] などユニークな特徴を有する 装置を開発してきた。本講演では、これらの装置を用いることにより観測に成功したワイドギャップ半導体における光電 界誘起の非線形分極応答[1]、グラファイトにおける非平衡電子状態緩和[2]など、最新の成果について紹介する。これら の光波電界周期スケール光物性が切り拓く将来の PHz 周波数動作機能の可能性についても議論したい。

[1] Oguri et al., Appl. Phys. Lett. 112, 181105 (2018).

[2] Mashiko et al., Nature Communications 9, 1468 (2018).

[3] Toume et al., in preparation.

[4] Oguri et al., Appl. Phys. Express 8, 022401 (2015).

標題:極限コヒーレント光科学セミナー:光誘起相転移における非平衡電子状態の観測と光による物性制御への可能性の 探求

日時: 2018年7月19日(木) 午前11時30分~午後0時30分

場所:物性研究所本館6階 第一会議室(A636)

講師:岡崎 浩三

所属:東京大学物性研究所

要旨:

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

近年、銅酸化物高温超伝導体やアルカリ金属をドープしたフラーレン光誘起超伝導という現象が注目を集めている[2]。 本セミナーでは、変位励起型コヒーレントフォノンに伴う非平衡電子状態の観測[3]から鉄系超伝導体の母物質の1つであ る BaFe2As2 においても光誘起超伝導が実現する可能性があることを議論する。また、電子と正孔がクーロン相互作用に よって束縛された状態である励起子が自発的に凝縮した系を励起子絶縁体と呼ぶが、その有力な候補物質である Ta2NiSe5 における光誘起絶縁体-金属転移の観測結果を紹介し[4]、そのメカニズムにおいても、変位励起型コヒーレン トフォノンが関係している可能性があることを議論する。さらに、光による物性制御実現の可能性など今後の展望につい ても議論したい。

- [1] K. Okazaki et al., Science 337, 1314 (2012), Y. Ota, K. Okazaki et al., Phys. Rev. Lett. 118, 167002 (2017), T. Hashimoto, K. Okazaki et al., Nat. Commun. 9, 282 (2018)など
- [2] M Mitrano et al., Nature 530, 461 (2016), S. Kaiser et al., Phys. Rev. B 89, 184516 (2014)など

[3] K. Okazaki et al., Phys. Rev. B 97, 121107(R) 2018

[4] K. Okazaki et al., submitted

標題:理論セミナー:理論計算によるタンパク質の構造機能解析

日時:2018年7月27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:重田 育照

所属:筑波大学計算科学研究センター

要旨:

タンパク質は極めて複雑な構造と精緻な機能をもつ高分子化合物であり、分子認識、情報伝達、酵素反応など、生体内 でおこる様々な生命現象の根幹をなす。立体構造と機能の間には大きな相関(構造-活性相関)があることが期待されてい ることから、これまで X 線回折実験や核磁気共鳴法(NMR)などの実験的手法により、数多くのタンパク質の立体構造が 明らかにされてきた。特に最近では、X線自由電子レーザーやクライオ電顕、AFM やSTM などの実験的解析手法により タンパク質1分子の動的情報が得られつつあり、機能と構造変化の関わりが徐々に明らかになりつつある。そのような状 況の中、実験事実をミクロスコピックなレベルで理解し、生体機能の予測をする理論計算に期待が集まっている。

近年のスーパーコンピュータの発展、および解析手法の進展が相まって、生体内でおこる化学反応解析の分野は格段の 進歩を遂げている。本セミナーでは、生命現象を解析するための分子動力学法や第一原理計算を解説すると共に、我々の 研究室が行っている研究に関して最新の話題を提供する。特に、創薬などで役に立つと考えられるタンパク質の折りたた み問題やドメイン運動の自由エネルギー解析[1-3]、および、タンパク質物性の評価法、酵素反応に対する応用例[4-6]を 紹介する。

- 1. R. Harada, Y. Takano, T. Baba, Y. Shigeta, "Simple, Yet Powerful Methodologies for Conformational Sampling of Proteins", Phys. Chem. Chem. Phys. (invited feature article) 17, 6155-6173 (2015).
- 2. J. Fujita, R. Harada, Y. Maeda, Y. Saito, E. Mizohata, T. Inoue, Y. Shigeta, H. Matsumura, "Identification of the key interactions in structural transition pathway of FtsZ from Staphylococcus aureus", J. Struct. Biol. 198, 65-73 (2017).
- 3. R. Harada, Y. Shigeta, "How low-resolution data can predict conformational changes of a protein: a molecular dynamics study", Phys. Chem. Chem. Phys.20, 17790-17798 (2018).
- 4. M. Shoji, H. Isobe, Y. Shigeta, T. Nakajima, K. Yamaguchi, "Concerted Mechanism of Water Insertion and O2 Release during the S4 to S0 Transition of the Oxygen-Evolving Complex in Photosystem II", J. Phys Chem. B 122 (25), 6491-6502 (2018).

- K. Kamiya, T. Baba, M. Boero, T. Matsui, S. Negoro, Y. Shigeta, "A Nylon-oligomer Hydrolase Promoting Cleavage Reactions in Unnatural Amide Compounds", J. Phys Chem. Lett. 5, 1210-1216 (2014).
- K. Kamiya, Y. Shigeta, "First-principles Molecular Dynamics Studies on the Atomistic Behavior of His503 in Bovine Cytochrome c Oxidase", Biochim. Biophys. Acta, 1807, 1328-1335 (2011).

標題:ナノサイエンスセミナー: Quantum Molecular Machines

日時:2018年8月3日(金) 午後1時30分~午後2時30分

場所:物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師:Prof. Saw-Wai Hla

所属: Ohio University and Argonne National Laboratory, USA.

要旨:

One of the goals of nanotechnology is to develop complex molecular machines that can be operated in a solid-state environment. This talk will present molecular motors and molecular linear transport devices operating in the quantum regime on materials surfaces. Fundamental operations of these machines are investigated in an atomically clean environment using low temperature scanning tunneling microscopy, and molecular manipulations[1], [2]. These investigations reveal how charge and energy transfer are taken place within single molecule machines and molecular networks. Moreover by introducing dipole active components in the rotor arms, communication among the molecular motors can be introduced. Synchronization of the motors can be achieved depending on the symmetry of the molecular assemblies and the strength of the electric field. Furthermore, individual molecular motors can be charged using the inelastic tunneling scheme. For a comparison with spintronics of molecular machines, we will also present anomalous Kondo resonance observed for the magnetic molecules adsorbed on graphene nanoribbons [3]. For the linear transport, the development of molecular hoverboards and molecular cars for a control transport at the nanoscale will be presented.

- Y. Zhang, H. Kersell, R. Stefak, J. Echeverria, V. Iancu, U.G.E. Perera. Y. Li, A. Deshpande, K.-F. Braun, G. Rapenne, C. Joachim, and S.-W. Hla. Simultaneous and coordinated rotational switching of all molecular rotors in a network, Nature Nanotechnology 11, 706 (2016).
- [2] U.G.E. Perera. F. Ample, H. Kersell, Y. Zhang, G. Vives, J. Echeverria, M. Grisolia, G. Rapenne, C. Joachim, and S.-W. Hla. Controlled clockwise and anticlockwise rotational switching of a molecular motor, Nature Nanotechnology 8, 46 (2013).
- [3] Y. Li, A. Ngo, A. DiLullo, K.Z. Latt, H. Kersell, B. Fisher, P. Zapol, S.E. Ulloa, and S.-W. Hla. Anomalous Kondo resonance mediated by semiconducting graphene nanoribbons in a molecular heterostructure, Nature Communications 8, 946 (2017).

標題:セミナー:第17回 関東ソフトマター研究会

- 日時:2018年8月8日(水) 午前10時~午後7時30分
- 場所:物性研究所本館6階 大講義室(A632)
- 要旨:物理・化学・生物・工学と分野の垣根を越えてソフトマターの研究に関して議論することを目的とし、関東の大学、 研究所の学生・若手研究者を中心として開催する。

標題:中性子セミナー:磁性体における偏極中性子散乱研究 -定常炉・核破砕炉の相補利用を見据えて

- 日時:2018年8月20日(月) 午後1時30分~午後2時30分
- 場所:物性研究所本館6階 第5セミナー室(A615)

講師:南部 雄亮

所属:東北大学金属材料研究所

要旨:

中性子のスピン自由度に着目した偏極中性子散乱は、磁性体を始めソフトマターなど様々な物質群に対して行われてき た。偏極中性子といえば、これまでは核反射と磁気反射の分離や、磁気構造の精度良い決定を目的に用いられることが多 数であった。しかしながら、近年は中性子実験施設における中性子束の増強や偏極機器の開発・改良によって、非弾性領 域や上記以外の目的についても実験を行えるようになってきた。例えば、Bravias 格子の場合、磁気構造の決定には規約 表現が有用ではなく、磁気モーメントの向きを一意に決定することが難しい場合がある。偏極中性子の SF と NSF を比 較することで、中性子スピンに垂直な面に対する磁気モーメントの面内・面間成分の分離ができることはよく知られてい る。また、偏極中性子方向を変えることでカイラル項や核磁気干渉項の観測を行うことが可能である。これらは、トポロ ジカルな性質を持つ物質の理解に必須な情報であり、今後標準的な測定手法になっていくものと予想される。

本講演では、偏極中性子散乱一般を議論するため、中性子スピン方向を正規直交系に分解した Blume-Maleev の表式から始め、それぞれの散乱チャンネルから観測できる物理量をまとめる。その後、我々の磁性体における偏極中性子散乱の 例を挙げ、スピンの面内面間成分の分離や、スピントロニクス物質における非弾性散乱領域のヘリシティがスピンゼー ベック効果と関連することを示す。また、東北大学が J-PARC に建設している偏極中性子散乱装置 POLANO を紹介し、 定常炉と核破砕炉での棲み分けの観点から、JRR-3 再稼働後にそれぞれで展開しうる偏極中性子研究について議論を行いたい。

標題:中性子セミナー:希土類単分子磁石の中性子散乱研究 日時:2018年8月20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:古府 麻衣子

所属: J-PARC センター

要旨:

単分子磁石とは、ナノスケールの単一分子が保磁力を示し、あたかも磁石のように振る舞う物質群である。通常の磁石 (強磁性体)と異なり、分子間の相互作用は無視できるほど弱く長距離秩序は現れない。保磁力の起源は、分子の大きな磁 気モーメントと磁気異方性が、上向きと下向きのスピンの間に高いポテンシャル障壁を作り出し、磁化反転を非常に遅く するためである。単分子磁石は、その磁化反転機構が物理的に興味深いだけでなく、1 分子メモリーとして応用の観点か らも注目されている。1980年に最初の単分子磁石 Mn12 錯体が発見されて以降、3d 遷移金属を含む物質が数多く研究さ れてきた。2000年以降、希土類元素を含む単分子磁石の研究が盛んに進められている。希土類単分子磁石の面白さのひ とつは、量子性が色濃く現れることである。ポテンシャル障壁を超える単純な古典的熱活性過程ではなく、トンネリング 過程を介した磁化反転過程が観られることが多く、そのメカニズム解明が中心的研究となっている。

本セミナーでは、Tb-Cu 二核錯体や現在研究を進めている Zn-Ln-Zn (Ln = Ce, Pr, Nd) 三核錯体の中性子散乱研究について紹介する。Zn-Ln-Zn 錯体では、分子中の磁性イオンは1つのみで、f 電子数の偶奇性に応じて磁気緩和挙動が大きく変化する。クラマースイオンである Ce (J = 5/2)と Nd (J = 9/2)は単分子磁石的挙動を示すが、非クラマースである Pr (J = 4)では遅い磁気緩和は観測されない(非単分子磁石)。中性子非弾性散乱により得られた磁気励起スペクトルも、f 電子数の偶奇性で大きく変わる。これは、基底状態の違いと単分子磁石挙動が密接に関わっていることを示している。また、我々は中性子準弾性手法を用いて磁気緩和の観測を試みた。交流磁化率測定で観測された遅い磁気緩和と合わせることにより、緩和の全体像を捉えることに成功した。その結果、磁気緩和が単純な Orbach 機構では記述されないことが明らかになった。

講演では、最近始めた磁性イオン液体の研究についても触れ、今後の研究の展望について述べたい。

標題:セミナー:超高速半導体レーザー動作のデバイス物理

日時: 2018年8月23日(木) 午前10時30分~午後0時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:松井 康浩

所属:Finisar Corp. Principle Engineer, and Visiting Professor of NICHe, Tohoku University 要旨:

半導体レーザの変調帯域は、30 GHz 程度の帯域を達成した後、ここ 20 年近く、進展はあまり見られなかった。最近、 いくつかの素子物理を組み合わせることで、60 GHz の帯域が実証され、更なる高速化が期待されている。講演では、半 導体レーザの動作速度を記述するレート方程式を直感的に理解することから始め、古くから知られながらも最大限に活用 されてこなかった共振器効果として、フォトン-フォトン共鳴効果、Detuned-loading 効果、及び、最近指摘された、共 振器内 FM-AM 変換の効果、を解説する。これらの効果は、高速化を可能にするだけでなく、振動のダンピングにも大き な影響を与え、従来の利得スイッチやモード同期とは異なる、新たなタイプの柔軟な光パルス光源を生み出す可能性もあ る。また、戻り光に対する強い耐性を持つことも期待される。

標題:ナノサイエンスセミナー:MBE-STM を用いた重い電子系化合物薄膜の研究

日時:2018年9月7日(金) 午後2時30分~午後3時30分

場所:物性研究所本館6階第4セミナー室(A614)

講師:土師 将裕

所属:京都大学理学研究科

要旨:

ランタノイドやアクチノイドなど、f 電子を含む化合物は重い電子系化合物と呼ばれる。強いクーロン斥力によって局 在した f 電子は、近藤効果による伝導電子との混成(c-f 混成)によって低温では遍歴的にふるまう。それらの競合によっ て有効質量が通常よりも非常に大きい重い電子状態を形成する。このように、近藤効果によって、非磁性の重い電子状態 を誘起する一方で、Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY)相互作用によって f 電子間の磁気秩序状態が誘起される。 したがって、近藤効果と RKKY 相互作用の競合によって、磁気秩序相転移が 0 K で起こる量子臨界点が存在する。量子 臨界点周辺においては、非フェルミ液体や非従来型超伝導など、多彩な興味深い物性が発現する。

以上のことから、重い電子系化合物は、非常に興味深い研究対象として注目を集めており、数多くの物性測定がなされている。しかしながら、走査トンネル顕微鏡(STM)を用いたナノスケールでの電子状態測定は、限られた物質でしか行われていない。その理由として、単結晶の劈開性の悪さから、STM 測定に適した清浄面を得るのが困難であることが挙げられる。

一方で、分子線エピタキシー法(MBE)と呼ばれる薄膜成長技術が近年注目を集めており、高純度の薄膜や人工超格子な どの作製が行われている[1]。この技術を用いれば、STM 測定に適した原子レベルで平坦な表面を容易に得ることができ、 STM を用いた重い電子系化合物研究が加速されることが期待できる。

そこで本研究では、MBE によって成長させた重い電子系化合物である CeCoIn5 及び CeRhIn5 薄膜のその場 STM 観察を行った。講演ではまず、非従来型超伝導体である重い電子系超伝導体 CeCoIn5 中の不純物効果[2]についての講演を行う。次に、重い電子系反強磁性体 CeRhIn5 における c-f 混成状態[3]についての講演を行う。

References

[1] M. Shimozawa et al., Rep. Prog. Phys. 79, 074503 (2016).

[2] M. Haze et al., J. Phys. Soc. Jpn. 87, 034702 (2018).

[3] M. Haze et al., submitted.

標題:中性子セミナー:中性子散乱で観る創発スピン構造

日時:2018年9月7日(金) 午後3時30分~午後4時~30分

場所:物性研究所本館6階 第2セミナー室(A612)

講師:富安 啓輔

所属:東北大学大学院理学研究科

要旨:

「スピン構造」は基礎科学的な魅力と応用的な可能性を併せ持つ多彩な物性の源である。金属絶縁体転移・巨大磁気抵 抗・トポロジカル効果・スピントロニクス現象は、その代表と言える。スピン構造は、動的と静的、短距離と長距離に大 きく分類され、そのいずれの観測にも中性子散乱法は大きな役割を果たしている。

本セミナーでは、フラストレーションやスピンクロスオーバーにより生成される「スピン分子」と呼ばれる動的短距離 スピン構造体と「all-in all-out」と呼ばれる静的長距離スピン構造体を観測した研究を紹介する。前者はパルス中性子源 のチョッパー分光器を、後者は定常中性子源の粉末回折計と三軸分光器を用いておこなった。

「スピン分子」とは、1 nm 程度の分子のような形状を持つ磁気的な素励起のことである。我々は、スピン分子を、局在ス ピン系 MgCr2O4、遍歴スピン系 LiV2O4、局在と遍歴の挟間に位置づけられる LaCoO3 において観測して来た [1-3]。最近 では、スピン分子はトポロジカルチャージという新たな基礎概念で記述されること、異常なマクロ物性(断熱・防音機能) の生成源として熱制御の応用シーズになりうることも報告されている[4,5]。

「All-in all-out」とは、スピンが自らの属する正四面体の中心方向のみ、あるいは、その反対方向のみを向いた磁気構造のことである。例えば、Nd2Ir2O7等のパイロクロアについて、3次元トポロジカル Weyl 半金属ないしは近傍物質である証拠として理論的に提唱され、実験的にも温度や磁場誘起の金属絶縁体転移や磁気ドメイン導電現象を生み出す基礎構造を与える [6]。しかしながら、その中性子実験は、(1) Ir の磁気モーメントが小さい (< 0.3 µ B)、(2) 磁気伝播ベクトルが (0,0,0) である、(3) 二つの磁性元素からなるパイロクロアの磁気構造決定は相当数のパラメターを含む最適化問題になる、という困難が重なり、不可能だと思われていた。我々がこの問題をいかに解決したか、最新の数理情報科学と中性子実験の融合により、all-in all-out 磁気構造の最終決定に至るまでをお話しする [7]。

最後に、今後の中性子研究の展望について述べる。

[1] KT et al., PRL 101, 177401 (2008); PRL 101, 177401 (2013).

[2] KT et al., PRL 110, 077205 (2014).

[3] KT et al., PRL 119, 196402 (2017); KT et al. (submitted).

[4] T. Mizoguchi et al., PRL 119, 077207 (2017); arXiv:1806.08534.

[5] T. Watanabe et al., PRB 86, 144413 (2012); H. Zhou et al., PRB 87, 174436 (2013).

[6] D. Pesin et al., Nat. Phys. 6, 376 (2010); X. Wan et al., PRB 83, 205201 (2011); Y. Yamaji et al., PRX 4, 021035 (2014); K. Matsuhira et al., JPSJ 76, 043706 (2007); JPSJ 80, 094701 (2011); Z. Tian et al., Nat. Phys. 12, 134 (2015); H. T. Hirose et al., Sci. Rep. 7:42440 (2017).

[7] KT et al., JPSJ 81, 034709 (2012); KT et al. (submitted) (特許出願手続き中,山形大 2017-081).

標題:中性子セミナー:磁性体におけるボルテックスの中性子散乱研究

日時:2018年9月7日(金) 午後1時30分~午後2時30分

場所:物性研究所本館6階第2セミナー室(A612)

講師:左右田 稔

所属:理化学研究所 創発物性科学研究センター

要旨:

近年、トポロジーに起因する新奇物性が注目されている。トポロジカルな磁性体として、スピンがボルテックスのよう に螺旋配列を形成している磁気スキルミオン等が挙げられ、基礎・応用両面において精力的に研究されている。本セミ ナーでは、3 種類のボルテックス (1) フラストレーション磁性体における Z2-ボルテックス、(2) 超伝導体におけるボル テックス格子、(3) 磁気スキルミオンを取り上げる。様々なボルテックス格子の構造、ダイナミクスを中性子散乱によっ て観測し、トポロジカルな物性の総合的な解明を目指している。

幾何学的フラストレーションをもつ磁性体では、Z2-ボルテックスに起因するトポロジカル転移が理論的に予想されて いる。スピンのカイラリティーと密接に関係する Z2-ボルテックスでは、理論研究より特徴的な中性子散乱実験結果、(a) 低温でも有限な磁気相関長、(b) 磁気ブラッグ点を結ぶライン状の磁気散漫散乱、(c) 転移温度付近で磁気散漫散乱の強 度が最大、が期待される。さらに中性子非弾性散乱実験では、セントラルピークが観測される。我々はカゴメ格子と三角 格子が積層するフラストレーション磁性体 RBaCo4O7、RBaFe4O7 の中性子実験を行い、特徴的なライン状の磁気散漫 散乱を観測した。YBaCo4O7 の中性子実験結果は、 先に上げた(a)-(c)と一致した結果となっており、Z2-ボルテックスが 期待される。類似構造をもつ LuBaCo4O7 や CaBaFe4O7 等に対して非弾性実験も含めた中性子散乱実験も行っており、 Z2-ボルテックスの可能性を議論する。セミナーでは、別のボルテックスに注目した研究として、超伝導体におけるボル テックス格子や磁気スキルミオンの最近の中性子研究結果等についても述べる。

標題:理論インフォーマルセミナー:冷却原子系における非エルミート近藤効果

日時:2018年9月25日(火) 午後4時~午後5時

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師:中川 大也

所属:理化学研究所 創発物性科学研究センター

要旨:

近藤効果は、固体電子系における代表的な量子多体効果のひとつであり、強相関系の理解において重要な役割を果たし ている。これまでに磁性不純物を含んだ金属やf電子系化合物のほか、量子ドットなどの人工量子系においても観測がな されているが、近年、真空中にトラップされた冷却原子気体において近藤効果を実現しようという試みが理論・実験共に 精力的に行われている[1,2]。冷却原子気体で近藤効果を実現することの強みとして、その制御性の高さによって強相関量 子多体系のクエンチダイナミクスなどの非平衡現象を観測できることや、固体電子系とは違った特性により従来は考えら れなかったような新たな近藤効果が実現できることなどが挙げられる。本セミナーでは、冷却原子系における近藤効果の 実現が、通常の物性物理の範疇を超えた、「非エルミートハミルトニアンによって記述される量子多体問題」を与えるこ とを提案する[3]。ごく最近、冷却原子気体での近藤模型の実験的な実現が報告された[2]。この実験においては未だ近藤 効果の観測には至っていないが、フェルミオンと不純物の間の非弾性散乱に起因する原子のロスが報告されている。この 非弾性散乱を量子開放系として定式化することにより、近藤相互作用の係数が複素数で与えられる、非エルミート近藤模型を導出することができる。この非エルミート近藤模型をくりこみ群を用いて解析することにより、通常のエルミートな系では現れることのない(具体的には、量子不純物系のg-定理を破る)新奇なくりこみ群フローと、それに付随した量子相転移が現れることを示す。また、われわれは、この非エルミート近藤模型の厳密解をBethe 仮設法を用いて導いた。厳密解の示す量子相転移線はくりこみ群による結果とよく一致する。

Reference:

[1]A. V. Gorshkov et al., Nat. Phys. 6, 289 (2010).

[2]L. Riegger et al., Phys. Rev. Lett. 120, 143601 (2018).

[3]M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda, arXiv:1806.04039.

標題:極限コヒーレント光科学セミナー:スパースモデリングを活用したコヒーレント軟 X 線回折イメージング

日時: 2018年9月28日(金) 午前10時~午前11時30分

場所:物性研究所本館6階 第一会議室(A636)

講師:山崎 裕一

所属:国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)

要旨:

コヒーレント軟 X 線回折磁気イメージング(CDI)法は、集光レンズを用いずにナノメートルスケールの磁気構造を実 空間観測できる手法である。観測された回折図形からホログラフィー法や位相回復アルゴリズム法によって位相情報を回 復し実空間像を再構成することができる。我々は、ナノメートルスケールのトポロジカル磁気構造体である磁気スキルミ オンに着目し、CDI 法による実空間観測することに成功している[1]。しかし、本手法は高精度の実空間像を観測するた めに長時間の計測が必要であり、磁気構造の高速な時間変化を観測することは難しい。そこで、計測対象のスパース性に 関する事前情報を取り込んだ新しい位相回復アルゴリズムを考え、低精度な計測データからも効率よく情報抽出できる解 析手法を開発している。

本セミナーでは、コヒーレント軟X線回折磁気イメージングの最近の進展とスパースモデリングを活用した位相回復ア ルゴリズムについて紹介する。

[1] V. Ukleev, Y. Yamasaki, et al., QUANTUM BEAM SCIENCE 2, 3[1] (2018)

標題:理論セミナー:Lattice model constructions for gapless domain walls between topological phases 日時:2018年10月2日(火) 午後4時~

場所:物性研究所本館6階第5セミナー室(A615)

講師: Prof. Shuo YANG

所属: Department of Physics, Tsinghua University

要旨:

Lattice models of gapless domain walls between twisted and untwisted gauge theories of finite group G are constructed systematically. As simple examples, we numerically studied the gapless domain walls between twisted and untwisted $Z_N(with N<6)$ gauge models in 2+1D using the state-of-art loop optimization of tensor network renormalization algorithm. We also studied the physical mechanism for these gapless domain walls and obtained quantum field theory descriptions that agree perfectly with our numerical results. By taking the advantage of the systematic classification and construction of twisted gauge models using group cohomology theory, we systematically construct general lattice models to realize gapless domain walls for arbitrary finite symmetry group G. Such constructions can be generalized

into arbitrary dimensions and might provide us a systematical way to study gapless domain walls and topological quantum phase transitions.

標題:量子物質セミナー: Axion electrodynamics and the quantized topological magnetoelectric effect in topological insulators

日時:2018年10月16日(火) 午後1時30分~午後3時

- 場所:物性研究所本館6階第一会議室(A636)
- 講師: Prof. N. Peter Armitage
- 所属: The Johns Hopkins University, USA

要旨:

Topological insulators have been proposed to be best characterized as bulk magnetoelectric materials that show response functions quantized in terms of fundamental physical constants. Here we lower the chemical potential of three-dimensional (3D) Bi2Se3 films to 30 meV above the Dirac point, and probe their low-energy electrodynamic response in the presence of magnetic fields with high-precision time- domain terahertz polarimetry. For fields higher than 5 T, we observed quantized Faraday and Kerr rotations, whereas the DC transport is still semi-classical. A non-trivial Berry phase offset to these values gives evidence for axion electrodynamics and the topological magnetoelectric effect. The time structure used in these measurements allows a direct measure of the fine structure constant based on a topological invariant of a solid-state system. I'll also discuss our most recent measurements on topological insulator single crystals that give evidence for a half quantized Hall effect on the TI surfaces.

Ref. L. Wu et al., Science 354, 1124 (2016).

編集後記

今回もトポロジーを中心に物性研の成果が多数、記事として掲載さ れています。その中に室内発生磁場として世界最高となる 1200 テス ラの発生に成功したものがあります。これは物性研の国際超強磁場科 学研究施設が実に半世紀もかけて達成した偉業です。記事には実験の ポイントが分かりやすく解説されていますが、読者はスケールの大き さに驚かされると共に、現場での苦労も感じることでしょう。今後、 利用実験で実施される物性研究が楽しみです。

松 田 巖