

物性研究所短期研究会

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

日時：2017年6月12日(月)～6月14日(水)

場所：物性研究所本館 6階大講義室(A632)

研究会提案代表者：近藤猛(物性研)

共同提案者：和達大樹(物性研)、秋山英文(物性研)、木村昭夫(広大)

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

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

る層状カルコゲナイド-MoTe₂の化学置換量や圧力により発現する熱電特性や超伝導性を紹介しました。低温のゼーベック係数が異常な増大を示すこと、また、臨界領域近傍から非極性構造相にかけて超伝導転移温度が急激に上昇することを見だし、これらの異常の振る舞いの起源として、極性構造転移に関わるソフトフォノンによる非弾性散乱の効果や、極性転移に伴うスピン分裂効果の可能性について議論しました。石坂香子氏は、スピン分解角度分解光電子分光により明らかにした超伝導体PdBi₂および極性半金属MoTe₂のトポロジカルな性質について議論しました。臨界温度5.4Kを持つ超伝導体PdBi₂においては、フェルミ面を形成するスピン偏極した表面バンドの在を観測するとともに、バルクの第一原理バンド計算を基に得たZ₂不変量の考察により、そのトポロジカルな性質を明らかにしました。自己組織化によって形成された磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合に着目した成果を発表しました。Bi₂Se₃上に磁性絶縁体MnSeを成長させることでヘテロ構造を作製し、時間反転対称性の破れを検証した結果、ディラックコーンに約80meVのギャップが開くことを直接確認しました。宮本幸治氏は、2枚のBiS₂層にLa-(O,F)層が挟まれたLa(O,F)BiS₂超伝導体(T_c=10.6K)について紹介しました。理論計算から、この物質の超伝導現象を引き起こす電子が、BiS₂層の特異な電子スピン構造であることが示唆されています。等エネルギー面のスピン構造がRashba型のものからDresselhaus型へと変化するとする理論予想と対応するスピン偏極状態の観測結果が紹介されました。

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

ローブ型時間・角度分解光電子分光の実験結果を報告しました。鉄系超伝導体母物質 BaFe_2As_2 に対して、それぞれブリルアンゾーン中心と端にあるホール面及び電子面双方において、コヒーレントフォノン励起による光電子強度の振動に位相反転があることを見出しました。また、励起子絶縁体の候補物質と考えられている Ta_2NiSe_5 の測定で、絶縁体-半金属転移を観測した結果の紹介がありました。木村昭夫氏は、トポロジカル絶縁体の非平衡キャリアダイナミクスに着目して発表しました。バルクキャリア制御が連続的に可能な Bi_2Te_3 を用いて、バルクキャリアと光起電力シフトとの関係を紹介しました。また、 $(\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x)_2\text{Te}_3$ 試料において持続時間の長い緩和過程を見出し、ディラック点がフェルミレベルに接近していることに起因するとする解釈を与えました。

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

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

集合写真及び昼食時間をとったのち、午後最初のセッションとして、引き続き強相関の話題について議論が行われました。柳瀬陽一氏は、強相関電子系に数多く見られる d 波超伝導体などのギャップレス超伝導体を「強いトポロジカル超伝導体」に変えることが出来る一般的な方法を提案しました。その条件は、スピン-重項超伝導であること、空間反転対称性が欠如していること、スピン偏極していること、の3つであり、これらの条件が満たされれば、超伝導対称性やバンド構造の詳細に依らず、一般的にトポロジカル超伝導になることが示され、銅酸化物高温超伝導体において既にこれらの条件が実現していることを指摘しました。小林正起氏は、酸化物エレクトロニクスへの応用や低次元強相関電子系の基礎的な理解に向けて多くの注目を集めている酸化物ヘテロ構造や酸化物表面における強相関電子の量子閉じ込め効果を紹介しました。レーザー分子線エピタキシー成膜装置と角度分解光電子分光(ARPES)測定装置を組み合わせた複合装置を用いて、強相関酸化物 SrVO_3 極薄膜において、量子閉じ込め方向と軌道の幾何学により決まる軌道選択的量子化、量子数に依存して有効質量が変化する異常有効質量増大、次元性低下によるフェルミ液体の破綻など、通常の金属量子井戸状態では見られない特異な現象を示しました。

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

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

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

閉会にあたり、辛埴氏より短期研究会の総括があり閉会となりました。

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

プログラム

6月12日(月)

13:00-13:05 趣旨説明：近藤猛(東大)

13:05-13:10 所長あいさつ

[セッション1 スピン・トポロジー1] (座長：近藤猛(東大))

- 1) 13:10-13:55 村上修一(東工大) 「トポロジカル半金属のトポロジーと物質探索」
- 2) 13:55-14:40 石渡晋太郎(東大) 「極性-非極性転移を示す半金属 MoTe₂における特異な輸送現象」
- 3) 14:40-15:05 石坂香子(東大) 「トポロジカル金属・半金属におけるバルクと表面の電子構造」
- 4) 15:05-15:30 平原徹(東工大) 「自己組織化によって形成された磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合」

休憩 15:30-15:50

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

[セッション2 非平衡ダイナミクス1] (座長：秋山英文(東大))

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

6月13日(火)

[セッション3 強相関] (座長：藤森淳(東大))

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

集合写真・昼食 12:00-13:05



ポスターセッション

- P01) 明比俊太郎 (東大物性研) 「レーザー角度分解光電子分光で研究するルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 の表面電子状態」
- P02) 伊藤俊 (東大物性研) 「Photo-induced ultrafast potential shift observed at a metal- semiconductor interface of a Bi thin film」
- P03) 大江日南子 (東理大) 「硬 X 線光電子分光による $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ の電子構造」
- P04) 小野頌太 (岐阜大) 「準平衡近似を超えたフォノン熱化過程」
- P05) 川北純平 (東大物性研) 「レーザー励起光電子顕微鏡を用いた次世代不揮発性メモリ ReRAM の非破壊観測」
- P06) 川田萌樹 (阪大) 「X 線電子分光線二色性による重い電子系 CeCu_2Ge_2 の 4f 基底状態軌道対称性の決定」
- P07) 國定総 (東大物性研) 「レーザーARPES で精密観測する $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の超伝導ギャップと擬ギャップ」
- P08) 栗原暢人 (東大物性研) 「Bi/Cu(111)界面における Rashba パラメータの酸素曝露の影響」
- P09) 興石佳佑 (東大理) 「角度分解光電子分光で観測する Te アニール $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ の電子構造」
- P10) 近藤広康 (阪大) 「レーザー角度分解光電子分光における CeRu_2Si_2 の重い準粒子状態の観測」
- P11) Yi-Tao Cui (東大物性研) 「 $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ adsorption on Pt nanoparticles revealed by in situ hard-x-ray photoemission spectroscopy」
- P12) Zhigang Zhao (東大物性研) 「Realization of a mW-level 10.7-eV laser by cascaded third harmonic generation of a Yb: fiber CPA laser at 1-MHz」
- P13) 齋藤成之 (東大物性研) 「赤外極短パルス OPCPA 光源によるアト秒軟 X 線科学の開拓」
- P14) 坂野昌人 (東大工) 「キラルな結晶構造を有するテルル単体のバンド構造の観測」
- P15) 鈴木剛 (東大物性研) 「時間分解光電子分光法による FeSe におけるコヒーレントフォノンの観測」
- P16) 染谷隆史 (東大物性研) 「Intrinsic carrier cooling in high mobility graphene on SiC(000-1)」
- P17) 祖利目和明 (阪大) 「紫外レーザー光電子分光における繰り返し周波数通倍器を用いた空間電荷効果の抑制」
- P18) 高三和晃 (京大) 「銅酸化物薄膜におけるレーザー誘起トポロジカル超伝導」
- P19) 高野彩佳 (阪大) 「強相関希土類化合物 DyB_2C_2 の異方性 4f 電荷分布を反映した内殻光電子線二色性の観測」
- P20) 高橋健吾 (東大工) 「ミスフィット層状化合物 $(\text{PbSe})_{1.16}(\text{TiSe}_2)_2$ におけるバンド構造の観測」
- P21) 高橋謙太 (東理大) 「Polarization-emission angle dependent hard x-ray photoemission study on Cu-based delafossite oxides」
- P22) 高橋裕也 (東理大) 「角度分解光電子分光法による層状 Mn 酸化物の電子構造の研究」
- P23) 高柳亮平 (東理大) 「Co 2p 内殻硬 X 線光電子分光によるペロブスカイト型 Co 酸化物のスピン状態」
- P24) 竹内健悟 (東大物性研) 「高強度中赤外光源の開発と固体における高次高調波発生」
- P25) 都築章宏 (東大物性研) 「Nb との近接効果によるトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 薄膜の超伝導電子状態の直接観測」
- P26) 中島脩平 (東大物性研) 「走査トンネル顕微鏡と放射光 X 線磁気円二色性による Mn/Fe 超薄膜ヘテロ構造の原子構造と磁性研究」
- P27) 中田勝 (東大理) 「角度分解型光電子分光で調べる銅酸化物超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{O}_7$ のネマティシティ」
- P28) 中谷泰博 (阪大) 「軟 X 線角度分解光電子分光による CeNi_2Ge_2 の重い準粒子状態の実証」
- P29) 中山充大 (東大物性研) 「 $\text{Sr}_3(\text{Ru}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{O}_7$ における軌道選択的的金属絶縁体転移の観測」
- P30) 中村飛鳥 (東大工) 「金属薄膜の時間分解電子線回折」
- P31) 中村飛鳥 (東大工) 「遷移金属ダイカルコゲナイド VTe_2 の超高速格子ダイナミクス」
- P32) 並木航 (東理大) 「軟 X 線分光による $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ の電子構造」
- P33) 野口亮 (東大物性研) 「レーザースピ分解 ARPES で調べる巨大ラッシュバ分裂表面状態の軌道とスピン」
- P34) 萩原健太 (東大理) 「角度分解光電子分光による PrFeAsO_{1-y} の超伝導ギャップ」



- P35) 挾間優治 (東大物性研) 「光電子分光法を利用した太陽電池における光起電力高速ダイナミクスの測定」
- P36) 橋本嵩広 (東大物性研) 「鉄系超伝導体 FeSe のネマティックドメインに敏感な超伝導ギャップ異方性」
- P37) 瀧本諭 (阪大) 「内殻光電子線二色性による強相関立方晶 Pr 化合物 4f 基底状態対称性の観測」
- P38) 檜垣聡太 (広大) 「 η -Mo₄O₁₁ の異方的バンド構造の観測」
- P39) 松下雄一郎 (東大物性研) 「Ni_{1/3}TiS₂ に対するアンフォールド DFT バンド構造と ARPES との直接比較」
- P40) 松田旭央 (広大) 「W(111)のスピンの偏極二重交差バンドの研究」
- P41) 松丸大樹 (東大物性研) 「偏光依存スピン分解 ARPES で見るスピン軌道結合:トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ と TlBiSe₂」
- P42) 馬場基彰 (阪大) 「光を照射しない光誘起相転移の探索」
- P43) 道前翔 (東大物性研) 「高次高調波レーザー時間分解 ARPES による銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 における準粒子ダイナミクスの観測」
- P44) 三石夏樹 (東大工) 「ジグザグ鎖構造をもつ 1T''-(V,Ti)Te₂ の電子状態の研究」
- P45) 宮脇淳 (東大物性研) 「共鳴非弾性軟 X 線散乱の磁気円二色性で見ると α-Fe₂O₃ の弱強磁性」
- P46) 元結啓仁 (東大物性研) 「レーザーPEEM で観測する Ti 酸化物の界面強磁性」
- P47) 山神光平 (阪大) 「銅酸化物高温超伝導体における内殻光電子線二色性の観測」
- P47) 山神光平 (阪大) 「銅酸化物高温超伝導体における内殻光電子線二色性の観測」
- P48) 吉田訓 (東大工) 「角度分解光電子分光による V_{1/3}NbS₂ の電子構造の研究」
- P49) Chun Lin (東大理) 「Effects of pseudogap opening in the anti-nodal region of Bi2212 studied by ARPES」
- P50) 渡邊光 (京大) 「BaMn₂As₂ が示す奇パリティ秩序とその応答の理論的研究」
- P51) 渡邊真莉 (東理大) 「時間分解光電子分光による 2H-NbSe₂ の光励起電子状態の観測」
- P52) 藤原弘和 (岡大) 「ハーフメタル強磁性体 CrO₂ の高分解能スピン分解光電子分光」
- P53) 新田淳 (千葉大) 「高品質ルプレン単結晶の電子構造」



