

平成 3 0 年 度

京 都 大 学 大 学 院 理 学 研 究 科

修 士 論 文 発 表 会

修 士 論 文 要 旨 集

2 0 1 9 年 2 月 4 日 (月) 、 2 月 5 日 (火)

物 理 学 第 一 分 野

物理学第一分野修士論文発表会

場所：理学研究科 5 号館 5 階・第四講義室
発表：15 分（別に質問時間 5 分程度）

2019 年 2 月 4 日（月） 9：00～17：50

目 次

1. 2 軌道 SU(N)量子気体顕微鏡の設計と開発	奥野 大地（ 9：00）・・・	1
2. スメクチック液晶層間のヘテロな高分子化と層圧縮弾性率	加藤 諒（ 9：20）・・・	2
3. スピン軌道結合系における強誘電超伝導の研究	金杉 翔太（ 9：40）・・・	3
4. ダイヤモンドにおけるアクセプタ束縛励起子の基礎光学過程	久保 佳希（10：00）・・・	4
5. ワイル超伝導体 URu ₂ Si ₂ におけるカイラリティ反転と熱ホール効果	坂本 直樹（10：20）・・・	5

10：40～10：50 休憩

6. ハロゲン化鉛ペロブスカイトナノ粒子の荷電励起子ダイナミクス	中原 聡志（10：50）・・・	6
7. 運動量の流れの統計物理学	日浦 健（11：10）・・・	7
8. 気液相分離のスケーリング則における多様性	平泉 真生（11：30）・・・	8
9. 非平衡系(フロケ系と非エルミート系)のトポロジカル相	別所 拓実（11：50）・・・	9
10. 1T-TaS ₂ の量子スピン液体状態におけるランダムネスの効果	村山陽奈子（12：10）・・・	10

12：30～13：30 昼休み

11. 散逸下の量子多体系ダイナミクス	八神 智哉（13：30）・・・	11
12. 親水性および疎水性の剛体を水面に衝突させた際に生じる空洞の数値解析	佐藤 道矩（13：50）・・・	12

13. 弾まない球のハミルトン力学系からの構成	谷口 柊平 (14 : 10) 13
14. 低次元トポロジカル相の機械学習による判別	細川 拓也 (14 : 30) 14

14 : 50 ~ 15 : 00 休憩

15. ^{171}Yb 原子の遍歴・局在 2 軌道系におけるスピン交換ダイナミクスの観測	天野 良樹 (15 : 00) 15
16. パウリ常磁性による超伝導不連続転移に伴う共存状態の研究	入川 健太 (15 : 20) 16
17. 高分子安定化ブルー相中の自己組織化ナノスリッパリー界面と配向揺らぎのダイナミクス	大友 楽人 (15 : 40) 17
18. 重い電子系における結晶 対称性に守られたトポロジカル磁性相	木村 和博 (16 : 00) 18

16 : 20 ~ 16 : 30 休憩

19. スパイク時系列からのネットワーク推定	後藤 達也 (16 : 30) 19
20. STM/STS による Nd ドープ CeCoIn_5 薄膜の超伝導と SDW の共存相における研究	末松 知夏 (16 : 50) 20
21. Sr_2RuO_4 の電気抵抗測定における 超伝導一次転移と上部臨界磁場の面内二回対称性の観測	諏訪 春輝 (17 : 10) 21
22. 安定な Slippery 界面の設計と回転磁場法を用いた表面ダイレクターのダイナミクス解析	高本 幸希 (17 : 30) 22

2019年2月5日 (火) 9 : 00 ~ 14 : 10

23. Atiyah-Hirzebruch スペクトル系列によるトポロジカル相の研究	瀧内 敦司 (9 : 00) 23
24. フォトニック結晶における $\mathbb{Z}_2$ トポロジの観測	瀧口 賢治 (9 : 20) 24
25. 超高感度比熱測定装置による低エネルギー準粒子励起の研究	谷口 智哉 (9 : 40) 25
26. ダイマー・モノマー混合系における Soret 効果	近清なつみ (10 : 00) 26

27. 非摂動論的非線形光学現象における動的対称性

永井 恒平 (10 : 20) 27

10 : 40 ~ 10 : 50 休憩

28. 直流電流による d 電子系酸化物の導電性・磁性の制御

沼崎 凌 (10 : 50) 28

29. 超流動 ^3He ドメイン構造の安定性についての研究

福部 翔太 (11 : 10) 29

30. 非一様せん断における気泡集団の合体過程の研究 (火山噴火脱ガス過程についての一考察)

丸石 崇史 (11 : 30) 30

31. 周期駆動非平衡系における離散時間結晶に関する研究

水田 郁 (11 : 50) 31

32. f 電子系物質におけるラッシュバスピ軌道相互作用の影響 非エルミート効果及び光誘起現象

道下 佳寛 (12 : 10) 32

12 : 30 ~ 13 : 30 昼休み

33. 台風形成の初期段階に関する湿潤対流の数値シミュレーション

山田 遥 (13 : 30) 33

34. 軟 X 線 FEL 照射による Xe クラスターのイオン化とナノプラズマ生成

横野 直道 (13 : 50) 34

2 軌道 SU(N) 量子気体顕微鏡の設計と開発

量子光学研究室 奥野大地

Abstract: We have designed a novel quantum gas microscope enabling a spin-dependent observation of single ytterbium atoms in a 2D optical lattice, which is a powerful tool for quantum simulation of 2-orbital SU(N) Hubbard systems. We also propose novel non-destructive detection of a single atom with squeezed vacuum.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

1995年に冷却原子気体によってボース・アインシュタイン凝縮の実現[1]が報告されて以来、冷却原子気体の量子凝縮系の研究への応用は非常に注目され活発に研究が行われている。特に、光格子中にトラップされた冷却原子は制御性が高くクリーンかつよく孤立した系であるため、ハバード模型などの量子シミュレータとして盛んに研究されている。しかし、冷却原子における従来の研究手法では、原子に対する集団的なアクセスおよび観測が基本であったが、近年は2次元光格子中の各サイトにおける単一の冷却原子を直接観測する、量子気体顕微鏡[2]と呼ばれる技術により、単一原子へのアクセスが可能となって量子シミュレータとしての枠が更に広がっており、特にごく最近ではフェルミハバード系の量子気体顕微鏡の研究が盛んに行われている[3]。これまで量子気体顕微鏡の研究はアルカリ原子を対象として用いたものがほとんどであったが、本研究室で研究の対象として研究を進めているイッテルビウム原子は、2つの安定なフェルミ同位体 ^{171}Yb (核スピン $I=1/2$) と ^{173}Yb ($I=5/2$) を有し、特に ^{173}Yb ($I=5/2$) は SU(6) 核スピン対称性を有し、興味深い量子磁性を示すことが予想されている[4]。また準安定な励起状態である $^3\text{P}_0$ 状態と $^3\text{P}_2$ 状態を持つといったユニークな特徴を有する。特に $^3\text{P}_0$ 状態と基底状態である $^1\text{S}_0$ 状態を用いて、 ^{173}Yb ($I=5/2$) を用いた2軌道系における SU(N) 対称なハバードモデルの研究[2]、および ^{171}Yb ($I=1/2$) を用いた近藤効果の研究[5]が可能となる。そこで本研究では、このような Yb 原子のユニークな特徴を最大限に生かしたフェルミ量子気体顕微鏡の設計・開発を行った。

本研究ではまず装置の要であるガラスセルと固浸レンズ (Solid Immersion Lens: SIL) の取り付けを行い、その後、Zeeman 減速および磁気光学トラップによって捕捉した原子を双極子トラップによってガラスセルに移動させ、交差型の光トラップを確認した。次にこの原子集団を周波数差をつけた光格子 (光コンベヤ) によって SIL 直下までの輸送を試みた。また、単一二次元原子層の生成に必要な格子間隔が可変なアコーディオン型光格子の光学系の設計と性能のテストを行った。ここに $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$ 間の魔法波長である 759nm による光格子を導入することで2軌道系物理の研究が可能となる。加えて、1080nm 光格子と切替可能な装置設計を行い、冷却プロセスを必要としない撮像も可能としている。

また、量子気体顕微鏡の新しい可能性として、非破壊で単一原子観測を行う新しいスキームを考案した。これは、すでに当研究室で単一原子観測に成功したファラデーイメージング[6]に真空スクイーズド状態を導入し、走査型のヘテロダイン測定を行うスキームであり、ショット雑音以下の測定により理想的には光子吸収を起こさずに原子の検出が可能となる。このような測定によって、同一の原子集団におけるスピン成分を区別した測定が十分なフィデリティを保って可能となれば、冷却原子を用いたスピンドYNAMIXの研究に大きく貢献するものである。

References

- [1] M. H. Anderson *et al*, Science **269**(5221), 198-201(1995).
- [2] W. S. Bakr *et al.*, Nature **462**(7269), 74(2009).
- [3] M. Parsons *et al.*, Science **353**(6305), 1253-1256(2016).
- [4] M. A. Cazalilla and A. M. Rey, Rep. Prog. Phys. **77**, 124401 (2014).
- [5] K. Ono *et al.*, arXiv:1810.00536(2018).
- [6] R. Yamamoto *et al.*, PRA **96**(3), 033610(2017).

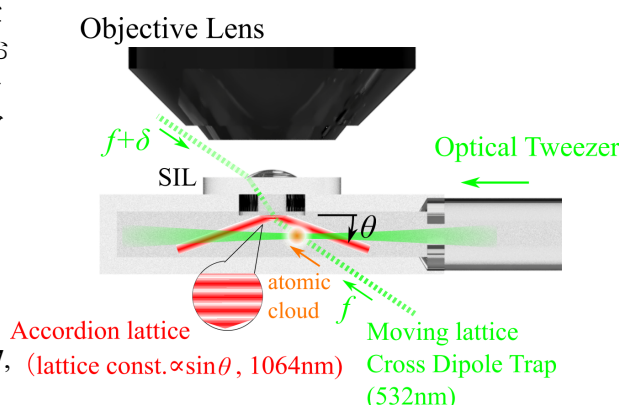


Fig. 1 Schematics of Quantum Gas Microscope: 2D single atom layer just below the SIL is prepared by moving lattice and accordion lattice.

スメクチック液晶層間のヘテロな高分子化と層圧縮弾性率

ソフトマター物理学研究室 加藤 諒

Abstract Smectic phase has layer structure and layer compression modulus. We modulated the layer structure by inserting a two-dimensional polymer sheet in-between layers using photo-polymerizable monomers. We found the layer compression elastic modulus was reduced by this modulation.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

【概要】スメクチック相と呼ばれる液晶は、層構造を有しており、隣り合う層に属する液晶分子が、熱運動により直接衝突することによって起因する、排除体積相互作用で安定化されている。また、層法線方向の歪に対する弾性を層圧縮弾性率 B と呼び、その大きさはこの排除体積相互作用を直接反映している。一方、スメクチック相に添加した溶媒は、層間に自発的に局在することが知られている[1]。この局在効果を利用して光重合性モノマーを層間に局在させ、紫外線照射によりその場で重合させることによって、二次元の高分子ナノシートを層間に挿入した構造を作ることができる[2]。そこで、本研究では層圧縮弾性率 B の変化を測定し、層間に挿入された高分子ナノシートが排除体積相互作用に与える影響を調べた。その結果、高分子ナノシートが層間に挿入されたスメクチック相は、層圧縮弾性率 B が小さくなることが分かった。硬い高分子ナノシートを挿入しているにもかかわらず、層圧縮弾性率 B が低下する理由は、層圧縮弾性の起源が、層間での液晶分子の直接衝突に起因した排除体積相互作用であり、層間に局在した高分子シートが液晶分子間の直接衝突を阻害するためと考えると矛盾なく理解できる。

【実験・考察】一般的に液晶に不純物を添加すると、液晶相の出現温度範囲は狭くなる。そこで本研究では、スメクチック C 相を発現する液晶 (MHP0BC) にスメクチック A 液晶 (100CB) を混合することで、SmA 相の出現範囲を拡大した Induced SmA 相をホスト液晶として利用した。モノマー 12A と H6 を 1:1 で混合したものを、この液晶に 4%、9%、13% 混合し小角 X 線回折により層間隔を測定すると、Fig. 1 のように、モノマー濃度に対して線形に層間隔が伸長していることが分かった。これはモノマーが層間に完全に局在していることを証明している。次に層圧縮弾性率測定を行った。Fig. 2 に層圧縮弾性率測定装置の概略図を示す。この装置はピエゾ素子を使って入出力の正弦波信号の電圧比と位相から層圧縮弾性率を求めることができる。この装置に光重合性モノマーを添加した液晶試料を垂直配向させて封入し、等方相からスメクチック相にすることで、自発的に層間にモノマーを分布させた。その後、層圧縮弾性率測定中に試料に紫外光を照射することで、層間に局在したモノマーをその場で高分子化し、硬いナノシートが層間に挿入されたスメクチック相を作った。高分子化による層圧縮弾性率の変化を Fig. 3 に示す。重合を開始した時間から弾性率が低下しているのがはっきりと示されている。すなわち、層間に挿入された 2 次元高分子シートが、スメクチック液晶の隣接層間分子の排除体積相互作用を阻害し、オリジナルのスメクチック液晶に比べて層圧縮弾性率 B が低下したと結論できる。

References

- [1] K.Hata, Y.Takanishi, I.Nishiyama, and J.Yamamoto, EPL. 120(5), 56001. (2018)
- [2] 川本道久. 修士論文: スメクチック液晶層間のヘテロな高分子化と C-director ダイナミクス. 2011

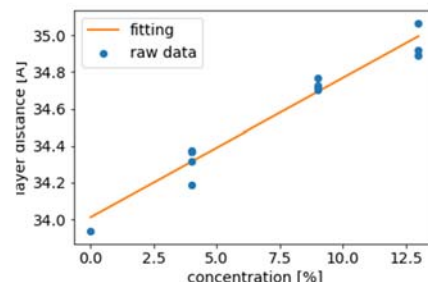


Fig.1 concentration dependence of the layer distances.

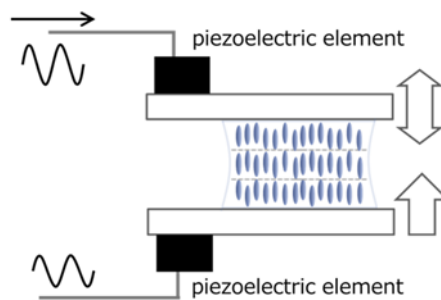


Fig.2 the scheme of layer compression modulus measurement.

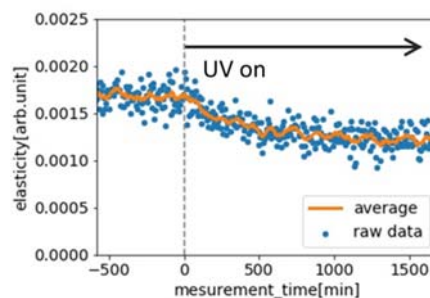


Fig.3 layer compression modulus change by UV irradiation.

スピン軌道結合系における強誘電超伝導の研究

凝縮系理論研究室 金杉翔太

Abstract We investigated the stability of the ferroelectric superconductivity in which superconductivity coexists with ferroelectric order. We found that the ferroelectric superconducting phase is stabilized under the magnetic field, or in the low carrier density regime. In addition, we studied the correlation between the ferroelectric superconductivity and multiorbital effect in SrTiO_3 .

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

近年の凝縮系物理学において「超伝導と他秩序の相関」は活発に研究されてきたテーマである。例えば強相関電子系超伝導体の研究では反強磁性スピン揺らぎによる異方的超伝導の発現機構が解明され、鉄系超伝導体の研究ではネマティック秩序相近傍の超伝導が注目を集めている。一方、空間反転対称性の破れた超伝導体では反対称スピン軌道相互作用を通じて、Cooper 対のパリティ混成など多くの興味深い超伝導現象が現れる。では、自発的な空間反転対称性の破れを伴う奇パリティ秩序と超伝導の間にはどのような相関があるだろうか。候補物質は少ないものの、奇パリティ秩序と超伝導の協奏は近年になって注目され始めている。特に SrTiO_3 においては強誘電秩序と共存する超伝導、すなわち「強誘電超伝導」が発見され[1]、強誘電秩序と超伝導の関係が理論・実験の双方で注目を集めている。そこで本研究では、強誘電超伝導の安定化機構を理論的に解明し、今後の物質探索や理論研究の指針にすることを目的とした。

まず、強誘電超伝導の安定性を議論する第 1 段階としてミニマルモデルを用いた解析を行い、物質によらない一般的な安定化機構を解明した[2]。ミニマルモデルとしては格子と結合した擬 2 次元電子系を考えた。解析では強誘電秩序が Rashba 型スピン軌道相互作用を誘起すること[3]に着目し、「自発的な Fermi 面の Rashba 分裂」として強誘電転移を特徴づけた。その結果、強誘電超伝導の安定化機構には 2 種類あることを示した。1 つは外部磁場による強誘電超伝導の安定化であり、Rashba 型スピン軌道相互作用による Pauli 対破壊効果の抑制に起因している。この現象は超伝導を利用した強誘電秩序の磁場制御を意味しており、超伝導マルチフェロイクスとも呼ぶべき新奇な応答である。2 つ目は低キャリア密度領域における強誘電超伝導の安定化であり、外部磁場なしで強誘電超伝導相が安定化する。この現象は低キャリア密度領域で強誘電秩序が誘起する Lifshitz 転移に起因しており[4]、 SrTiO_3 のような低キャリア超伝導体での実現が期待される。

次に、具体的な候補物質としてバルク SrTiO_3 を考え、 SrTiO_3 のバンド構造を再現する多軌道モデルを用いて強誘電超伝導の解析を行った (Fig.1)。解析の結果、低キャリア密度超伝導体の SrTiO_3 では Lifshitz 転移によってゼロ磁場で強誘電超伝導相が安定化することを明らかにできた。これはミニマルモデルで得られた結果と整合する。さらに、3 つの t_g 軌道がバンドを構成する SrTiO_3 では、多軌道効果によって非自明な波数依存性を持つ反対称スピン軌道相互作用が生じることを示した。この多軌道効果は Pauli 対破壊効果の抑制を増強し、 SrTiO_3 では磁場中における強誘電超伝導の安定性が大幅に増大することを解明した。

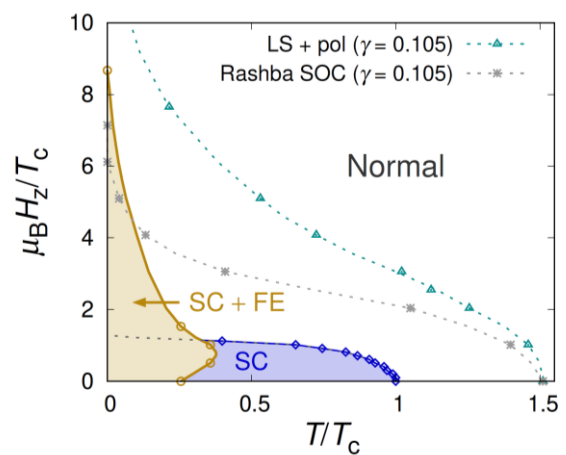


Fig. 1. Calculated phase diagram of dilute superconducting SrTiO_3 with polar lattice instability. Ferroelectric superconducting phase (SC+FE) is stabilized even though the normal state is paraelectric.

References

- [1] C. W. Rischau *et al.*, Nat. Phys. **13**, 643 (2017).
- [2] S. Kanasugi and Y. Yanase, Phys. Rev. B **98**, 024521 (2018).
- [3] G. Khalsa *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 041302 (2013).
- [4] E. Cappelluti *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 167002 (2007).

ダイヤモンドにおけるアクセプタ束縛励起子の 基礎光学過程

光物性研究室 久保 佳希

Abstract Optical absorption measurement of acceptor-bound excitons in diamond had long been absent. By means of deep ultraviolet spectroscopy, we successfully obtained the absorption spectra of a high-quality boron-doped diamond and assessed the bound-exciton radiative lifetime of 1.8 microseconds. Our finding is essential to understand recombination processes of excitons in diamond.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

ダイヤモンドは半導体の中で最高の熱伝導率や両極性の高移動度など優れた特性を多く有し、次世代電子デバイスへの応用が期待される物質である。中でも、ボロンを不純物として添加しアクセプタ準位を導入したボロンドープダイヤモンドは、唯一 p 型の伝導性を示すダイヤモンドとして重要である。真性ダイヤモンドの光学スペクトルにおいては励起子が主要な寄与を占めるのに対して、ボロンドープダイヤモンドでは励起子が中性ボロンアクセプタに束縛されて束縛励起子が形成される。このアクセプタ束縛励起子について、カソードルミネッセンス測定が盛んに行われ、エネルギー構造の議論がなされてきた[1]。しかし、発光の逆過程である吸収の測定はこれまでなされておらず、輻射寿命などの光学物性値は長く未解明であった。

本研究では、プラズマ化学気相成長法により作成された高品質の試料[2]と深紫外領域における精密な分光測定により、ダイヤモンド中のアクセプタ束縛励起子による吸収の測定に初めて成功した。Fig. 1(a) に実線で示されたボロンドープダイヤモンドの吸収スペクトルでは、破線で示された真性ダイヤモンドにはない束縛励起子によるピークが見い出された。ゼロフォノン (NP) 線の振動子強度は、Fig. 1(b) の影付きの領域で示された吸収断面積から 3.0×10^{-5} と決定した。この値は、シリコンで知られる NP 線の振動子強度が束縛励起子の局在化エネルギーの 2.5 乗に比例するというスケール則を満たすことを見出した。また、最も吸収断面積の大きいフォノン側線成分については振動子強度 1.2×10^{-3} を得、束縛励起子の輻射寿命を $1.8 \mu\text{s}$ と決定した。さらに、励起子と束縛励起子の発光強度比から得られる不純物感度因子[1]を用いることで、励起子の輻射寿命を $3 \mu\text{s}$ と決定した。

本研究によって、ボロンドープダイヤモンドにおける励起子の緩和過程の全容が解明された。また、現在は結晶合成技術の問題から吸収測定ができない n 型のドープダイヤモンドに対しても、本研究で検証されたスケール則を用いることで、光学過程に関する基礎物性値の評価が可能になった[3]。

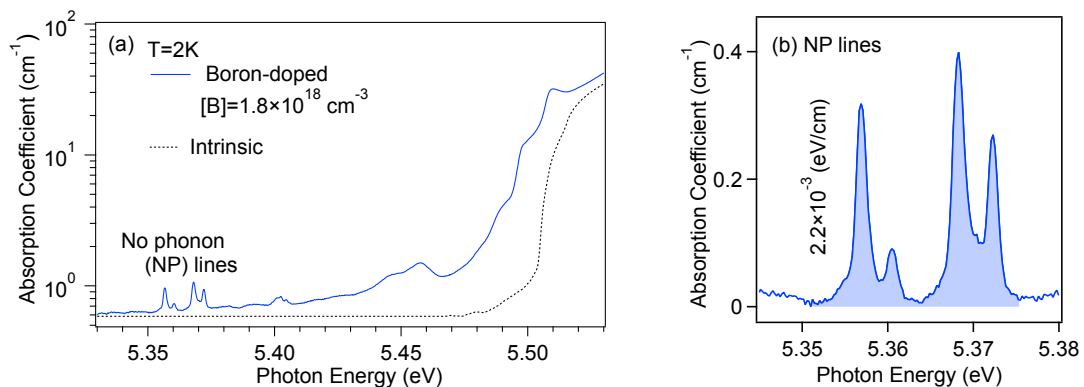


Fig. 1 – (a) Absorption spectra of boron-doped (solid line) and intrinsic (dotted line) diamond near the band edge.
(b) Enlarged NP lines showing the absorption cross section by the shaded area.

References

- [1] J. Barjon, Phys. Status Solidi A **214** (2017), 700402.
- [2] R. Issaoui, *et al.* Appl. Phys. Lett. **100** (2012), 122109.
- [3] Y. Kubo, *et al.* “Radiative lifetime of boron-bound excitons in diamond”, preprint.

ワイル超伝導体 URu₂Si₂ におけるカイラリティ反転と熱ホール効果

凝縮系理論研究室 坂本直樹

Abstract We studied topological properties of URu₂Si₂. It is considered that this compound has two Weyl nodes at south and north pole points of Fermi surface. Here, we present the energy spectrum and Chern number. Our results show that new kind of Weyl nodes appear. Moreover, we present thermal Hall conductivity.

©2018 Department of Physics, Kyoto University

URu₂Si₂ は、その U 原子が c 軸方向に異方性を持つ体心立方晶の構造をとり、副格子自由度をもつ。約 0.75GPa 以下かつ 1.4K 以下でカイラル d 波超伝導が実現していると考えられている。さらに、約 17.5K 以下では隠れた秩序相と呼ばれる相が実現していると考えられている。この隠れた秩序相の秩序変数は現在まで解明されていない。ゆえに、隠れた秩序相の秩序変数が調べられてきた。また、バンド計算によると、 k 空間の M 点周りにフェルミ面が存在している。その結果、フェルミ面の北極と南極にポイントノードが、 $k_z = 0$ の赤道にラインノード存在している [1, 2]。これらのポイントノードはワイルノードであり、トポロジカル数によって守られている [3,4]。しかし、URu₂Si₂ のトポロジカルな性質は従来より知られていた単

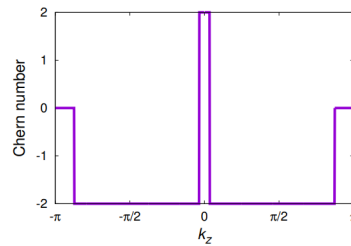


Fig 1: Chern number as a function of k_z on Brillouin zone. There are two points where Chern number changes from 2 to -2 .

純なものではない可能性を私達は見出した。まず、副格子間と副格子内のペアポテンシャルの比の様々な値についてチャーン数の k_z 分布を調べた。その結果、チャーン数の符号が反転するカイラリティ反転が起きることが判明した。これらのチャーン数の変化は新たなワイル点の出現を意味する。さらに、隠れた秩序の効果を検討した場合、フェルミ面が変形して、チャーン数が -1 や 3 の奇数にもなることがわかった。この結果から、隠れた秩序の効果によりワイルノードの配置が変わったことがわかった。さらに、測定できる物理量としてトポロジカルな性質を反映する熱ホール伝導度も計算して、実験による検証方法の提案をした。

References

- [1] S. Kittaka et al, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 033704 (2016).
- [2] K. Yano et al, Phys. Rev. Lett. 100, 017004 (2008).
- [3] M. Sato and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 072001 (2016).
- [4] S. A. Yang et al, Phys. Rev. Lett. 113, 046401 (2014).

ハロゲン化鉛ペロブスカイトナノ粒子の荷電励起子ダイナミクス

ナノ構造光物性研究室 中原聡志

Abstract We investigated the generation and recombination dynamics of trions (charged excitons) in lead halide perovskite nanocrystals (NCs). By conducting the transient absorption spectroscopy on the untreated and surface-treated NC samples, we clarified that trions were generated via both Auger recombination and surface carrier trapping processes.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

ハロゲン化鉛ペロブスカイト CsPbX_3 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) は優れた光学特性を持つことから、新しい光電変換材料としての利用が期待され、精力的に研究が行われている。そのナノ粒子は室温においても高い発光量子効率を示す。さらに、粒子サイズやハロゲン組成を変化させることで発光波長を可視域全体で制御でき、低閾値でレーザー発振をすることから、発光ダイオードやレーザーなどの発光デバイスとしての応用が期待されている。ナノ粒子を光励起すると、電子・正孔対(励起子)と余剰電荷の3体で安定化した状態である荷電励起子が生成されることが知られている。荷電励起子はナノ粒子の発光明滅を引き起こし、発光効率を低下させることが問題となっている一方で、光学利得の閾値を下げるという利点を有する[1,2]。そのため、高効率な発光デバイスの実現には、荷電励起子生成の制御と同時にそのダイナミクスの詳細な理解が必要である。荷電励起子の生成には余剰電荷の生成、すなわちナノ粒子のイオン化(帯電)が非常に重要である。しかし、ペロブスカイトナノ粒子のイオン化および中性化過程はほとんど理解されていない。

本研究では、過渡吸収(TA)分光法を用いて CsPbBr_3 ナノ粒子における荷電励起子および帯電ナノ粒子の生成・緩和メカニズムを調べた。チオシアン酸ナトリウム(NaSCN)を用いた表面処理により、表面トラップを低減させた試料と表面処理を行っていない試料を用意し、それぞれに対しTA測定を行った。表面処理なしの試料から得られた信号の励起強度依存性を Fig. 1 に示す[3]。励起強度の増大とともに、速い寿命を持つ励起子分子・荷電励起子の成分が出現した。これらのTA信号から励起子、荷電励起子、励起子分子成分を抽出し、荷電励起子の生成効率を表面処理の有無で比較したところ、全ての励起強度で表面処理により荷電励起子生成は抑制されていることを見出した(Fig. 2)。特に、TA信号の励起強度依存性の解析から、弱励起条件下ではナノ粒子の表面トラップが荷電励起子生成を支配しており、励起強度の増加と共に非輻射 Auger 再結合による帯電(Auger イオン化)の寄与が大きくなることを明らかにした。さらに、Auger 再結合によるナノ粒子の帯電・中性化ダイナミクスを詳細に調べるため、ダブルポンプ TA を行った。TA信号の励起パルス間隔依存性の測定から、帯電ナノ粒子の生成・緩和を観測することに成功した。特に、帯電ナノ粒子の中性化過程には、ナノ粒子外部からのキャリア移動およびナノ粒子表面トラップからのキャリア再放出の2つの過程が存在することが分かった[4]。

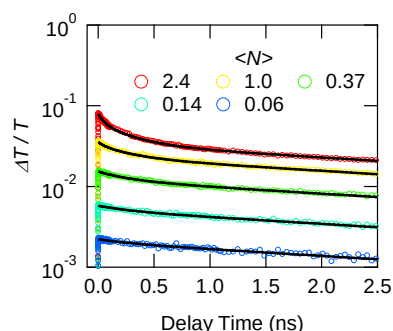


Fig. 1. TA dynamics of untreated NCs. The solid curves are the fitting results. The average number of absorbed photons is denoted by $\langle N \rangle$.

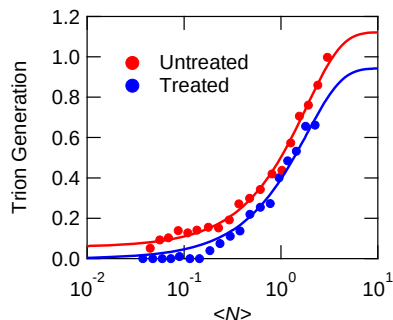


Fig. 2. Excitation fluence dependence of ratios between the trion and exciton amplitudes.

References

- [1] N. Yarita *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **8**, 1413 (2017).
- [2] Y. Wang *et al.*, Nano Lett. **18**, 4976 (2018).
- [3] S. Nakahara *et al.*, J. Phys. Chem. C **122**, 22188 (2018).
- [4] S. Nakahara *et al.*, 投稿準備中.

運動量の流れの統計物理学

非線形動力学研究室 日浦健

Abstract We study the momentum current from a viewpoint of statistical physics. In the first study, we investigate relations between equilibrium fluctuations of thermodynamic pressure, mechanical pressure and pressure in experiments. In the second study, we examine linear viscoelasticity of one-dimensional chains, especially focusing on the emergence of dissipation in infinite systems.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

運動量の流れの統計物理学に関する以下の二つの研究を行った。

(1) 平衡状態における圧力ゆらぎ[2] 平衡状態における仕事変数の組のゆらぎはアインシュタインの熱力学ゆらぎの理論によって記述される．ところが，平衡統計力学を前提にしたとき，エントロピーや温度などの非力学変数は対応する力学的な記述を持たないため，そのゆらぎという概念には慎重を要する．ランダウとリフシッツは，これらの非力学変数に熱力学関係式を用いて形式的に力学変数を対応させることでそのゆらぎを計算している[1]．この処方箋は多くの教科書や文献に見られるものの，あくまで形式的な対応付けであり，実験で測定される量との関係が明示的でないため，しばしば論争的となってきた．

本研究では，この処方箋から定義される圧力と実験で測定可能な量との関係，および処方箋が有効になる(あるいはならない)実験的な条件を，特に圧力という物理量に着目して検討した．圧力は温度と同じ示強変数であるという理由で，先に述べた熱力学関係式を用いた定義に基づいてゆらぎが計算される場合があるが，一方で運動量流束を用いた力学的な定義を持つ．そこで，熱力学関係式を用いた圧力，力学的な圧力，実験で測定される圧力の三者の関係を調べた．

第一の結果として，力学的な圧力の分散は熱力学関係式を用いた圧力の分散よりも常に大きくなることを示した．また，この差異は後者が等エネルギー面上での力学的圧力のゆらぎの寄与が含まれていないことに由来することを明らかにした．

第二の結果として，圧力測定として適切な条件を満たすような実験においては，有限時間で測定される圧力の分散は熱力学関係式を用いた圧力の分散よりもやはり大きくなるが，長大な測定時間の極限で分散が後者へと漸近することがわかった．つまり，ランダウとリフシッツによる処方箋は長時間極限においてのみ有効であり，短時間の測定では破綻しうる．特に，運動量流束を直接観察できるような理想的なプローブを用いた実験設定を考え，このクロスオーバーが起こる測定時間を評価した．

(2) 一次元鎖の線形粘弾性 物質の変形に対する力学的な応答は時間スケールに応じて流体的にも固体的にも振る舞う[3]．微小な変形に対する挙動に限れば，物質は応力と変形の履歴とを結ぶ応答関数によって特徴づけることができる．ミクロな力学記述の立場からは，応答関数は平衡状態における応力の時間相関で表される．一方，実験データは，より単純な現象論的モデルを用いたパラメータ調整で解析されることが多い．本研究では，このような現象論的モデルのミクロな基礎付けを求めて，一次元鎖の引っ張りに対する線形粘弾性を調べた．特に，一次元調和鎖について断熱系および熱浴と接触させた可解系(Zwanzigモデル)のそれぞれについて応答関数を厳密に求めた．

断熱系の場合，外部から与えられた変位または運動量流の影響は，有限系では振動として常に残り続けるが，無限系では無限個のモードの重ね合わせによる減衰が生じるという散逸的な振る舞いが見られることがわかった．一方，熱浴と接触させた可解系でも，系と熱浴を共に有限に保つ限り散逸が生じることはなく，無限自由度の熱浴を用いてはじめて摩擦が生じることがわかった．

References

- [1] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, “*Statistical Physics, 3rd edition, Part I*”, (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1980).
- [2] K. Hiura, S. Sasa, J. Stat. Phys. **173**, 285-294 (2018).
- [3] H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters, “*An Introduction to Rheology, 1st edition*”, (Elsevier, Amsterdam, 1989)

気液相分離のスケーリング則における多様性

非線形動力学研究室

平泉真生

We study the scaling law for phase ordering of liquid-gas mixtures. We consider three models which originate from fluid dynamics with interface thermodynamics. By numerically solving these models, we observe various power laws depending on the models. The result raise a new question on the universality of the scaling law. ©2018 Department of Physics, Kyoto University

相分離のスケーリング則についてはこれまで多数の研究が行われてきた。その結果、特徴的なスケール $R(t)$ (例えばドロップレットの大きさ) のスケーリング則には系の詳細によらない普遍性がある事が分かってきた。保存系のスケーリング則に関する理論には LSW 理論[1]があり、 $R(t) \sim t^{\frac{1}{3}}$ を予言している。この解析は一つの相がもう一方の相より十分マイナーであることを仮定しているため、一般的な証明にはなっていないが、数値計算の結果、相の割合や次元によらずスケーリングが $1/3$ だと確認されたため、 $R(t) \sim t^{\frac{1}{3}}$ という普遍性があると考えられてきた。

しかし実際の気液相分離では、流体効果や潜熱の影響があり、上の $1/3$ 乗則が成り立つ事は自明ではない。相分離に対する流体の効果については様々な理論[2]があるが、これらは有効モデルに基づく解析や特殊な条件での解析であり、熱力学や統計力学に立脚したものとは言えず、再考の余地がある問題である。

スケーリング則に対する流体や潜熱の影響を調べるために、3種類のモデルに対して数値計算を行なった。一つ目のモデルは通常の流体方程式の圧力項を界面の熱力学から導かれる応力テンソルに置き換えた方程式系であり[3]、密度、全運動量、全エネルギーが保存する系である。解析の対象は気液系に限定されている。二つ目のモデルは、一つ目のモデルから速度の自由度を消去したモデルであり、密度と全エネルギーが保存する系である。これらの比較からスケーリングに対する速度の影響を観察できる。3つ目は等温な系であり、密度と全運動量が保存する。この系では温度の緩和が瞬時に起きており、潜熱の影響が現れない系である。従って一つ目のモデルとの比較から潜熱の影響を観察できる。また密度の初期条件を変える事で相の割合の影響についても測定を行った。さらに粘性や熱伝導率の影響も測定を行なった。

その結果、モデルや相の割合などによってスケーリングが大きく異なる事が分かった。特に粘性が小さい系や速度の自由度が残っている系では $1/3$ から大きく外れていたのに対し、粘性が大きい系や速度の自由度を消去した系では $1/3$ に近づく事がわかった。これらの結果は、スケーリング則における普遍性の存在に疑問を投げかけるものである。

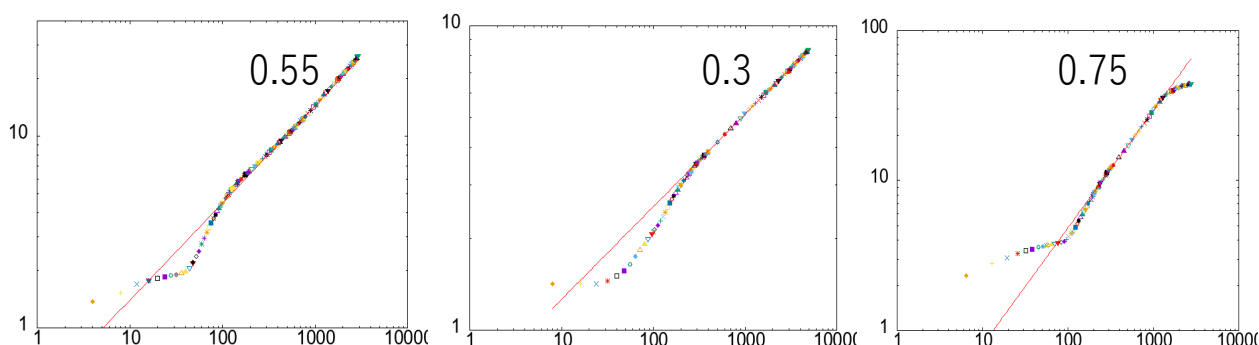


Fig. 1. Log-log plots for the characteristic length $R(t)$ as a function of time t . These are obtained from numerical simulations of three different models; the full hydrodynamic equations with interface thermodynamics (left), without the momentum conservation (center), without the energy conservation (right).

References

- [1] Lifshitz, I. M., and Slyozov, V. V., J. Phys. Chem. Solids **19**, 35 (1961).
- [2] Furukawa, H., Adv. Phys., **34**, 703 (1985); Siggia, E., Phys. Rev. A **20**, 595 (1979).
- [3] Onuki, A., Phys. Rev. E **75**, 036304 (2007).

非平衡系(フロケ系と非エルミート系)のトポロジカル相

物性基礎論：凝縮系物理 別所拓実

Abstract The topological phases in non-equilibrium system is studied. First, I studied the Floquet topological phases. The topological classification of Floquet gapped phases is equivalent to the topological classification of equilibrium gapped phases when we consider two natural extensions of symmetries. Second, we studied the non-hermitian gapless phases. We obtained the topological classification of gapless phases and studied its relation to the exceptional points.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

(1) フロケ系のギャップに守られたトポロジカル相の分類

フロケ系とは、固体に光を当てるなどして実現される時間周期的なハミルトニアンに支配された系である。フロケ系では、ストロボスコピックな振る舞いを記述する有効ハミルトニアン（フロケハミルトニアン）を考える際に、ブロッホの定理の時間方向の拡張からエネルギー方向に周期性がある。これに由来して、平衡系では実現できないような Chern 数が 0 なのに摂動に対して強いゼロエネルギーエッジモードを持つモデルが作られる[1]。このような平衡系では実現不可能な構造について系統的に理解すべく、フロケ系において拡張した AZ 対称性の下でのギャップに守られたトポロジカル相の分類が行われた。その結果得られた分類表は平衡系と一致している。

これに対して、私は AZ 対称性の拡張の仕方に一意性がないことに疑問を抱き、別の AZ 対称性の拡張を考えた。そして、その対称性の下での分類が普通のフロケ系における AZ 対称性の下での分類と一致することを示した。さらに、結晶対称性[2]まで議論を拡張して、2 種類のフロケ系の結晶対称性の定義の下でのトポロジカル相の分類がいずれも平衡系の結晶対称性の下でのトポロジカル相の分類と一致することを示した。そして、分類の一致の直観的な理由を与えた。

(2) 非エルミート系のギャップレス点の分類と例外点の関係

非エルミート系とは、ハミルトニアンが散逸などの効果によってエルミート性を失った系である。実験的には開放冷却原子系、強相関係、フォトリソグラフィ結晶、光導波路、格子状の電気回路などで実現される。非エルミート系のハミルトニアンはエルミート系とは異なる数学的構造を持ち、そのために平衡系では実現しえない形状のエネルギーギャップに守られたトポロジカル相の存在、バルク固有状態の端への局在（表皮効果）、固有状態の融合などの興味深い問題がある。これらの構造について理解を深めるべく近年理論研究・実験研究が盛んに行われている。

本研究では、このうち固有状態の融合する波数点[3]について、トポロジカル観点から詳しく調べた。題目の例外点とは、本来の数学的な定義からいえばブリルアンゾーンにおいてエネルギー固有値が縮退する波数点のことを指す[4]。混同を避けるため、特にそのような縮退点の中でも固有状態が融合するような波数点のことは欠失点 (defective point) と呼ぶことにする。この欠失点は摂動に対して強い場合があり、対称性を課すと新しい欠失点が現れることや欠失点がトポロジカル数を持つことが先行研究で調べられている。欠失点がトポロジカル数を持つことから、欠失点の統一的な理解には、ギャップレス点のトポロジカルな分類が有効であることが示唆される。そこで、本研究では対称性を課した時のギャップレス点のトポロジカルな分類を行った。そして、具体的なモデルを通してギャップレス点と縮退点、欠失点との関係性を調べ、その結果、欠失点はゼロエネルギー点ギャップのギャップレス点の分類と深い関係を持つことが確認できた。修士論文発表会では(2)について話す。

References

- [1] T. Kitagawa, E. Berg, M. Rudner and E. Demler, Phys. Rev. B **82**, 235114 (2010).
- [2] K. Shiozaki and M. Sato, Phys. Rev. B **90**, 165114 (2014).
- [3] H. Shen, B. Zhen, and L. Fu, Phys. Rev. Lett. **120**, 146402 (2018).
- [4] T. Kato, Perturbation Theory for Linear Operators (Springer Science & Business Media, New York, 1966), Vol. 132.

1T-TaS₂の量子スピン液体状態における ランダムネスの効果

量子凝縮物性研究室 村山陽奈子

Abstract 1T-TaS₂ is recently proposed as an ideal candidate material for quantum spin liquid on a two-dimensional triangular lattice. Low-temperature thermal conductivity and specific heat measurements revealed the presence of both itinerant and localized gapless spin excitations. This suggests the coexistence of itinerant quasiparticles and orphan spins forming random singlets.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

スピン系において、量子揺らぎにより絶対零度まで長距離秩序を示さずスピンが凍結しない量子スピン液体状態は、単純な対称性の破れを示さず、強い量子力学的なエンタングルメントを有する新しい量子相である。また、励起状態ではスピンの分裂に伴う分数励起としてエキゾチックな創発準粒子の出現が提案されており、低エネルギー励起の性質を明らかにすることは量子スピン液体の解明に重要である。一方、量子スピン液体においてランダムネスが本質的に重要な役割を果たすことが最近理論的に指摘されているものの、実験的には系統的な研究がないのが現状である。

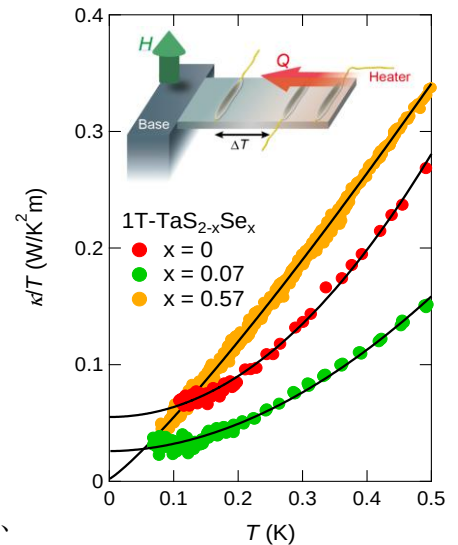
2次元以上の系では、量子スピン液体の実現に幾何学的フラストレーションが重要であると考えられており、なかでも二次元三角格子をもつ反強磁性絶縁体の研究が精力的に行われてきた。最近、遷移金属ダイカルコゲナイドの一つである 1T-TaS₂において量子スピン液体状態の実現が指摘されている[1,2]。1T-TaS₂は低温で電荷密度波相へ転移しモット絶縁体状態になる。このとき13個のTaからなるクラスターが二次元三角格子を形成し、各クラスターにスピン1/2が局在する。従来の候補物質と比べて全くひずみのない三角格子が実現されるため、1T-TaS₂は量子スピン液体状態の性質を解明する上で理想的な物質だと考えられる。

以上の背景のもと、本研究では1T-TaS₂の量子スピン液体状態における低エネルギー励起を解明するために、熱伝導率および比熱の測定を行うと共に、ランダムネスの効果を調べた。熱伝導は遍歴的な励起のみを検出し、比熱は遍歴的な励起と局在的な励起の両方を検出するため、両者の測定によって低エネルギー励起の性質を詳細に調べることができる。測定の結果、絶縁体であるにもかかわらず、絶対零度極限で金属的な熱伝導率および比熱が観測された。これらはギャップレスかつフェルミオンの準粒子が存在することを意味する。さらに、熱伝導率と比熱は互いに大きく異なる磁場依存性を示し、遍歴的なギャップレススピン励起と局在的なギャップレススピン励起が共存していることが示唆される。これは、遍歴励起を伴う量子スピン液体状態と局在励起を伴うランダムシングレット状態—孤立した局在スピンによるシングレット形成—が共存するという、最近理論的に提案された描像でよく説明できる。

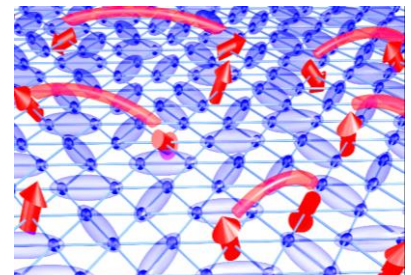
さらにランダムネスの効果を明らかにするために、Se置換系 1T-TaS_{2-x}Se_xおよび電子線照射により点欠陥を導入した系についても低エネルギー励起を調べた。その結果、遍歴的なギャップレススピン励起はランダムネスにより大きく抑制されることが明らかとなり (図1)、これは量子スピン液体状態とランダムシングレットの共存を支持するものである。

References

- [1] K. T. Law, *et al.*, PNAS **110**, 6996-7000 (2017).
- [2] M. Klanjsek, *et al.*, Nature Physics **13**, 1130 (2017).
- [3] H. Murayama, *et al.*, arXiv:1803.06100 (2018).



(Fig. 1) Temperature dependence of thermal conductivity κ at 0 T



(Fig. 2) Random singlets formed by orphan spins in the quantum spin liquid

散逸下の量子多体系ダイナミクス

量子光学研究室 八神智哉

Abstract We succeeded in creating novel quantum many-body systems governed by PT-symmetric non-Hermitian effective Hamiltonians. In addition, towards the novel creation of quantum many-body state, we investigated the saturation of the atom number loss in the Fermi-Hubbard system with two-body loss.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

現実の多くの実験系は環境と結合していて系にデコヒーレンスや散逸を生じさせる。このような系は開放系と呼ばれ閉じた系とは性質が大きく異なる。近年の量子情報の研究では量子状態の精密な操作や高いコヒーレンスが必要とされ、開放系の研究はより重要になってきている。また逆に散逸を利用して系を望ましい系へと至らせる方法も理論的に研究されている。特に近年、スピン自由度を持つ1次元フェルミハバードの系で2体ロス過程により原子数が飽和すること、飽和した原子の状態が高くエンタングルしたDicke状態であることが予想され[1]、それを示唆する実験が報告された[2]。また開放系の研究における注目すべき系としてはPT対称性を持つ非エルミートハミルトニアンに従う系が挙げられる。非エルミートハミルトニアンが空間反転(Parity)対称性と時間反転(Time-reversal)対称性を組み合わせたPT対称性をもつとき、エネルギースペクトルがすべて実になることがあると理論的に指摘された[3]。それ以来、非エルミートなハミルトニアンとPT対称性の研究は理論的にも実験的にも盛んに進められている。しかしこれまで行われてきた実験は相互作用がない単純な系や平均場で記述されるような系であり、相互作用が重要になる量子多体系では行われていない。

本研究では非共鳴なレーザー光(波長 1112nm)によって ^{174}Yb 原子の閉じ込めポテンシャルを作る光格子(格子定数 556nm)とその半分の波長で Yb 原子の $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$ 遷移に共鳴する光(波長 556nm)による原子ロスを誘起する光格子(格子定数 278nm)を組み合わせることで、PT対称な非エルミートハミルトニアンを持つ量子多体系を実現した(Fig. 1)。Fig. 2 に1体原子ロスの場合の2つの光格子の相対位相依存性を示す。共鳴光格子として1体原子ロス、2体原子ロスを誘起する2種類で実現することに成功した。さらにこの系で原子数の時間変化の振舞いを測定した(Fig. 3)。

また散逸によるDicke状態の生成に向けて、および、スピン相関のプロープとして、SU(6)対称性を有した ^{173}Yb を1次元光格子中に導入し、光会合光により2体原子ロスを誘起する実験を行った。その結果、原子数ロスが飽和する振舞いをすることを確認した。

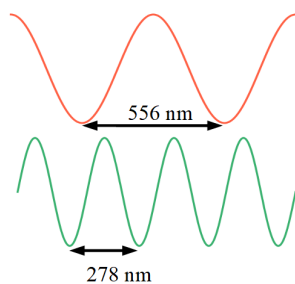


Fig. 1. Optical lattice with PT-symmetry.

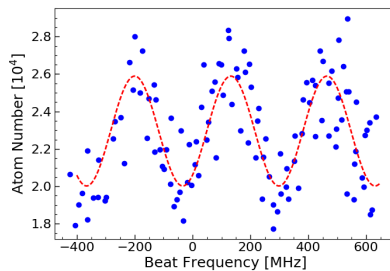


Fig. 2. Relative phase measurement between 1112 nm and 556 nm lattice.

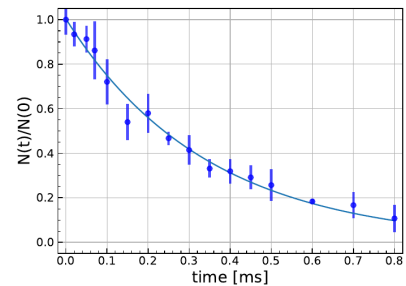


Fig. 3. Atom loss measurement in PT-symmetric optical superlattice with one-body loss.

References

- [1] M. Foss-Feig et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 230501 (2012).
- [2] K. Sponselee et al., Quantum Science and Technology. **4**, 014002 (2019).
- [3] C. M. Bender et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 5243 (1998).

親水性および疎水性の剛体を水面に衝突させた際に生じる空洞の数値解析

流体物理学研究室 佐藤道矩

Abstract When a rigid body enters water surface, a cavity sometimes forms. We numerically investigate the relationship between its formation and wettability of the rigid body with Smoothed Particle Hydrodynamics. Our results are compared with previous experimental data qualitatively and quantitatively.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

水面に水滴や剛体を衝突させた際に生じる現象、即ち水面の変形や気泡の生成は身近な物理現象の一つであり、20世紀初頭の Worthington[1]以降数多くの研究が行われてきた。これらの現象の内、本研究で注目したのは、水面に剛体を衝突させた際に生じる空洞生成と剛体表面の濡れ性の関係である。

水面に剛体を衝突させた際、剛体の後流部分に気泡ないしは空洞が生成されることが知られている。剛体の衝突速度を増加させることで空洞は生成されるようになり、この衝突速度のしきい値は剛体表面の濡れ性に依りて変化する。濡れ性は流体と剛体での接触角で定量的に評価される。Duez ら [2] による実験は、異なる接触角を持つ剛体を水面に衝突させ、各接触角に対する衝突速度のしきい値を得た。特に疎水性の領域に於いて、衝突速度のしきい値は接触角の3乗で減少していく。

水面に突入した剛体周辺の流れは、実験では詳細に観察することが難しい。したがって数値計算が必要となるが、この現象は流体の分離や合体そして剛体と流体間の濡れを考慮しなければならない、数値計算手法に差分法を用いるのは困難である。そのため、流体の運動を粒子の運動として取り扱う粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (略称 SPH 法) を数値計算のモデルとして用いた。剛体部分との濡れ性については、粒子間に相互作用力を働かせ親水性や疎水性を再現する Yang ら [3] のモデルを導入した。

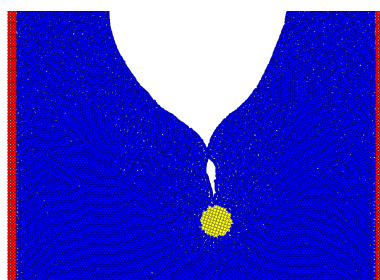


Fig.1 A snapshot of the cavity formation after the impact of a hydrophilic rigid body onto a water surface. The cavity arises when the impact velocity exceeds the threshold.

本研究の目的は、Duez らの実験データを参考に、疎水性および親水性における空洞の生成を定性的そして定量的に評価することである。まず、床の上に水滴を静止させる実験を行うことで、Yang らのモデルが個体の濡れ性を定性的に再現することを確認した。次に、親水性と疎水性の領域で、剛体を異なる速度で水面に衝突させ、空洞が生成される速度のしきい値を得た。親水性の領域では、Fig.1 のように空洞の生成が見られ、得られた速度のしきい値は実験と定性的に一致した。一方、疎水性の領域では空洞の生成が見られなかった。この結果について、親水性領域では定量的な評価を試みた。また、疎水性領域では、数値モデルの限界に起因する振る舞いを通じて実験との定性的な不一致を考察した。

References

- [1] A.M.Worthington, “A study of splashes”, Longmans, Green, and Company.
- [2] Duez, C., Ybert, C., Clanet, C. & Bocquet, L. “Making a splash with water repellency.” Nat. Phys. 3, 180183 (2007).
- [3] Yang, T., Martin, R. R., Lin, M. C., Chang, J. & Hu, S.-M. “Pairwise Force SPH Model for Real-Time Multi-Interaction Applications.” IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 23, 22352247 (2017).

弾まない球のハミルトン力学系からの構成

非線形動力学研究室 谷口柊平

Abstract We propose a Hamiltonian model for a ball which does not bounce. The model consists of a rigid shell and N interacting particles confined in the shell. By numerical simulation of the model, we find that the model exhibits a phase transition at a special parameter value and that the coefficient of restitution becomes zero at the transition point.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

落としても弾まない球が存在する。見かけに特徴はなく、現象は繰り返し再現される。この不思議な現象を、球を構成する要素のハミルトン力学系から理解したい。そこで本研究では、この現象を理解する第一歩とし、はねかえり係数が0である球をハミルトン力学系から構成することを目標とした。

本研究で提案するモデルは、「質量 M の剛体の外殻と、質量 m の内部粒子 N 個から構成される球」(FIG. 1)と壁から構成される。(外殻は剛体であり変形しないため、外殻の運動は、外殻の重心座標のみに着目する。) 球の構成要素の相互作用は二種類存在する。一種類目は外殻と内部粒子との間の相互作用である。この相互作用は、外殻の重心と内部粒子との間の距離で決まり、内部粒子を外殻の内側に閉じ込める。二種類目は内部粒子同士の相互作用である。この相互作用は内部粒子同士の間の距離で決まる。またこの球を特徴付けるパラメーター $r = mN/M$ を定義する。この球の特徴は、従来の球が単一の要素で格子が組まれていたのに対し、この球は外殻と内部粒子という異なる要素で構成されており、かつ外殻が粒子系ではなく変形しない剛体である点にある。

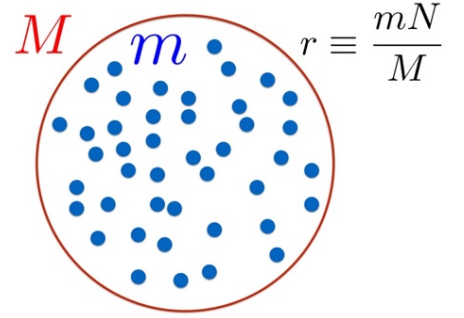
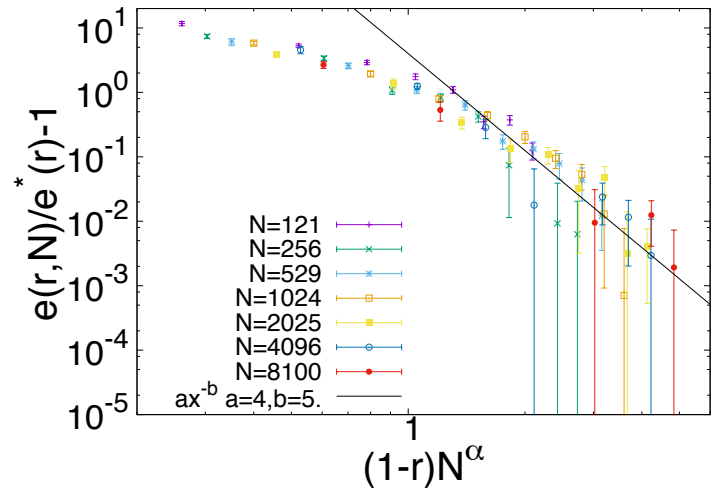


FIG. 1: Schematic illustration of the model

次のように球のはねかえり係数を数値的に測定した。まず球全体の重心を静止させる。次に球全体、つまり外殻と N 個の全内部粒子とを合わせた $(N + 1)$ 自由度を、温度 T のカノニカル分布に従わせる。そして球全体の重心を壁から十分離す。そして壁と衝突させるために、壁にむかって球の重心を初速度 $-V_{in}(< 0)$ で進める。ただし球の初速度は、球の全構成要素の速度を $-V_{in}$ シフトすることで与えることとする。壁に向かって進んだ球は壁と相互作用し始め、やがて球全体の重心が正の速度で壁から離れる。このときの球全体の重心の速度を V_{out} とし、この球のはねかえり係数を $e \equiv V_{out}/V_{in}$ で定義する。そしてはねかえり係数を r と N の関数 $e(r, N)$ として測定した。



数値実験の結果 (FIG. 2)、 $e(r, N)/e^*(r) - 1 = \varphi((1-r)N^\alpha)$ を満たすスケーリング関数 $\varphi(z)$ が存在し、 $\lim_{z \rightarrow \infty} \varphi(z) = 0$ となることがわかった。

(ただし $e^*(r) \equiv (1-r)/(1+r)$ 、および $\alpha = 0.315$ 。) この結果、

$\lim_{r \rightarrow 1} \lim_{N \rightarrow \infty} e(r, N) = \lim_{r \rightarrow 1} e^*(r) = 0$ となる。これは $r = 1$ で球のはねかえり係数が0になることを意味する。

FIG. 2: Finite-size scaling of $e(r, N)/e^*(r) - 1$ with $\alpha = 0.315$. The guide line represents a power-law function with exponent -5 . This graph shows that $e(r, N \rightarrow \infty) = e^*(r) \equiv (r - 1)/(r + 1)$ and that the coefficient of restitution becomes zero at $r = 1$.

低次元トポロジカル相の機械学習による判別

凝縮系理論 細川 拓也

Abstract We investigate topological states of the Su-Schrieffer-Heeger (SSH) model by machine learning. The SSH model is a model of spinless one-dimensional topological insulator. We find that deep neural networks are able to distinguish the topological state from a trivial state.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

近年トポロジカル物質が注目を集めている。トポロジカル物質の研究は 1980 年の量子ホール効果の発見に端を発する。さらに、Kane と Mele により 2005 年にスピン軌道相互作用が入ったグラフェンの理論模型が提案され、トポロジカル絶縁体が理論的に発見された。2007 年に HgTe/CdTe 量子井戸を用いてトポロジカル絶縁体の存在が実際に確認された。トポロジカル絶縁体の発見後、バルクは絶縁体だが表面にはギャップレスの伝導状態が現れるなど興味深い物理的性質を持つことやスピントロニクスなど新たなデバイスへの応用への期待から飛躍的に研究が進んでいる。[1, 2]トポロジカル物質はトポロジカル絶縁体のみならずトポロジカル超伝導、半金属、磁性体へも研究が展開されている。

一方で、最近、機械学習が急速に発展している。インターネットなどから大量のデータを得ることができるようになった昨今であるが、大量のデータから有益な情報を引き出すことは従来の方法では難しく、新たな情報処理の手段が必要となった。そのための手段として機械学習に強い関心が寄せられるようになったのである。機械学習の中でも、動物の神経をモデルとするニューラルネットワークを使用した深層学習の研究が特に盛んである。ニューラルネットワーク自体は 1940 年代から研究されていた[3]が、ここ最近の計算機の性能向上と前述した通り大量のデータを得やすい環境が整ったことで脚光を浴びるようになった。機械学習は様々な分野に応用され、物性物理への応用も進んでいる。物性物理においては、機械学習を用いることでデータを処理し、物理的状態の予測が可能である。

本研究ではこのような背景に基づき、基本的な 1 次元モデルである Su-Schrieffer-Heeger モデル[4]がトポロジカル相にあるかどうかを機械学習によって判定することを試みる。Su-Schrieffer-Heeger モデルは Fig.1 に示すようなサイト間のホッピング強度が交互に並んでいる系である。

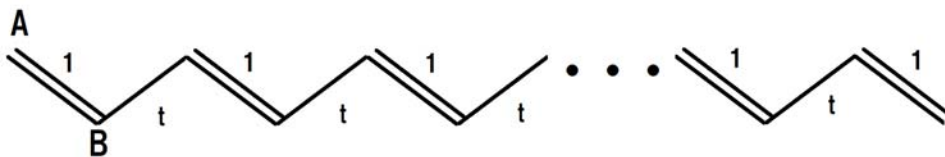


Fig.1 Su-Schrieffer-Heeger model

本論文では、初めにトポロジカル物質の基本的な性質の説明、Su-Schrieffer-Heeger モデルの説明をする。次に機械学習の概要、ニューラルネットワークと学習の仕組みについて説明をする。その後ニューラルネットワークを用いた機械学習によって Su-Schrieffer-Heeger モデルがトポロジカル相にあるか判定させる手順と結果を示す。機械学習によって SSH モデルのトポロジカル相転移を検出できることが確認できた。

References

- [1] 野村健太郎:トポロジカル絶縁体・超伝導体 (丸善出版 2016).
- [2] 安藤陽一:トポロジカル絶縁体入門 (講談社 2014).
- [3] 岡谷貴之:機械学習プロフェッショナルシリーズ 深層学習 (講談社 2015).
- [4] W. P. Su, J. R. Schrieffer, and A. J. Heeger, Phys. Rev. Lett. **42**, 1698 (1979).

^{171}Yb 原子の遍歴・局在 2 軌道系における スピン交換ダイナミクスの観測

量子光学研究室 天野良樹

Abstract We develop a novel two-orbital optical lattice system consisting of localized $^3\text{P}_0$ and mobile $^1\text{S}_0$ states of ^{171}Yb atoms interacting antiferromagnetic spin-exchange interaction. We observe this spin exchange dynamics and suppression of the dipole oscillation of the $^1\text{S}_0$ atoms by the localized $^3\text{P}_0$ state.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

光格子中の冷却原子系による量子シミュレーションは次元性や格子構造も含めた、高精度に制御できる自由度の多さから注目を集め、盛んに研究が行われている。また、実験で用いることが可能な原子種の豊富さも大きな利点である。当研究室で精力的に研究を進めているイッテルビウム (Yb) などの 2 電子原子には基底状態 $^1\text{S}_0$ と準安定状態 $^3\text{P}_0$, $^3\text{P}_2$ があるが、特に $^1\text{S}_0$ 及び $^3\text{P}_0$ 状態はともに電子の全角運動量 $J=0$ であるという特徴を持つ。このことから原子の全角運動量は核スピン由来となり原子同士の散乱に影響しないので、核スピン I を持つ Yb のフェルミ同位体の $^1\text{S}_0$, $^3\text{P}_0$ 状態はそれぞれ $\text{SU}(N=2I+1)$ 対称性を持ち、散乱によってスピンが変化しない。また、これらで構成される 2 軌道系は軌道自由度と 2 軌道間のスピン交換相互作用を持つ系として注目されている。

この 2 軌道系を用いた研究対象の 1 つに近藤効果の量子シミュレーションがある[1]。近藤効果は磁性不純物を含む金属において降温に伴って減少していた電気抵抗がある温度以下で増大に転じる電気抵抗極小現象であるが、これは磁性不純物中の局在スピンと伝導電子のスピンの間の反強磁性的なスピン交換の 2 次の摂動に由来することが知られている。したがって量子シミュレーションの実現には反強磁性的なスピン交換相互作用が必要になる。

最近、我々は ^{171}Yb の $^1\text{S}_0(\text{g})$ - $^3\text{P}_0(\text{e})$ の間のスピン一重項及び三重項の散乱長を $a_{\text{eg}}^+=225a_0$, $a_{\text{eg}}^-=355a_0$ (a_0 はボーア半径)と決定することに成功し、 $a_{\text{eg}}^+ < a_{\text{eg}}^-$ であることから反強磁性的なスピン交換相互作用を持つことを見出した[2]。他に測定された ^{173}Yb や ^{87}Sr のスピン交換相互作用はいずれも強磁性的であり[3][4]、そのまま近藤効果の量子シミュレーションに用いることはできない。

本研究では 2 軸の光格子によって 1 次元系を構築し、さらに $^3\text{P}_0$ 状態だけに深いポテンシャルを与える波長 650nm の光格子を組み合わせる $^1\text{S}_0$ 状態にほとんど影響を与えずに $^3\text{P}_0$ 状態だけを局在させられる 2 軌道系を構築することに成功した。近藤効果の量子シミュレーションへの第一歩としてこの局在 $^3\text{P}_0$ -遍歴 $^1\text{S}_0$ 系において選択的に $^3\text{P}_0$ 状態に励起したスピンと $^1\text{S}_0$ 状態に残ったスピンの交換によって $^1\text{S}_0$ 状態のスピン分布が緩和する様子を観測し (Fig. 1)、この現象の磁場依存性を調べた。さらに $^1\text{S}_0$ 状態の双極子振動が局在 $^3\text{P}_0$ 原子の存在によって大きく抑制されることも観測し、近藤効果の量子シミュレーションに向けて大きく研究を進めることができた。

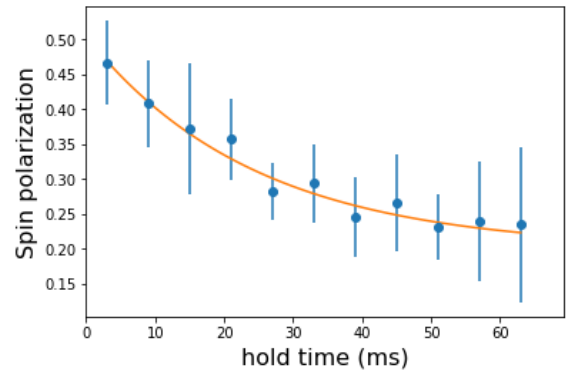


Fig. 1 Spin relaxation dynamics of $^1\text{S}_0$ state atoms. Error bars denote the standard deviation of the mean obtained by averaging ten measurement points. Orange line denotes the exponential fitting result. From this fitting, the relaxation time scale is ~ 25 ms. We perform the excitation in a state dependent lattice to prepare the localized $|e \downarrow\rangle$ and mobile $|g \uparrow\rangle$ mixture. By spin-exchange process between $|e \downarrow\rangle$ and $|g \uparrow\rangle$, the $^1\text{S}_0$ spin polarization relaxes.

References

- [1] A. V. Gorshkov *et al.*, Nature Phys. 6, 289-295(2010) [2] K. Ono *et al.*, arXiv: 1810.00536 (2018)
[3] F. Scazza *et al.*, Nature Phys. 10, 779-784 (2014). [4] X. Zhang *et al.*, Science 345, 1467-1473 (2014)

パウリ常磁性による超伝導不連続転移に伴う共存状態の研究

凝縮系理論研究グループ 入川健太

Abstract We investigate the coexisting state of normal and superconducting states in two-dimensional type-II superconductors with strong Pauli paramagnetic effects. We demonstrate that fixing the particle number causes a coexisting phase in equilibrium accompanying the discontinuous H_{c2} transition in the high-field low-temperature region and that the orbital effect narrows its width.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

第二種超伝導体では、パウリ常磁性効果による磁場誘起超伝導転移が低温・高磁場域で一次転移になることが知られている[1]。この一次転移は標準的な GL 理論で記述され、秩序変数で展開された GL 自由エネルギーの 4 次項の符号が負になる形で表されている。この転移に伴い、臨界磁場をまたぐ非平衡な過程では超伝導-常伝導共存状態が準安定状態として出現する。こうした不連続転移はパウリ常磁性が強い限り渦糸格子-高磁場正常相間での平均場近似での超伝導転移(H_{c2} 転移)でも生じることが後に指摘された[2]。ここで、上記の不連続転移に伴う共存状態は非平衡過程の結果生じるものであり、厳密な平衡過程では現れないことに注意する必要がある。また、平均場理論をこえて超伝導揺らぎを含めた理論ではこの 1 次転移は不連続的なクロスオーバーとなることも指摘されている[2]。

上記のように超伝導に関する理論研究がなされる中、パウリ常磁性の強い第二種超伝導体の代表例である CeCoIn_5 では低温高磁場領域で温度を下げるのに伴い物理量のわずかなヒステリシスが観測された[3, 4]。このヒステリシスは比熱や磁束密度に現れたが、磁場の伝導面に対する方向($H//c$, $H//ab$)により発現の有無が異なることが観測された。先述の理論研究の結果に照らせば、このヒステリシスは実験が十分な平衡状態で行われなかったことが原因であると論じられたが、実験家からは上記の実験は十分な熱平衡状態で行われていると主張されており、両者の見解は必ずしも合致しているとは言い難い。

こうした超伝導の研究の一方、最近の冷却原子系を対象に発展したフェルミ系超流動の理論では、2 成分流体において平衡状態として超流動-常流動共存状態が現れることが報告された[5]。この研究では、2 成分間粒子数の不均衡を許し、それに伴う化学ポテンシャルの差と相互作用の強さを変化させて相共存の発現を調べている。また、化学ポテンシャルをフェルミエネルギーに固定する従来の BCS 理論の手法を修正し、粒子数を固定して化学ポテンシャルを決定するという、より現実的な定式化をとることで平衡相共存が現れることが認められた。

これら 2 つの背景を考慮すると次のような観点が生まれる：冷却原子系で相共存の発現を議論した理論を超伝導系に拡張することで、 CeCoIn_5 の低温高磁場領域に現れるヒステリシスを説明できないか？

本研究ではこの観点に立脚し、パウリ常磁性の強い二次元の第二種超伝導体に対し粒子数拘束の条件を課し低温・高磁場領域での相共存について調べた。その結果、平衡状態で相共存が現れること、そしてその領域は、2 次元的な系で顕著な渦糸による対破壊効果により狭められることが分かった。

References

- [1] K. Maki and T. Tsuneto, Prog. Theor. Phys. **31**, 945 (1964)
- [2] H. Adachi and R. Ikeda, Phys. Rev. B **68**, 184510 (2003)
- [3] A. Bianchi *et al*, Phys. Rev. Lett. **89**, 137002 (2002)
- [4] R. Okazaki *et al*, Phys. Rev. B **78**, 224529 (2007)
- [5] D. E. Sheehy and L. Radzihovsky, Ann. Of Phys. **322**, 1790 (2007)

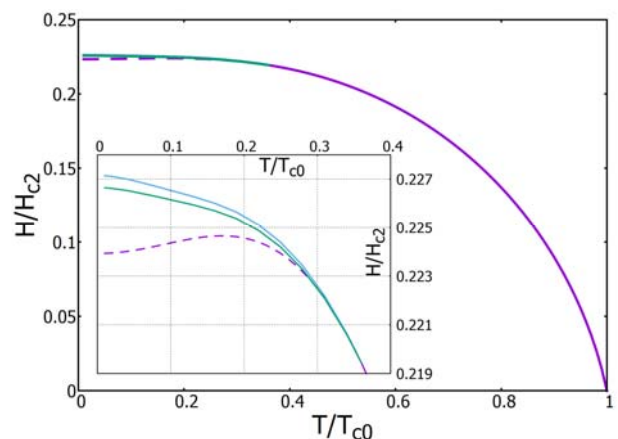


Fig.1 Calculated H - T phase diagram including S (below the lower solid curve), N (above the solid upper one), and coexisting (between the two curves) phases.

高分子安定化ブルー相中の自己組織化ナノスリッパリー界面と配向揺らぎのダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 大友楽人

Abstract Polymer stabilized blue phase (PSBP) has self-organized nanoscale three dimensional structures. We design nano slippery interfaces on the polymer network of PSBP and investigate the dynamics of the director fluctuation by dynamic light scattering measurements.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

【概要】高分子安定化ブルー相[1]は、高速な応答を示す次世代の液晶として注目を浴びているが駆動電圧の高さから実用化には至っていない。高分子安定化ブルー相内には、液晶相の安定化のため高分子のネットワークが網目状に張り巡らされた構造を有している。この高分子が液晶を固定(アンカリング)することで、応答が高速になると同時に駆動電圧の上昇を招いていると考えられている。一方で、スリッパリー界面と呼ばれる新しい界面を用いて、アンカリングを弱め、駆動電圧を低減させる試みがある[2]。本研究では高分子安定化の過程において、スリッパリー界面を生成する能力を持つ光重合性モノマーを共重合し、高分子の表面にスリッパリー界面を自己組織的に形成させることを試みた。また、Slippery 界面導入による液晶分子のダイナミクスの変化を、動的光散乱法(DLS)を用いて研究した。

【実験・考察】最近の研究から、Poly Ethylene Glycol が良好な Slippery 界面を生成することが分かってきた[3]。そこで本研究では、高分子安定化ブルー相が発現するサンプルに、PEG-acrylate を加えた試料(Fig. 1)を用いて高分子安定化を行った。Fig. 2 に示す転移温度の遷移から、高分子安定化の過程で PEG が欠陥部に凝集しているこ

とが分かる。また、PEG を混合して高分子安定化を行ったブルー相の DLS 測定で得られた配向揺らぎの自己相関関数の代表的なデータを Fig. 3 に示す。さらに Fig. 4 は自己相関関数を単一緩和

式の式でフィッティングして算出した緩和時間の温度依存性のプロットである。PEG を混合したサンプルでは緩和時間が遅くなっていることが分かる。これは、ブルー相中に自己組織的にナノスリッパリー界面が形成されたことで、高分子界面での液晶分子の運動性が向上し、ブルー相格子が実効的に大きくなったためであると結論付けられる。

References

- [1] H. Kikuchi, M. Yokota, Y. Hisakado, H. Yang, and T. Kajiyama, Nature Materials 1, 64
- [2] 山本潤, 西山伊佐 日本液晶学会討論会 3a11 (2013)
- [3] 高本幸希, 高西陽一, LEE Kuang-Wu, 荒木武昭, 山本潤 日本液晶学会討論会 3B03 (2018)

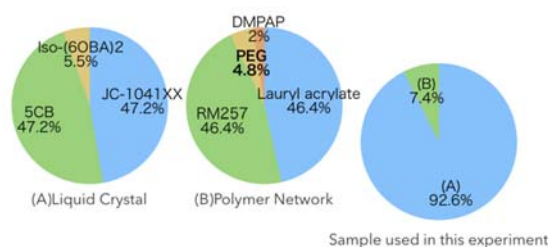


Fig.1 Sample used in this experiment.

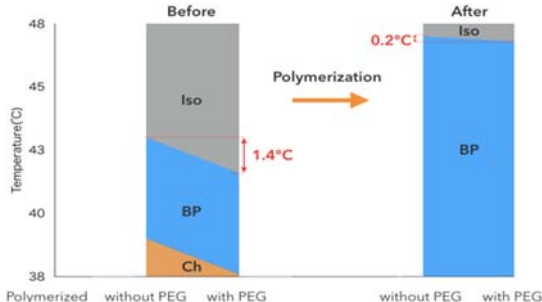


Fig.2 T_c shift between before and after polymerization.

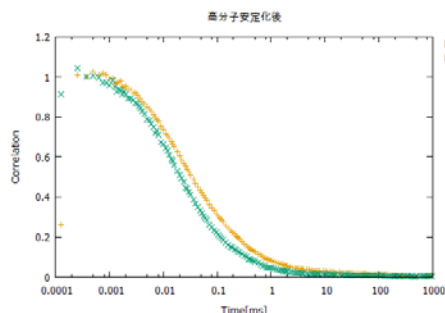


Fig.3 Autocorrelation function.

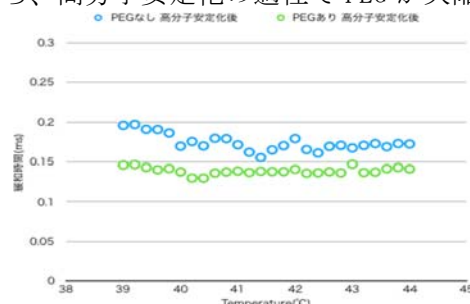


Fig.4 Temperature dependence of Relaxation time.

重い電子系における結晶対称性に守られたトポロジカル磁性相

凝縮系理論研究室 木村和博

Abstract We explore topological magnets in heavy-fermion systems by taking account of a mirror symmetry. Although in two-dimensional antiferromagnetic phases there is no topological phase without spatial symmetry, we demonstrate that a mirror symmetric topological phase emerges. Furthermore, our analysis shows that a topological state emerges in the half-metallic ferromagnetic phase.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

強相関トポロジカル相では、電子間相互作用が加わることで自由電子系では見られなかった新しい現象が発現し、近年注目を集めている。その中で磁性とトポロジカルな性質を併せ持ったトポロジカル磁性相の例としては、先行研究として反強磁性トポロジカル絶縁体[1]、ハーフメタル強磁性相におけるトポロジカル絶縁体[2]などが挙げられる。これらの理論モデルの提案はいくつか行われているが、実験的発見には至っていない。この原因の一つに、提案されているトポロジカル磁性相は限られた条件下でしか成立しないことが挙げられる。

ここで、反強磁性トポロジカル絶縁体では、時間反転対称性と空間の並進を組み合わせた有効的な時間反転対称性によって 3 次元系に限って Z_2 トポロジカル不変量が定義できる。またハーフメタル相のトポロジカル絶縁体は、スピン軌道相互作用のない周期アンダーソン模型の $1/4$ フィリング近傍で提案されており、ハーフメタル強磁性相の絶縁体セクターにおいてトポロジカル絶縁体が実現される。但しスピン $U(1)$ 対称性が必要であり、重い電子系トポロジカル相を考えるうえで重要なスピン軌道相互作用がある場合は実現することが困難である。まとめると、反強磁性トポロジカル絶縁体に関しては 3 次元系で実現される一つのシナリオしか存在しない点、またハーフメタル相のトポロジカル絶縁体に関してはスピン軌道相互作用がない系に限られる点が、実験的実現を妨げる要因の一つであると考えられる。

そこで本研究では、それらの実現可能性を広げるべく結晶の対称性を考慮に入れた磁性トポロジカル絶縁体[3]を提案し、(i)反強磁性相、(ii)ハーフメタル相それぞれに対してトポロジカル相の理論的探索を行った。(i)反強磁性トポロジカル相について、新たに 2 次元系において反強磁性トポロジカル相が存在することを示し(Fig.1)、 SmB_6 薄膜を念頭において周期アンダーソン模型を Hartree-Fock 近似を用いて解析した。またここで反強磁性トポロジカル半金属が安定になることも示した。さらに、(ii)ハーフメタル強磁性相におけるトポロジカル絶縁体スピン軌道相互作用のある系でも実現することを示し(Fig.2)、同じく SmB_6 薄膜模型を用いて解析を行った。以上より本研究では 2 次元における磁性トポロジカル絶縁体を実現させる新たなプラットフォームを提案した。

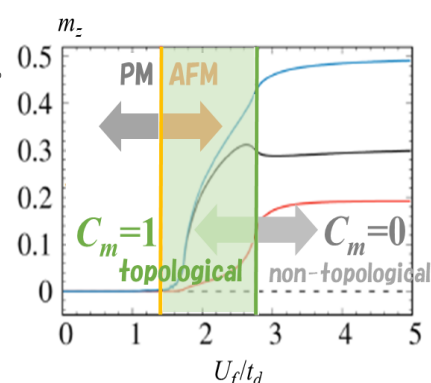


Fig.1 AF magnetization and mirror Chern number.

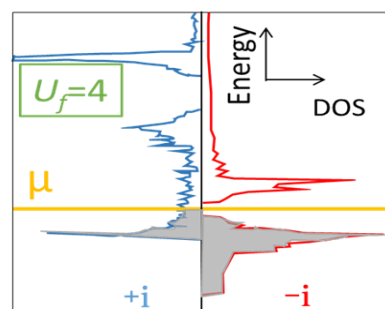


Fig.2 DOS about half-metal ferromagnetic phase.

References

- [1] R. S. K. Mong, A. M. Essin, and J. E. Moore, Phys. Rev. B **81**, 245209 (2010).
- [2] T. Yoshida, R. Peters, S. Fujimoto, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **87**, 165109 (2013).
- [3] K. Kimura, T. Yoshida, and N. Kawakami, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 084705 (2018).

スパイク時系列からのネットワーク推定

非線形動力学研究室 後藤達也

Abstract Interneuronal connectivity can be estimated by applying a generalized linear model (GLM) to a spike cross-correlogram. Here, we selected the hyperparameter of this method using the ABIC so that the model fits the experimental data.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

脳の神経細胞は互いに結合し、スパイクと呼ばれる電気信号で情報伝達を行なっている。神経細胞が作るネットワークの構造は、脳が行う情報処理と関係があると考えられている。神経細胞の結合関係を正確に調べるには細胞内計測と呼ばれる手法があるが、同時に数個の細胞しか計測できない。一方で、最近の実験技術の向上により多数の神経細胞が発するスパイクの時系列データを同時記録できるようになった。ある細胞のスパイク発火は結合先の細胞における膜電位の変化を引き起こしその細胞のスパイク発火に影響を与える。この膜電位の変化は数ミリ秒程度の時間スケールなので、2つの神経細胞間に結合がある場合はスパイク時系列の相互相関に数ミリ秒スケールの変動が現れると考えられる。この変動が統計的に有意に大きいかを調べることで神経細胞の結合関係を推定する手法が相互相関法である[1]。しかし神経細胞は他にも多数の入力を受けているので、相互相関に時間スケールの大きい変動が現れることがある。この点を考慮して様々な時間スケールの変動の中から時間スケールの短い変動を捉えることができる手法を Amarasingham らが開発して一定の成功を収めた[2]。さらに小林らは一般化線形モデルを用いてより計算効率に優れた手法を提案した[3]。

小林らの一般化線形モデルでは $\{J_{12}, J_{21}, a(t)\}$ をパラメータとして相互相関に以下のような関数をフィットする。

$$c(t) = \exp(a(t) + J_{12}f(t) + J_{21}f(-t))$$

$a(t)$ が時間スケールの大きい変動を吸収し、 $J_{ij}f(t)$ が中央付近に現れる数ミリ秒スケールの変動を捉える (Fig. 1)。 J_{ij} は細胞*j*から細胞*i*への結合を表している。時間スケールが短い変動を吸収してしまわないように、 $a(t)$ には以下のような滑らかに変動する事前分布が与えられている。

$$-\frac{1}{\gamma} \int_{-w}^w \left(\frac{da}{dt}\right)^2 dt$$

γ は $a(t)$ の滑らかさを決めるハイパーパラメータである。小林らの研究では γ をアドホックに決めて解析を行っていたが、本研究では赤池ベイズ情報量基準 (ABIC) [4]に基づいて γ をデータに応じて最適化することを提案した。その結果、推定結果と生理学的な知見との整合性が良くなった。 γ を改善した一般化線形モデルで様々な脳領域のスパイク時系列を解析した。

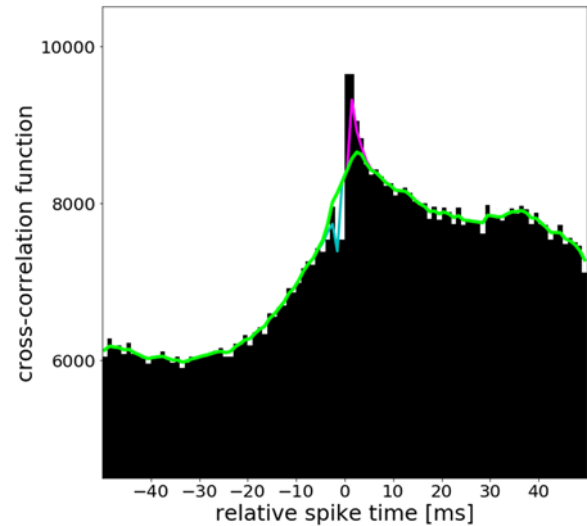


Fig. 1. Cross-correlogram and GLM

References

- [1] Perkel, D. H., Gerstein, G. L. & Moore, G. P. *Biophys J.* 7, 419-440 (1967).
- [2] Amarasingham, A., et al. *J. Neurophysiol.* 107, 517-531 (2012).
- [3] Kobayashi, R., Kurita, S., Kitano, K., Mizuseki, K., Richmond, B. J. & Shinomoto, S. *bioRxiv*, 334078 (2018).
- [4] Akaike, H. In *Selected Papers of Hirotugu Akaike*, 309-332 (Springer, 1998).

STM/ STS による Nd ドープ CeCoIn₅ 薄膜の 超伝導と SDW の共存相における研究

量子凝縮物性研究室 末松知夏

Abstract Using *in-situ* scanning tunneling spectroscopy (STS), we have studied heavy fermion superconductor Ce_{1-x}Nd_xCoIn₅, in which unconventional superconductivity coexists with spin density wave. The STS spectra show a dip structure around the fermi energy even above upper critical field, suggesting the presence of an energy gap induced by Nd impurities.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

CeCoIn₅ は、Ce 系重い電子系化合物の中でも最高の転移温度 2.3 K をもつ超伝導体である。その超伝導波動関数は *d* 波対称性を持ち、反強磁性揺らぎを媒介とした対形成機構が提案されている。また、パウリ常磁性効果が強く、上部臨界磁場 H_{C2} 近傍において特異な高磁場超伝導相が出現することから、Fulde–Ferrell–Larkin–Ovchinnikov (FFLO) 状態の可能性が指摘されてきた。最近、この高磁場超伝導相において、*d* 波超伝導とスピン密度波(SDW)が共存することが実験的に明らかとなり、Q-phase と呼ばれるようになった[1]。 *d* 波超伝導と SDW の共存の起源として、FFLO 状態や π -トリプレット超伝導状態など様々なものが提案されているが[2,3]、Q-phase は低温高磁場で現れるため実験手法が限定され、その解明には至っていない。

近年、Nd をドープした CeCoIn₅ (Ce_{1-x}Nd_xCoIn₅) において、ゼロ磁場においても Q-phase と同じ波数の SDW が超伝導と共存する可能性が示された[4,5]。そこで、本研究では希土類化合物用分子線エピタキシー(MBE)装置と極低温トンネル走査顕微鏡(STM)を組み合わせた装置を用いることにより、Ce_{1-x}Nd_xCoIn₅ の電子状態を詳細に調べた。MBE 法により Ce_{1-x}Nd_xCoIn₅ のエピタキシャル薄膜を作製することで、バルク結晶では困難であった原子レベルで平坦な面を広範囲に得ることができた。さらに、MBE 法では Nd のドープ量の精密制御も可能である。また、MBE/STM 装置を用いることで、試料を大気暴露させることなく清浄表面を“その場”観測することができる。Fig.1 に作製された Ce_{1-x}Nd_xCoIn₅ 薄膜のトポグラフィック像を示す。CeCoIn₅ 薄膜では観測されなかった暗い領域が観測され、置換量と置換位置から Ce サイトに置換された Nd であると考えられる。Fig.2 に局所状態密度を反映するコンダクタンススペクトルを示す。低磁場では超伝導に伴うギャップが観測されるが、 H_{C2} 以上の常伝導状態においてもフェルミエネルギーを中心に開くギャップが残ることがわかった。そのギャップサイズは、~1 meV 程度と超伝導ギャップと同程度であり、Nd によって誘起されたものであると考えられる。 H_{C2} 以下での超伝導渦糸状態での測定も行ったので、その結果についても報告する。

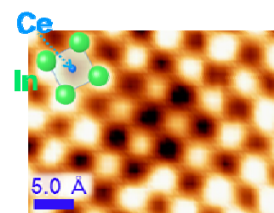


Fig.1. Topographic image of Ce_{0.98}Nd_{0.02}CoIn₅ thin film at 0.3 K .

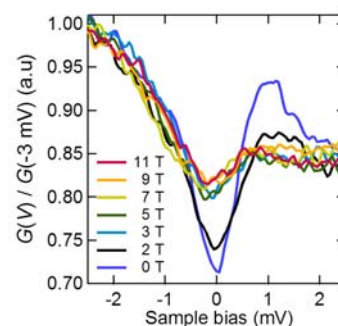


Fig.2. Normalized conductance Spectra measured on the surface of Ce_{0.98}Nd_{0.02}CoIn₅ thin film at 0.3 K under magnetic field applied along [001] direction.

References

- [1] M. Kenzelmann *et al.*, Science **321**, 1652 (2008).
- [2] Y. Yanase *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 094702 (2011).
- [3] A. Aperis *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 216403 (2010).
- [4] S. Raymond *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 013707 (2014).
- [5] D. G. Mazzone *et al.*, Sci. Adv. **3**, e1602055 (2017).

Sr₂RuO₄の電気抵抗測定における 超伝導一次転移と上部臨界磁場の面内二回対称性の観測

固体量子物性研究室 諏訪春輝

Abstract We investigated the in-plane resistance of Sr₂RuO₄, a prominent candidate of a spin-triplet superconductor, for $H \parallel ab$. We observed a hysteresis in the resistivity at H_{c2} for the first time. We also found an unusual current-induced two-fold H_{c2} anisotropy, attributable to symmetry lowering of the superconducting order parameter.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

層状ペロブスカイト超伝導体 Sr₂RuO₄が発見[1]されて間もなく、この物質がスピン三重項超伝導体であると提案された[2]。実際に、それを支持する実験結果が報告されている[3,4]。しかし一方で、Sr₂RuO₄にはいくつかの未解決問題がある。特に、結晶の ab 面に平行な磁場下では、上部臨界磁場 H_{c2} が通常の磁束量子侵入に伴う超伝導破壊（軌道対破壊効果）の場合に期待される振る舞いと比べて大幅に抑制される[5]。さらに近年、この条件下では超伝導転移が一次転移になることが磁気熱量効果[6]、磁化測定[7]から観測されている。これはパウリ常磁性効果によるクーパー対の破壊と似通っているが、スピン磁化率が超伝導転移前後で不変である[3,4]ことから、パウリ対破壊効果は起こりえない。したがって、通常のパウリ常磁性効果や軌道対破壊効果以外の未知の対破壊メカニズムが存在していると考えられる。

そこで我々は、Sr₂RuO₄の超伝導転移に関するより詳しい情報を得るため、 $H \parallel ab$ での電気抵抗測定を行った。試料の不均質性や不純物から超伝導一次転移が不明瞭にならないようにするため、大きさ $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 程度の微小かつ高純度の Sr₂RuO₄ 単結晶を用いた。実際、我々は 0.5 K 以下で、面内磁場スイープによって一次相転移の証拠となるヒステリシスを電気抵抗測定では初めて観測した (Fig. 1)。先行研究[6-8]で一次相転移が観測されていたのは熱力学的量についてであったが、輸送現象においても明確な一次相転移が観測できることが明らかになった。

また我々は、磁場を面内の様々な方向にかけることで、上部臨界磁場 H_{c2} の方位角 ϕ 依存性を調べた。すると、 H_{c2} が四回対称性だけでなく、印可電流の方向を主軸とする二回対称性を持っていることがわかった。 H_{c2} の四回対称性は結晶の正方晶対称性から期待されるもので既に報告もされている[9,8]が、二回対称性に関してはこれまでに報告がなく、その起源が興味深い。検証の結果、この二回対称性は磁場の面内からのわずかなミスアライメントや、電流による渦糸の駆動では説明できないことがわかった。そのため、この二回対称性は磁場中での超伝導秩序変数の対称性の低下に起因している可能性がある。

References

- [1] Y. Maeno *et al.*, Nature **372**, 532 (1994).
- [2] T. M. Rice and M. Sigrist, J. Phys.: Condens. Matter **7**, L643 (1995).
- [3] K. Ishida *et al.*, Nature **396**, 658 (1998).
- [4] J. A. Duffy *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5412 (2000).
- [5] K. Deguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 2839 (2002).
- [6] S. Yonezawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).
- [7] S. Kittaka *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 220502 (2014).
- [8] S. Yonezawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083706 (2014).
- [9] Z. Q. Mao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 991 (2000).

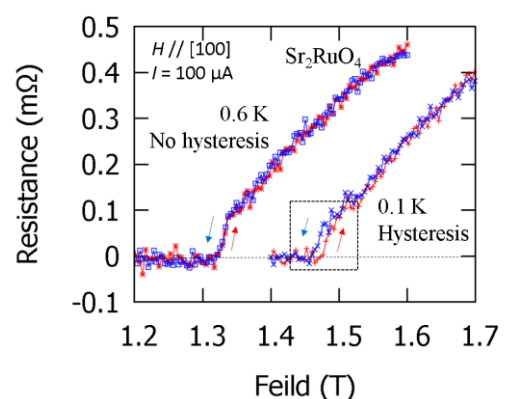


Fig. 1: Magnetic-field dependence of the resistance of Sr₂RuO₄ at 0.1 K and 0.6 K. At 0.1 K, a hysteresis is observed.

安定な Slippery 界面の設計と 回転磁場法を用いた表面ダイレクターのダイナミクス解析

ソフトマター物理学研究室

高本幸希

Abstract: We designed the interface where the anchoring force decreases significantly with the polymer network composed of PEG-monomer. We investigated the dynamics of the LC molecules under a rotating magnetic field and confirmed this interface is valid as slippery one over a much wider temperature range compared to our previous study.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

【はじめに】液晶表示素子中の液晶分子は、アンカリングと呼ばれる力によりガラス基板上に固定され、電場 Off 時の復元力を得ているが、同時に駆動電圧の上昇やコントラスト比の低下の一因でもある。一方、アンカリング力が弱く分子が自由に回転できる界面を Slippery 界面と呼び、駆動電圧の大幅な低下が期待されている。山下らは、液晶への不純物混合により『液体ぬれ界面』を界面上に形成し、アンカリング力のない界面を実現したが、これは 1°C 程度の狭い温度範囲でしか有効ではなかった[1]。本研究では、PEG を側鎖に持つ単官能および 2 官能のアクリレートモノマーからなるポリマーネットワーク (PEG-PN) で基板をコーティングし、広い温度範囲でアンカリング力を弱めることに成功した。また、Slippery 界面を定量的に評価するため、回転磁場下での液晶セルからの透過光強度を測定し、Oswald の理論を用いて表面ダイレクターのダイナミクスを解析した[2]。

【実験装置】Fig. 1 に実験装置の概略を示す。電磁石の磁極間に回転ステージが設置され、液晶セルには 2 枚の偏光板が直交ニコルとなるよう取り付けられている。磁場内で液晶セルを回転した際の透過光強度の変化は、液晶セルを回転磁場下で偏光顕微鏡観察したものと同値となる。

【実験および解析結果】PEG-PN 膜をコートし、ネマチック液晶 E44 相当品 (LCC 株式会社, $T_{NI} = 100^{\circ}\text{C}$) を封入した液晶セルを装置にセットし、ステージを一定速度で 1 回転させた際の透過光強度 I の変化を Fig.2 に示す。赤線は Oswald の理論 (下式) に対するフィッティング曲線を表す[2]。

$$\phi_s = \omega t - \Phi - \left(\frac{r}{2}\right) \sin(2\phi_s)$$

ここで ϕ_s は表面ダイレクターと配向容易軸のなす角を表し、 ω は磁場の角速度、 t は時刻である。位相角 Φ は磁場方向からの一定の位相遅れの大きさを表し、表面粘性係数 γ_s に直接関係する。また r は、 ϕ_s に依存した回転速度の周期的な振動の大きさを表し、弾性的な応答にかかわる界面のアンカリングエネルギー W に直接関係する。本研究では、 Φ および r と実際の物理量と間の関係を用いて、Slippery 界面の物性を特徴づける、起源の異なる W (弾性) と γ_s (粘性) を独立かつ定量的に評価することに成功した。また液晶 (E44) と PEG-PN 界面では、 T_{NI} から 70°C 程度低い低温領域においても、 W が十分に弱まっていることが確認できた。

【参考文献】[1] 山下真澄: 不純物 disorder 効果による表面局所融解と Slippery 界面. 修士論文 (2016)
[2] P. Oswald: EPL 107.2 (2014): 26003.

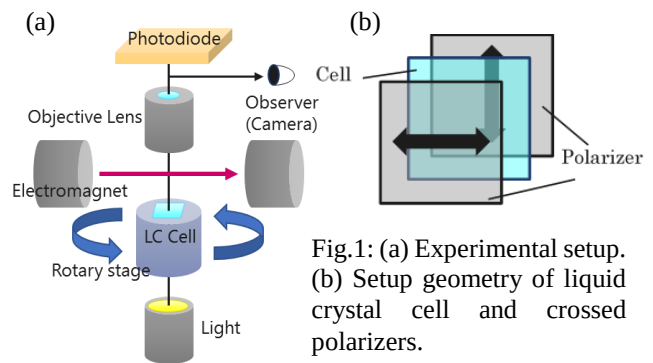


Fig.1: (a) Experimental setup. (b) Setup geometry of liquid crystal cell and crossed polarizers.

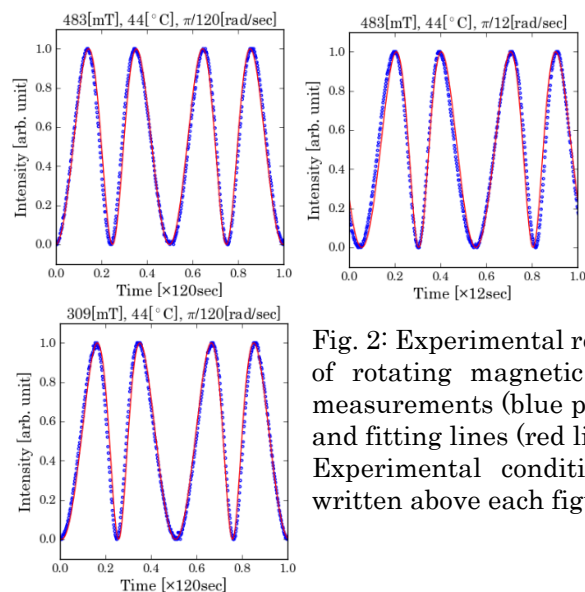


Fig. 2: Experimental results of rotating magnetic field measurements (blue points) and fitting lines (red lines). Experimental condition is written above each figure.

Atiyah-Hirzebruch スペクトル系列によるトポロジカル相の研究

物性基礎論:凝縮系物理研究室 瀧内敦司

Abstract We provide topological classification of systems with point group symmetry by using Atiyah-Hirzebruch spectral sequence. We discuss the similarity and difference between our result and symmetry-based indicator.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

トポロジカル物質理論の研究対象の一つは、そもそも系を特徴づけるトポロジカル不変量にはどのようなものが存在するかということを明らかにすることである。これには系が持つ対称性が重要であることが知られており、近年では時間反転対称性 (TRS)、荷電共役対称性 (PHS)、カイラル対称性 (CS) に加えて、結晶の対称性 (点群、空間群) がある場合の分類が調べられている。空間群の数は膨大であるが、これらを系統的に取り扱うための枠組みとして topological quantum chemistry や symmetry-based indicator (SI) と呼ばれる方法が使われている [1, 2]。また、他の方法として、K 理論を用いた方法があり、その計算手法の一つとして Atiyah-Hirzebruch スペクトル系列 (AHSS) を利用することが提案されている [3]。スペクトル系列とは、鎖複体の列で、各鎖複体のホモロジーによって次の鎖複体が定義されているものである。この計算によって K 群を近似的に求めることができる。鎖複体は加群の列と微分と呼ばれる準同形写像から成るが、スペクトル系列の計算ではどのようにして微分を求めるかが一つの問題となる。バンド理論のトポロジーを調べる際にも微分を簡単に求める方法は今のところ確立されていない ([3] では今のところ対応するハミルトニアンを一つ一つ作ることで対処している)。このような事情から AHSS による K 理論の計算は完全には実行されていない。

この問題を解決する最も簡単な方法としては他の理論によって得られた結果を利用することが考えられる。特に、SI は AHSS と共通する部分があり、すでに類似点がいくつか指摘されている。一方、SI はすでに様々な性質が調べられており、その中には AHSS の計算を実行するうえで必要な情報も含まれている。例えば、SI でトポロジカルに非自明であると判定されたバンド構造には絶縁体及びギャップレス状態の両方が混在しており、どのようなときに絶縁体になるのかが一つの問題であったが、例えば class AI (spinless 系で TRS のみ) では非自明な SI を持つバンド構造は必ずギャップレス状態であることが知られている [4]。バンド構造の既約表現から系がギャップレスであるかどうかを判定することは AHSS の計算で重要になる。

本研究では、いくつかの点群対称性に対して AHSS の計算を行った。また、上記の目的のため、AHSS が比較的簡単に計算できる場合について、SI の研究から得られた結果を再現できるかどうかを調べた。具体的には、まず class A (TRS、PHS、CS なし)、AI、AII (spinful で TRS のみ) の場合にいくつかの結果を具体的な計算によって確かめた。例えば、class AI の場合に AHSS によって得られたギャップレス状態は SI と一致した。また、SI は PHS や CS を持つ場合に拡張されている [5]。このような場合に対しても比較を行ったが、AHSS の計算から SI の結果を再現できない部分があった。これはカイラル対称性の定義の仕方が異なっているためであると考えられる。

References

- [1] B. Bradlyn, L. Elcoro, J. Cano, M. G. Vergniory, Z. Wang, C. Felser, M. I. Aroyo, B. A. Bernevig, *Nature* 547, 298 [305] (2017).
- [2] H. C. Po, A. Vishwanath, H. Watanabe, *Nature Communications* 8, 50 (2017).
- [3] K. Shiozaki, M. Sato, K. Gomi, arXiv:1802.06694.
- [4] Z. Song, T. Zhang, C. Fang, *Phys. Rev. X* 8, 031069.
- [5] S. Ono and H. Watanabe, *Phys. Rev. B* 98, 115150.

フォトニック結晶における Z_2 トポロジーの観測

光物性研究室 瀧口賢治

Abstract Topological photonic crystals with Z_2 symmetry have been proposed theoretically but have not confirmed experimentally yet. Here, we have investigated electric field distributions inside a unit cell of two kinds of photonic crystals, which photonic bandgaps are topologically trivial and topologically non-trivial, by electromagnetic simulation and by direct observation of the near-field image.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

フォトニック結晶を用いた導波路では欠陥や形状による散逸が存在するが、近年、 Z_2 指数と呼ばれるトポロジカルな不変量によって基底されるトポロジカルに自明なフォトニック結晶と非自明なフォトニック結晶の界面に生じるエッジ状態では散逸を抑制できることが理論的に示された [1]. しかしトポロジーを担うバンドギャップ近傍の電磁波の波動関数を実験的に決定した例はない. そこで我々はテラヘルツ領域にバンドギャップを有し、トポロジカルに自明なバンドギャップを持つフォトニック結晶 (shrunken 構造) と非自明なバンドギャップを持つフォトニック結晶 (expanded 構造) の波動関数を調べた.

図 1(a), (c)に示すように、正三角形の縦穴が蜂の巣格子状に配列した構造を持つ 2 次元フォトニック結晶を厚さ $50\ \mu\text{m}$ のシリコンウェハから作製した [2]. 時間領域差分 (FDTD) 法に基づく計算で、フォトニック結晶が $1\ \text{THz}$ 近傍にフォトニックバンドギャップを持ち (図 1(b), (d)), shrunken 構造と expanded 構造でバンドギャップ近傍の波動関数が p 関数的なものから d 関数的なものに入れ替わることがわかった. また励起光を直線偏光とし、2 次元面に垂直に入射する計算を行うと、図 2 に示すように p 関数的なエネルギー位置で強い共鳴が起きることがわかった. また shrunken 構造, expanded 構造共にその共鳴周波数の高周波側と低周波側で電場強度の空間分布が入れ替わっているということがわかる.

実験では、 $70\ \text{fs}$ の時間分解能と $40\ \mu\text{m}$ の空間分解能を持つ実時間テラヘルツ顕微鏡を用い [3], 結晶に生じる電場分布の直接観測を行なった. その結果、電場の非局所的な強度分布の周波数依存性が計算結果と一致することがわかった. しかしフォトニック結晶の単位格子内の局所的な電磁波分布に関しては現在考察中である.

References

- [1] L. H. Wu and X. Hu, Phys. Rev. Lett. **114**, 223901 (2015).
- [2] S. Barik, H. Miyake, W. DeGottardi, E. Waks, and M. Hafezi, New J. Phys. **18**, 113013 (2016).
- [3] F. Blanchard, A. Doi, T. Tanaka, H. Hirori, H. Tanaka, Y. Kadota, and K. Tanaka, Opt. Express **19**, 8277 (2011).

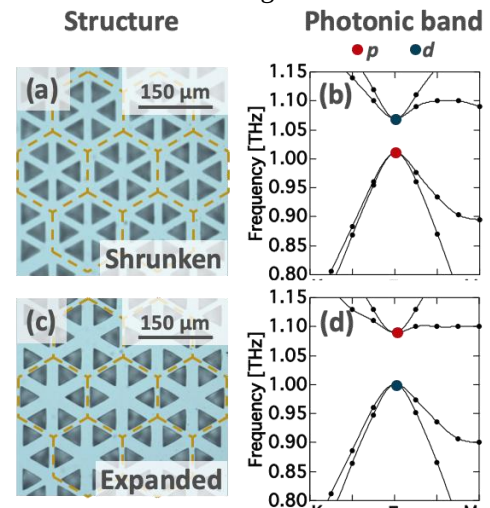


Fig.1 (a), (c) Photonic crystals with shrunk and expanded structure. Length between the holes in the unit cell was shrunk or expanded compared to the honeycomb lattice structure. Orange dashed lines represent unit cells. (b), (d) Photonic bands of shrunk or expanded structure. It has a topologically trivial or non-trivial bandgap.

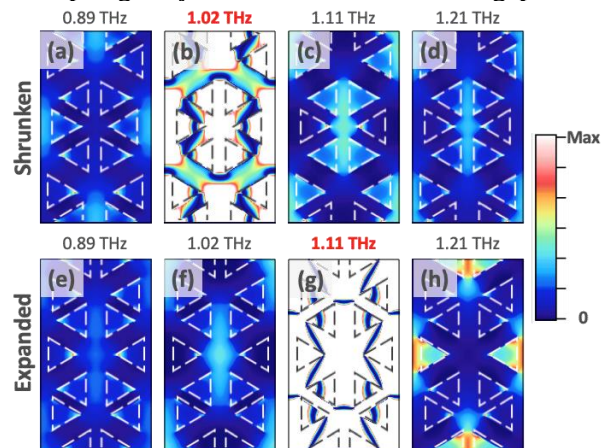


Fig.2 Frequency dependence of electric field distributions for shrunk (a)-(d) and expanded (e)-(f) structures. Dashed triangles indicate the position of the air-hole of each photonic crystal.

超高感度比熱測定装置による 低エネルギー準粒子励起の研究

量子凝縮物性研究室 谷口智哉

Abstract We have developed a specific heat measurement system which enables to measure the tiny amount of crystals ($\sim 10 \mu\text{g}$) using a home-built calorimeter with a long relaxation method. By the specific heat measurements of a Kondo insulator YbB_{12} and a spin liquid candidate 1T-TaS_2 , we studied the low energy excitations of these materials.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

比熱は最も基本的な熱力学量であり、物性研究において比熱測定は必要不可欠なものである。比熱は低エネルギー励起の詳細を調べる有効な手段であるため、準粒子励起に関する重要な情報をもたらすことができる。これまで比熱測定は、主として準断熱法や緩和法と呼ばれる手法で行われてきた。しかしながらこれらの手法では、高感度の比熱測定のためには通常数 mg 以上の大量の試料が必要であった。このような試料ではしばしば不均一性が無視できず、輸送測定のような微小試料を用いた測定と同一試料での直接的比較ができないといった問題がある。そこで我々は、新たに微量の試料でも測定可能な比熱測定システムを開発した。具体的には、試料ステージのバックグラウンド比熱を可能な限り小さくし(Fig.1)、長時間緩和法[1]により比熱測定を行った。これにより、数十 μg ほどの極小試料に対しても高精度の比熱測定が可能になった。本研究では、この比熱測定システムを用いて、近藤絶縁体 YbB_{12} および量子スピン液体候補物質 1T-TaS_2 の比熱測定を行い、極低温における低エネルギー励起を調べた。

近藤絶縁体 YbB_{12} において、絶縁体でありながら磁化や電気抵抗の量子振動が観測されている。このような量子振動は通常、金属で観測されるものであり、 YbB_{12} は絶縁体とも金属とも区別することができない前例のない電子状態を持つことが示唆される [2]。比熱測定の結果、 YbB_{12} において、絶縁体であるにも関わらず、絶対零度極限において有限の γ 項を観測し、金属と類似した有限の温度に比例した項をもつことを示した。このような温度に比例する項はギャップレスな準粒子励起の証拠を与える。同様のふるまいは熱伝導率でも観測され、電気的中性かつ遍歴的なフェルミオン励起が存在することが示唆される。

遷移金属ダイカルコゲナイド 1T-TaS_2 は、量子揺らぎにより絶対零度においても電子スピンの長距離秩序を示さない量子スピン液体状態の可能性が指摘され、注目を集めている[3,4]。比熱測定の結果、 1T-TaS_2 においても絶対零度において有限の比熱の温度に比例した項が観測され、ギャップレスなスピン励起の存在が明らかとなった。一方で、磁場依存性を詳細に調べると、比熱と熱伝導率が大きく異なるふるまいを示した。このことから、基底状態において遍歴的スピン励起と局在的スピン励起が共存していることが示唆される[5]。

講演では、比熱装置開発についての詳細および、測定によって得られた結果について報告する。

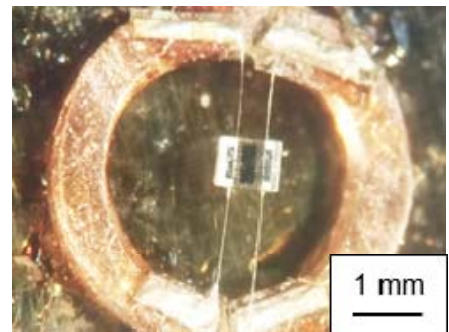


Fig. 1. A photographic image of specific heat cell.

References

- [1] Y. X. Wang, *et al.*, Phys. Rev. B **6309**, 094508 (2001).
- [2] Z. Xiang, *et al.*, Science, eaap9607 (2018).
- [3] K. T. Law, *et al.*, PNAS USA **110**, 6996 (2017).
- [4] M. Klanjsek, *et al.*, Nature Phys. **13**, 1130 (2017).
- [5] H. Murayama, *et al.*, arXiv:1803.06100.

ダイマー・モノマー混合系における Soret 効果

相転移動力学研究室 近清なつみ

Abstract We investigate the Soret effect in dimers and monomers mixtures by means of molecular dynamics simulation. Each dimer consists two monomers bonded by harmonic potential. We found the Soret coefficient changes largely depending on the internal degree of the dimer (the spring constant), the average temperature and the number density. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

複数成分からなる混合流体が温度勾配をかけると、成分ごとに異なる大きさの濃度勾配が生じ、Soret 効果と呼ばれている。Soret 効果の特徴付ける指標として Soret 係数と呼ばれるものがあり、成分 1, 成分 2 からなる混合系における成分 1 の Soret 係数は、下式のように各成分の局所的なモル分率 χ_1 , χ_2 および局所温度 T から定義される。

$$S_{T1} = \frac{-1}{\chi_1 \chi_2} \frac{\nabla \chi_1}{\nabla T}$$

Soret 係数は、成分間の分子間力相互作用、混合比、系の平均温度などに依存し、その振る舞いを、化学ポテンシャルを用いた熱力学的な議論により説明することができる。一方、質量のみ異なる二種の分子の混合系でも Soret 効果が観測されており、より質量の重い成分が低温側に集まることが知られており、Isotope 効果と呼ばれている。この現象は熱力学的議論では記述できない、本質的な非平衡現象と考えられている。非平衡現象の難しさから、Soret 効果の物理的起源の全容については、まだ解明されていない。

本研究では、分子内の自由度が Soret 効果にどのように寄与するかについて考えた。内部自由度を有する最も簡単な系として、Lennard-Jones ポテンシャルの斥力部分で相互作用する球「モノマー」と、バネポテンシャルでモノマー 2 つを結合した「ダイマー」からなる 2 成分系を、非平衡分子動力学シミュレーションを用いて調べた。バネポテンシャルの寄与が十分に大きい場合には、ダイマーを、モノマーに対して 2 倍の質量を持つダンベル状の物体とみなすことができ、Soret 効果が表れることを期待した。また一方、バネポテンシャルの寄与が十分に小さく、この系をモノマー 1 成分系として見なすことができる場合には、Soret 効果が起こらなくなると予想した。

各系の Soret 係数を算出し、そのバネ定数依存性や、系の体積密度、系の平均温度への依存性を調べた。系の体積密度が高く、バネ定数が大きい場合には、ダイマーが低温熱浴側へ移動する様子が観測された。また、バネ定数の値を小さくしていくと、Soret 係数の符号が逆転し、ダイマーが高温側へ移動する様子が観測された。一方、系の体積密度が低い場合には、バネ定数の値が大きい場合小さい場合どちらでも、ダイマーが低温側へ移動する様子が観測された。発表では、その詳細な振る舞い、物理的機構について紹介する。

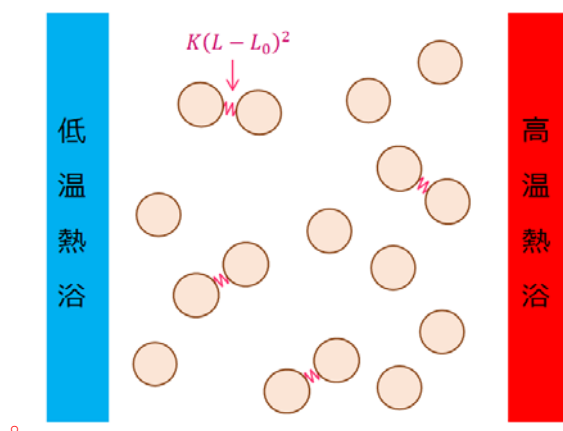


Fig1. A schematic picture of a dimer and monomer mixture under consideration.

非摂動論的非線形光学現象における 動的対称性

光物性研究室 永井恒平

Abstract Polarization dependence of high-order sideband generation (HSG), which is one of the nonperturbative nonlinear optical phenomena, was measured systematically in monolayer molybdenum dichalcogenides. Our new model where HSG is treated as Raman scattering in Floquet state revealed that the dynamical symmetry governs the selection rule of HSG.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

高強度光と物質が非摂動論的に相互作用する状況下では高次高調波発生（HHG）、高次サイドバンド生成（HSG）等の極端な非線形光学現象が現れる[1,2]。HSGは半導体の電子遷移に対して非共鳴な高強度中赤外（MIR）光の照射下で近共鳴な弱い近赤外（NIR）光を入射するときに発生する、NIR光の周波数の周りにMIR光の周波数間隔で分布した放射である。特に光学遷移の偏光選択則があるバレーをバンド構造にもつ単層遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDs）に対しては、HSGの直線偏光選択則を調べる実験が行われた[2]。そのメカニズムはバンド間分極を作る電子正孔対の加速、再衝突ダイナミクスで理解され、波数空間におけるモデルの対称性が選択則を決めると説明されてきた。しかしこのような選択則は、空間と時間に対する対称操作の積で記述される動的対称操作を用いて、光と物質の複合系がもつ対称性から実空間において一般的に理解できるはずである[3]。また、動的対称性は励起光の偏光によって劇的に変わることが予想される。

そこで本研究では、まだ観測されていないHSGの円偏光選択則にまで拡張して選択則を調べる実験を行い、選択則を動的対称性によって理解することを試みた。実験ではピーク強度 0.1 TW/cm^2 のMIRパルス(光子エネルギー 0.26 eV)とNIRパルス(光子エネルギー 1.55 eV)を試料に入射することでHSGを起こし、分光器とCCDカメラでスペクトルを測定した。

我々は単層TMDsの一種である MoS_2 において直線偏光励起下で7次まで、円偏光励起下で3次までのHSGを観測した。図1は単層 MoS_2 において各励起偏光で得られた円偏光HSGスペクトルを示す。励起偏光によって異なるHSGの選択則を示し、次数によってはNIR光と反対周りの円偏光サイドバンドが発生していることがわかる。これらは次式の円偏光選択則

$$m\sigma^{\text{MIR}} + \sigma^{\text{NIR}} - \sigma_m^S = 3N \quad (N : \text{integer})$$

に従うことを見出した。ここで $\sigma^{\text{MIR}}, \sigma^{\text{NIR}}, \sigma_m^S = \pm 1$ はそれぞれMIR、NIR、 m 次サイドバンドの左右円偏光を示す。また単層 MoS_2 の良い結晶軸方向であるzigzag方向、armchair方向に対する直線偏光選択則も明らかにした。MIR光の偏光がzigzag方向のときは奇数次がNIR光と垂直偏光、偶数次が平行偏光のHSGが得られた。MIR光の偏光がarmchair方向のときはすべての次数がNIR光と平行偏光になることがわかった。得られた選択則は電子正孔対の加速、衝突ダイナミクスでは説明できず、HSGを「MIR光によって周期的に駆動されたフロケ状態によるNIR光のラマン散乱」として捉えた際に、フロケ状態の動的対称性から理解できることがわかった。

References

- [1] S. Ghimire *et al.*, Nat. Phys. **7**, 138 (2011).
- [2] F. Langer *et al.*, Nature **557**, 76 (2018).
- [3] O. Alon, V. Averbukh, and N. Moiseyev, Phys. Rev. Lett. **80**, 3743 (1998).

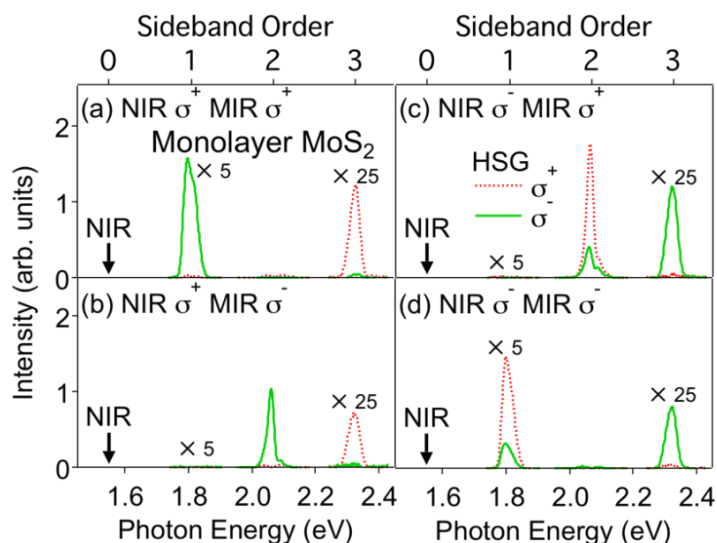


Fig. 1. Polarization dependence of circularly polarized HSG spectra in monolayer MoS_2 .

直流電流による d 電子系酸化物の導電性・磁性の制御

固体量子物性研究室 沼崎凌

Abstract We performed simultaneous measurements of transport and magnetic properties of $\text{Ca}_3(\text{Ru}_{0.995}\text{Ti}_{0.005})_2\text{O}_7$ under DC current. We demonstrated that antiferromagnetic insulating state can be *in-situ* switched to a diamagnetic state with a lower resistivity by DC current. This discovery opens up the possibility of creating novel electronic functionalities in highly- correlated materials.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

反強磁性 Mott 絶縁体である Ca_2RuO_4 に温度変化や圧力印加などの外部的刺激を加えると「凍りついた」電子が「溶け出し」、金属絶縁体転移や超伝導などの現象を示す[1-2]。また、室温付近における 40 V/cm 程度の小さな電圧印加によっても、金属絶縁体転移が起こる[3]。さらに、 Ca_2RuO_4 に数 mA 程度の電流を流しながら温度を下げると、50 K 程度以下で大きな反磁性を示すことが私の所属するグループでごく最近発見された[4]。これらにより、電流のもとでの非平衡定常状態における強相関電子系の振る舞いに大きな注目が注がれている。

そこで我々は、Mott 絶縁体に対する電流の効果をより詳しく調べるために、近縁のルテニウム酸化物である $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ において Ru を Ti に 0.5% 程度置換した Mott 絶縁体である $\text{Ca}_3(\text{Ru}_{0.995}\text{Ti}_{0.005})_2\text{O}_7$ [5] に対し、電流下での電気伝導・磁気特性の同時測定を行った。その結果、 $\text{Ca}_3(\text{Ru}_{0.995}\text{Ti}_{0.005})_2\text{O}_7$ においても 10 K 以下の低温において大きな反磁性を発見した(Fig. 1)[6]。また、 Ca_2RuO_4 では電流下で反強磁性が完全に消失するのに対し、 $\text{Ca}_3(\text{Ru}_{0.995}\text{Ti}_{0.005})_2\text{O}_7$ では反強磁性は消失せず、反磁性も共存していることが分かった。さらに、電流を ON-OFF することで、低温での絶縁性の強い Ca_2RuO_4 ではなしえなかった反強磁性絶縁状態と反磁性低抵抗率状態の相互スイッチングを行うことができた。このように、電流誘起反磁性は異なる物質で確認できたため、さらに他の物質でも発現する可能性がある。さらに、磁性制御を含め、非平衡定常状態が強相関電子系の新しい機能性を生む手法となる期待が持てる。

また、Ru 酸化物以外の強相関電子系物質への電流効果を調べるため、Mn 系酸化物絶縁体に対しても電流下での電気伝導・磁気特性の測定も行った。

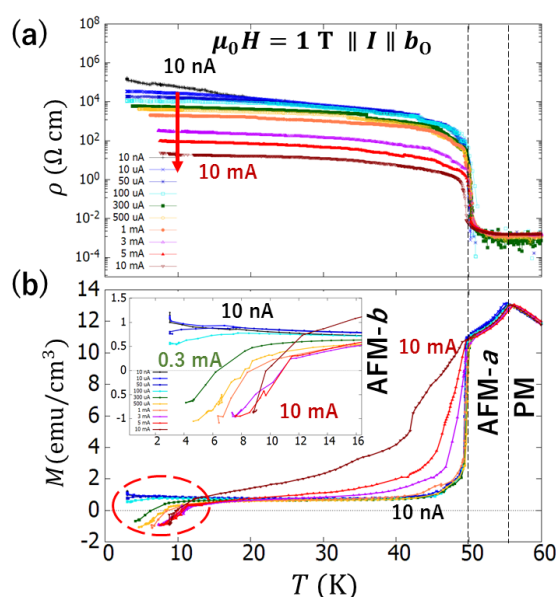


Fig. 1 Temperature dependence of (a) resistivity and (b) magnetization of $\text{Ca}_3(\text{Ru}_{0.995}\text{Ti}_{0.005})_2\text{O}_7$ under DC current[6]. PM : paramagnetic phase ; AFM- $a(b)$: antiferromagnetic phases with the moments along the $a(b)$ axis.

References

- [1] C. S. Alexander *et al.*, Phys. Rev. B **60**, R8422 (1999).
- [2] P. L. Alireza *et al.*, J. Phys.: Condens. Mat. **22**, 052202 (2010)
- [3] F. Nakamura *et al.*, Sci. Rep. **3**, 2536 (2013).
- [4] C. Sow *et al.*, Science **358**, 1084 (2017).
- [5] S. Tsuda *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 241107 (2013).
- [6] C. Sow, R. Numasaki *et al.*, submitted.

超流動 ^3He ドメイン構造の安定性についての研究

低温物理学研究室 福部翔太

Abstract We studied a stability of chiral domain wall in a slab of superfluid ^3He -A. Based on the measurements under several pressures and at various temperatures, we found that domain walls existed stably in a regime under high pressure and at low temperature.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

超流動 ^3He -A 相は、スピン $\mathbf{S}$ に直交する向きに定義される $\hat{\mathbf{d}}$ ベクトルと、Cooper 対の軌道角運動量の向きを示す $\hat{\mathbf{l}}$ ベクトルの二つのベクトルでその異方性が決まる異方的超流動状態である。 $\hat{\mathbf{d}}$ と $\hat{\mathbf{l}}$ の空間構造は texture と呼ばれ、各種自由エネルギーや境界条件からその構造が決定される。Texture 中には、異なる基底状態に挟まれた局所的にエネルギーの高い準安定状態が存在する場合がある。このような準安定状態で平面構造を持つものは domain wall と呼ばれる。

当研究室の笠井らは、100 μm 間隔の平行平板中の超流動 ^3He -A 相において、chirality が部分的にそろった texture 中に出現した domain wall を MRI 測定によって可視化することに成功した。急冷するなど各種のプロセスを試したが、domain wall の存在しない均一 texture は一度もできなかった。MRI 測定により 2.00mK で domain wall の存在が確認されたのち、臨界温度 T_c 直下まで温度を上げ再度 2.00mK まで温度を下げて MRI 測定を行った結果、ドメイン構造が変化する現象が確認された。ドメイン構造の変化とは、domain wall の位置の変化や対消滅を意味している。さらに研究を進めた結果ドメイン構造はある温度 T^* を境に、 $T < T^*$ では変化せず安定に存在し、 $T > T^*$ では変化することがわかった。当研究室の西岡らは、 T_c 直下で温度を細かく変えながら MRI 測定を繰り返すことで、 T^* が約 2.30mK ($0.96T_c$) であることを明らかにした。Domain wall の位置が変化しないのは容器表面でピン止めされているからで、ドメイン構造が変化するにはピン止めの効果を上回る何らかの外力が domain wall に対して働く必要がある。我々の興味のひとつに、domain wall の位置や本数をコントロールすることが挙げられる。ピン止めのメカニズムやドメイン構造を変化させる外力が明らかになれば、そのようなコントロールが可能になると期待している。

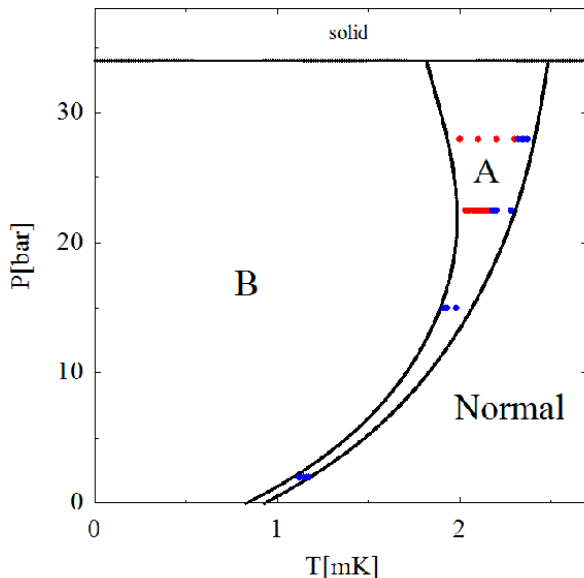


Fig1 Stability of domain wall

以上の先行研究では試料の圧力は 28bar にして行われた。本研究では異なる圧力で同様の測定を行うことで、domain wall の安定性が圧力に対してどう変化するかを調べた。 $B=0.14\text{T}$ の磁場下で 2bar, 15bar, 22.5bar の三つの圧力で MRI 測定を行った結果、2bar, 15bar では domain wall が一度も観測されなかった。ただし MRI 測定で観測されなくても存在している可能性はある（数時間にわたる MRI 測定中ドメイン構造が絶えず変化していると観測されない）。そして 22.5bar ではほぼ毎回の測定で観測された（数十回の測定の中で一度だけ観測されないことがあった）。22.5bar でも先行研究同様、 T_c 直下まで温度を上げることでドメイン構造が変化する現象が確認された。そこで温度を小刻みに変えながら MRI 測定を行った結果、先述の T^* が約 2.18mK ($0.94T_c$) であることがわかった。ドメイン構造が安定に存在した領域を $B=0.14\text{T}$ の相図の上に表したものが Fig1 である。

赤い点は domain wall が安定して存在した場合を、青い点はドメイン構造が変化した、あるいは観測されなかった場合を表している。これらの結果から、domain wall は低温高圧側でしか安定に存在できないことがわかった。

非一様せん断における気泡集団の合体過程の研究 (火山噴火脱ガス過程についての一考察)

流体物理学研究室 丸石崇史

Abstract To study degassing processes we propose a two-phase hydrodynamical model which controls on the styles of a volcanic eruption. We deal with numerically the coalescence of bubbles in a two-dimensional non-uniform flow and show that channel-like structures arise in a high shear stress region and advance degassing.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

火山噴火は、気泡を含む高粘性液体であるマグマが、浮力により縦に長い固体壁中を上昇して、地表に噴出する現象である。噴火規模はマグマが含んでいる気体の量に比例する。地表に噴出する前に、気泡同士が合体して壁や地表から気体が流出すると(脱ガス)、マグマは浮力を失い噴火規模は小さくなる[1]。そのため、高粘性液体中の気泡集団の合体過程を調べることは、噴火規模を予測するために重要である。

実験的研究により、高粘性液体中の気泡集団にせん断をかけると、気泡が伸長・合体して系スケール程度の細長い気泡(チャネル構造)を形成することが報告された[2]。また、せん断を局所的に強め気泡を大変形させる領域が現れて合体を促進する不安定化現象が報告された[3]。この結果より、マグマも上昇中に流れによるせん断を受けるため、類似の不安定化によってせん断が強化される領域が現れ、チャネル構造を形成して脱ガスを促進することが推測される。しかしながら、非一様なせん断によるチャネル構造の形成条件など、その基本的性質は明らかではない。

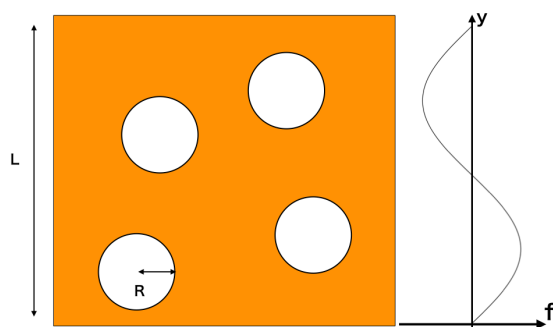


Fig. 1. Schematic representation of the numerical setup



Fig. 2. A typical snapshot of the channel-like structures. yellow: liquid phase, black: gas phase

本研究の目的は、界面を含む流体力学に基づく気泡の集団運動に注目し、非一様なせん断に起因するチャネル構造の形成過程を明らかにすることである。ここでは非定常な合体過程を調べるために、気泡集団に非一様な外力を加える2次元流体シミュレーションを行った(Fig.1)。

この結果、せん断の大きな領域で細長い気泡が形成され、周囲の気泡を吸収して成長する様子が観測された(Fig.2)。講演では、チャネル構造の定量的な定義及び、その形成条件や周囲気泡との相互作用も合わせて報告する。

References

- [1] Cassidy et al., Nat Commun. **9**, 2838 (2018).
- [2] Okumura et al., Jour. Geophys. Res. **113**, B07208 (2008).
- [3] A. Namiki, Earth Planet. Sci. Lett. **353-354**, 72-81 (2012).

周期駆動非平衡系における離散時間結晶に関する研究

凝縮系理論グループ 水田 郁

Abstract

Time crystals, where time translation symmetry is spontaneously broken, are ordered phases unique to nonequilibrium systems. We propose new time crystals which can induce various time crystalline orders by focusing on spatial translation symmetry. We discuss their properties and platforms, with comparing conventional time crystals.

Keywords Nonequilibrium, Periodically driven (Floquet) systems, Time crystals

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

ハミルトニアンが時間周期的に変化する系を周期駆動非平衡系(Floquet 系)と呼ぶ。トポロジカル相(トポロジカル絶縁体・超伝導体など)や自発的対称性の破れによる秩序相(超伝導相・強磁性相など)など物性における代表的な物質相の従来のフィールドは平衡系であった。しかし近年では、周波駆動による物質相の制御や非平衡系特有の物質相の実現が理論的に指摘されていること、そしてそれらを可能にする実験技術が発展しつつあることから、Floquet 系における物性現象の研究が急速に進展している。

Floquet 系における特異な物性現象として近年特に着目されているのが、時間結晶(Time Crystals)である。時間結晶とは、時間並進対称性を自発的に破った秩序相であり、平衡系には存在し得ない非平衡系特有の秩序相[1]として注目されている。従来の時間結晶では何らかのオンサイトの対称性に着目し、スピン系などにおいて周期駆動によりオンサイトの対称操作とその対称性の破れを引き起こすことで時間結晶秩序が実現されている[2]。近年になってそのような典型的な時間結晶はイオントラップ系などの人工量子系において観測できるようになったが[3]、実現できたのは 2T-時間結晶相、3T-時間結晶相と呼ばれる最も単純な時間結晶相のみである。

そこで、我々はオンサイトではない非局所的対称性ととりわけ空間並進対称性に着目し、空間並進操作と空間並進対称性の破れによって実現される時間結晶(空間並進誘起時間結晶)を考案した[4]。空間並進誘起時間結晶はスピンレスフェルミオン系やハードコアボソン系などで実現されるが、その特筆すべき点は、同一の駆動方法・系で様々な時間結晶相(具体的には nT -時間結晶相($n:2$ 以上の自然数))を実現できることである。すなわち、異なる時間結晶相を実現するには異なる駆動・系が必要となるために単純な時間結晶相しか実現できていない従来の時間結晶と対比して、空間並進誘起時間結晶はより複雑かつ豊富な時間結晶相を実現・観測する可能性を拓けるものであると言える。また、輸送現象が生じない従来の時間結晶に対して、空間並進誘起時間結晶には局所的なカレントが生じるという新奇な性質が現れることも示した。

本発表では、まず時間結晶の現れる舞台である周期駆動非平衡系(Floquet 系)について概説する。そして、オンサイトの対称性に着目して実現される従来の時間結晶と対比しながら、我々の研究成果である空間並進誘起時間結晶について議論する。具体的には、空間並進誘起時間結晶のモデルや時間結晶としての安定性を示すほか、量子情報との分野横断的な提案として量子回路上での実現方法も示す。

References

- [1] H. Watanabe and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. 114, 251603 (2015).
- [2] D. V. Else, B. Bauer, and C. Nayak, Phys. Rev. Lett. 117, 090402 (2016).
- [3] J. Zhang, P. W. Hess, A. Kyprianidis, et al., Nature 543, 217 (2017).
- [4] K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, et al., Phys. Rev. Lett. 121, 093001 (2018).

f 電子系物質におけるラッシュバスピ軌道相互作用の影響 非エルミート効果及び光誘起現象

凝縮系理論研究室 道下 佳寛

Abstract In the master course, I studied ①the impact of Rashba spin-orbit coupling, ②the properties of strongly-correlated electron systems as the open quantum systems and the non-hermitian effect and ③ laser-induced kondo effect and RKKY interaction, all in f-electron material. In the talk, I will explain mainly about the topic ①.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

f 電子系物質は、局在性の高い f 軌道と遍歴性の高い s, d 軌道の電子を含む。軌道の混成により、局在している f 電子のスピンを遮蔽しようとする近藤効果と、磁気秩序をたて局在スピンを安定化させようとする RKKY 相互作用が生まれる。両者の競合により、f 電子系物質は、重い電子の創発、非従来型超伝導、磁性等、多彩な現象・物質相を見せ、長きにわたって研究されてきた。そしてさらに、近年以下のことがわかってきた。

- ・ f 電子系などの重い元素は、一般に強いスピン軌道相互作用を含み、低温においてそれは物性に大きく影響を与える。[1][2]

- ・ 強相関電子系を非エルミートハミルトニアンで記述する際、非エルミートハミルトニアンに特徴的な例外点やバルクフェルミアークが出現するミニマム模型を f 電子系は与えてくれる。[3]

これを受けて、次のような研究を行なった。

① 空間反転対称性の破れた f 電子系におけるラッシュバスピ軌道相互作用 (RSOC) の影響

RSOC により近藤効果が抑制されることを解析計算及び数値計算の両面から調べた。また、RSOC と電子相関の協奏効果により、近藤絶縁体からヘリカル半金属への転移が起こりうることも発見した。[4]

② 強相関電子系の量子開放系としての性質、及び非エルミート効果

強相関電子系における非エルミートハミルトニアンを、量子開放系のフォーマリズムで導出し、実際に系のダイナミクスを記述するものであることを示した。また同様のフォーマリズムにより、電子相互作用は「測定」として振る舞い、Zeno 効果が発現することも示唆した。さらに、空間反転対称性の破れた f 電子系について、非エルミートハミルトニアンに特徴的な例外点及びバルクフェルミアークがどのように現れるかを調べた。[5]

③ f 電子系における光誘起効果

f 電子系物質に高周波レーザーを当てた際、近藤効果及び RKKY 相互作用がどのように変化するかフロケ理論及び量子開放系のフォーマリズムを用いて解析した。

修論発表会では、時間の都合上、①について主に話す。時間があれば、②③のトピックについても短く話す予定である。

References

- [1] W.Witczak-Krempa, et al, Annual Review of Condensed Mater Physics Vol5:57-82 (2014)
- [2] R. Peters and Y. Yanase PRB 97, 115128 (2018)
- [3] H. Shen, B. Zhen and L. Fu PRL 120,146402(2018)
- [4] Y. Michishita and R. Peters arXiv :1812.10888 (2018)
- [5] Y. Michishita and R. Peters “The non-hermitian effect in strongly-correlated systems” in preparation

台風形成の初期段階に関する 湿潤対流の数値シミュレーション

流体物理学研究室 山田遥

Abstract The Tropical cyclone is special atmospheric convection driven by the latent heat released by the water vapor. We numerically study a minimal model of tropical cyclogenesis proposed earlier. Our focus is on quantitative characterization of the solution and its dependence on parameters of the phase change of water.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

台風における根本的な問題として、そのマルチスケールにわたる大規模な渦の形成メカニズム及び、その後の自己発達のメカニズムがあり、古くから数多くの気象観測が行われてきた [1]。特に台風の形成に関しては、これまで様々なシナリオが提唱されてきたが、未だに議論に決着がついていない。しかし確実に言えることは、大気中の水の相変化に伴う潜熱が台風の持つ莫大なエネルギーの源になっているということである。このような水の相変化が駆動する流体運動を湿潤対流と呼ぶ。

Majda ら [2] は台風形成を説明するための湿潤対流の最も単純な理論モデルを提案している。彼らは多重尺度開法を用いて、湿潤大気の Boussinesq 方程式から 3 つの異なるスケールの運動を分離している。3 スケールの中、最も小さいスケールでは、この展開の結果として湿潤大気の水の相は水蒸気及び雨滴の 2 種類のみで十分であることが示される。そして、各混合比の時間発展方程式が得られた (大気中の水の液相としては本来雨滴の他に雲水が存在しているが、この論文では不必要であることが示される。)[2]。

本研究では、この最小スケールの理論モデルの軸対称の数値シミュレーションを追試した。文献 [2] では、定量的な評価はほとんどされていなかったため、結果の再現だけでなく、その方程式が持つ性質を定量的に評価することを試みた。本数値計算の結果の一例を Fig.1 に示す。

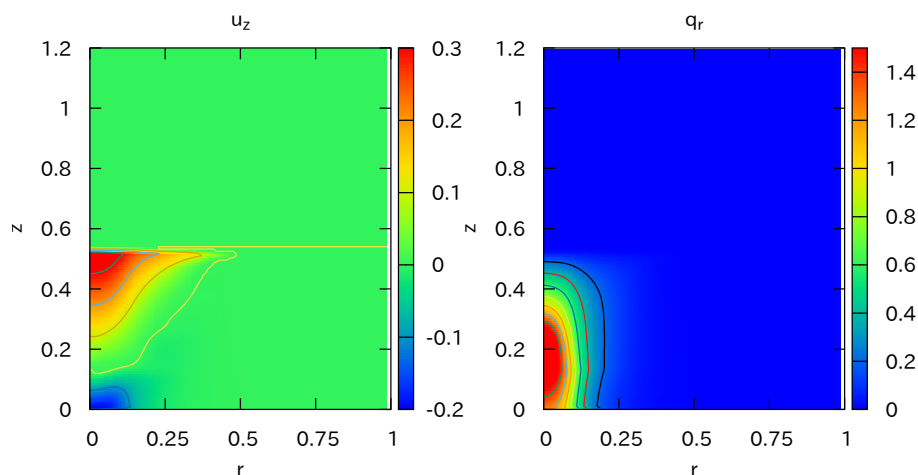


Fig.1 Contours of the vertical velocity(u_z) and the mixing ratio of rain(q_r) at $t = 1$.

追試の結果、[2] と定性的に同様の結果を得ることができた。定量的な評価としては、Fig.1 に見られるような、雲頂高度及び水平方向の広がり の時間変化を調べた。また、相変化に関連するパラメータ依存性を解析し、その結果に対する理論的な解釈を試みた。

References

- [1] Emanuel, K. A., “Atmospheric Convection”, Oxford University Press (1994).
- [2] Majda, A. J., Xing, Y. & Mohamadian, M., J. Fluid Mech., **657**, 478-501 (2010).

軟 X 線 FEL 照射による Xe クラスターのイオン化とナノプラズマ生成

不規則系物理学研究室 横野直道

Abstract Electron spectra of xenon clusters ($N \sim 1000$ and 200) were measured by using soft X-ray Free-Electron-Laser (FEL) at SACLA. Systematic changes in the spectra were observed by changing the order of magnitude of FEL intensity. The mechanism of ionization and nano-plasma formation in xenon clusters is discussed.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

近年、高強度な自由電子レーザー (FEL) の発展により、物質と短波長高強度レーザーとの相互作用が調べられている。FEL は短パルス、高輝度、高コヒーレンスという特徴を持っており、特に X 線領域の FEL の発展により 1 ショットでの単一粒子の構造解析が可能な光源として注目されている。一方、物質に高強度な FEL を照射すると放射線損傷により物質の状態が著しく変化してしまうという問題がある [1]。そのため、FEL を利用した研究において FEL と物質の相互作用を明らかにすることが重要になると考えられる。

本研究では、安定した化学的特性を持ちサイズ調整が容易な希ガスクラスターに着目し、Xe クラスターに軟 X 線 FEL を照射したときのイオン化と緩和について研究を行った。クラスターとは、原子や分子が数個から数万個程度凝集した少数多体系のことである。極紫外領域の FEL (EUV-FEL) を用いた先行研究 [2] によると、希ガスクラスターに EUV-FEL を照射すると、各原子の一光子吸収による最外殻からの逐次的な電子放出、クラスターが正に帯電することによるクーロンポテンシャルの成長、クーロンポテンシャルによる放出電子の運動エネルギーの減少という過程によってイオン化が起こる (逐次多光子多重イオン化)。さらに、EUV-FEL 強度が高い場合はクラスターからの電子放出が抑制され電子とイオンが高密度に凝集したナノプラズマが生成される。一方、本研究のように軟 X 線 FEL 照射による光イオン化によって内殻電子が放出される場合、後続過程としてオージェ緩和が起こるため、逐次多光子多重イオン化は光イオン化とオージェ緩和が密接に関わる複雑な過程となることが予想される。

我々は、日本の FEL 施設 SACLA BL1 の軟 X 線 FEL パルスを用いて、Xe クラスターを標的とした電子スペクトル測定を行った。Xe は 100 eV 近傍に大きな吸収断面積を持ち、軟 X 線 FEL 照射によって内殻の 4d 軌道から光電子を放出する。実験は、平均サイズ 1000 と 200 の Xe クラスターに 93 eV の軟 X 線 FEL パルスを照射し、生成された電子を運動量画像分光器によって計測した。得られた運動量分布から広いエネルギー範囲の電子スペクトルを導出した。Fig. 1 は測定で得られた運動量分布の二次元画像と、そこから導出した電子スペクトルの一例である。FEL の光強度を上記の先行研究 [2] よりも 1 桁広い範囲で変えて測定し、電子スペクトルの系統的な変化を観測した。電子スペクトルから逐次多光子多重イオン化の特徴に加え、オージェ緩和に由来する付加的な構造が見られた。また、高い FEL 強度のスペクトルからはナノプラズマの生成を示す熱電子の寄与が見られ、ナノプラズマ生成後の緩和過程として特徴的な構造も観測された。数桁におよぶ FEL 強度に対する Xe クラスターの電子スペクトルから、内殻励起による Xe クラスターのイオン化及びナノプラズマ生成について議論を行う。

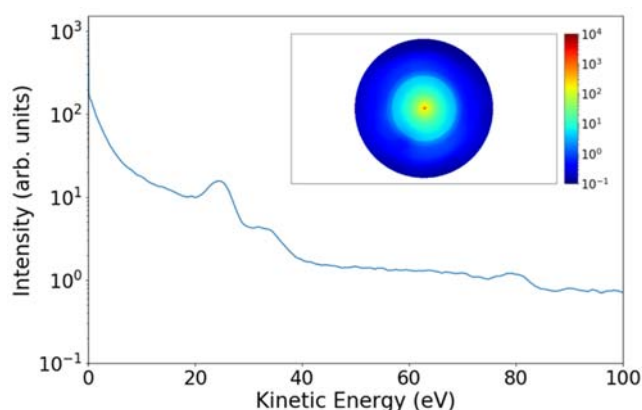


Fig. 1. Electron kinetic energy spectrum and 2-D projection image of electron momentum distribution (inset) measured after ionization of Xe_{200} cluster with FEL pulses (peak fluence : $6 \times 10^{-3} \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$).

References

- [1] Richard Neutze *et al.*, Nature **406**, 752-757 (2000).
- [2] C. Bostedt *et al.*, Phys. Rev. Lett **100** 133401, (2008).