

令和3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

2022年1月31日(月)、2月1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+Zoom
発表：15分（別に質問時間5分程度）

2022年1月31日（月）9：00～17：50

目次

1. ワイル半金属 Td-WTe₂における赤外光誘起構造変化
青木 涼太（9：00）・・・ 1
2. Sr₂RuO₄の超伝導における電流下での面内2回対称性
荒木 遼（9：20）・・・ 2
3. 超流動 ³He -A 相におけるカイラルドメンの空間配置に対する流れの効果
生貝 悠人（9：40）・・・ 3
4. Kitaev 磁性体 α -RuCl₃を用いた薄膜デバイスの研究
大湊 浩明（10：00）・・・ 4
5. RuCl₃薄膜の相制御と原子パターン形成
小野 孝浩（10：20）・・・ 5

10：40～10：50 休憩

6. 鉄系超伝導体における量子幾何学
北村 泰晟（10：50）・・・ 6
7. 空間反転対称性の破れた近藤強磁性体における非線形応答の研究
品田 晃希（11：10）・・・ 7
8. 和周波分光を用いた単層遷移金属ダイカルコゲナイド励起子状態の解明
高橋 伸弥（11：30）・・・ 8
9. Dirac 線ノード超伝導体 CaSb₂の核磁気共鳴/核四重極共鳴による研究
高橋 秀光（11：50）・・・ 9
10. 非エルミート表皮効果における乱れに関する研究
中井 雄介（12：10）・・・ 10

12：30～13：30 昼休み

11. パウリ常磁性の強い系における高磁場渦糸状態と超伝導揺らぎの理論
中島 大（13：30）・・・ 11
12. 外力駆動下でガラス的振る舞いを示す格子模型
布谷 幹太（13：50）・・・ 12

13. リオトロピックネマティック液晶とコロイド粒子間の動的結合
花田 康佑 (14:10) 13
14. コロイドの不可逆凝集によるネットワーク構造とその形成ダイナミクス
平田 光一 (14:30) 14

14:50~15:00 休憩

15. 古典通信のみ用いた Certified Deletion 付き公開鍵暗号
廣岡 大河 (15:00) 15
16. フラストレーションを内在する希土類化合物の低温磁気状態の研究
堀 文哉 (15:20) 16
17. キタエフ磁性体 α - RuCl_3 における Planar 熱量子ホール効果
横井 太一 (15:40) 17
18. 非エルミートキタエフ鎖における基底状態の縮退の安定性
岡 大翔 (16:00) 18

16:20~16:30 休憩

19. 繊毛虫集団の実験測定に基づく界面付近の運動に関する確率論モデル
奥山 紘平 (16:30) 19
20. 2波長同時照射による分子マニピュレーションの高解像度化
川西 永起 (16:50) 20
21. 固浸レンズを用いた量子気体顕微鏡による光格子中単一イッテルビウム原子の観測
北村 紀貴 (17:10) 21
22. ノイズ印加された非線形 Schrödinger 方程式における rogue wave 的発達
酒井 亮 (17:30) 22

2022年2月1日 (火) 9:00~15:10

23. 超伝導体における新奇圧電現象の研究
茶園 宙弥 (9:00) 23
24. 光格子中冷却 $\text{SU}(N)$ フェルミ気体 - 散逸およびスピン不均衡系の量子磁性 -
本多寛太郎 (9:20) 24
25. 遊泳微生物の集団ダイナミクス測定と解析手法の開発
今西 遼人 (9:40) 25
26. Kitaev スピン液体候補物質 α - RuCl_3 における磁場誘起トポロジカル相転移
鶴飼 柚希 (10:00) 26

27. カゴメ超伝導体 CsV_3Sb_5 の比熱異方性

小畑 慶人 (10:20) 27

10:40~10:50 休憩

28. SiC-PEG による Slippery 界面の安定化

金澤 和律 (10:50) 28

29. 核磁気共鳴による多元素ナノ粒子の研究

木下 雄大 (11:10) 29

30. 2軌道光格子量子シミュレーター:

キング関係式による新粒子探索とアンダーソン直交性崩壊への応用

齋藤 優汰 (11:30) 30

31. 空間反転対称性の破れた電子流体力学における非従来の量子輸送現象

佐野涼太郎 (11:50) 31

32. 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における周波数混合過程

島ノ江 励 (12:10) 32

12:30~13:30 昼休み

33. 紫外線レーザーを用いた分子マニピュレーション

高富士愛子 (13:30) 33

34. 液体 ^3He のスピン流とスピンドイナミクス

寺木 陽和 (13:50) 34

35. フォノン側線発光解析によるダイヤモンドの励起子基礎特性の解明

戸田倫太郎 (14:10) 35

36. 単一イッテルビウム原子を用いた量子計算に向けた

光ピンセットアレイシステムの開発とリドベルグ分光

中村 勇真 (14:30) 36

37. 情報理論的に健全な BQP 決定問題の古典検証を可能にする Trusted Center モデルの研究

米川 岬 (14:50) 37

ワイル半金属 Td-WTe₂ における赤外光誘起構造変化

光物性研究室 青木涼太

Abstract We investigated the photo-induced phase transition in the Weyl semimetal Td-WTe₂. Time-resolved second harmonic generation (SHG) measurements show that inversion symmetry is restored independently of the excitation polarization. Inter-orbital relaxation is estimated to be 20-40 fs, and the excitation polarization dependence of the carrier distribution is lost before the shear displacement is driven. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

ワイル半金属はバルクの電子構造として線形分散を有する系であり、伝導帯と価電子帯の交差点であるワイル点のまわりで±1のトポロジカル量子数(カイラリティ)をもつ。近年、このような物質のトポロジ性を光により制御する試みが盛んに行われている[1]。理論では様々なトポロジカル相転移機構の提案が行われているものの、実際の物質における実現例は未だ限られている。

層状物質 Td-WTe₂ はワイル半金属の一種であり、実験的に光誘起トポロジカル相転移が報告されている数少ない物質の一つとして注目を集めている[2]。この光誘起相転移では、ワイル半金属である反転対称性を破った Td 相からワイル点の消失した反転対称中心をもつ 1T' 相へ、積層間の剪断変位による構造転移が起こる。これに対しワイル点近傍にある特定のバンドのみを選択的に励起することができれば、新たなトポロジカル相を実現できるとの期待がある[3]。

そこで本研究では、赤外領域の波長で励起した際の相転移特性について詳しく調べた。この波長領域では遷移軌道間の対称性とバンド反転を反映した直線偏光選択則(軌道選択則)が提唱されており、非反転対称性の秩序が増強した新奇な相への転移が予言されている[3]。このような軌道選択的相転移が生じるかを検証するため、反転対称性の破れに敏感な第二次高調波発生(SHG)の観測を行った。

Fig. 1 は薄膜 Td-WTe₂ に対し赤外ポンプ光 (0.56 eV, 2.8 mJ/cm²) を照射した際の、プローブ光の SHG 強度変化を示したものである。面内入射偏光の向きによらず 50%程度の SHG 強度減少が観測されたことから、本研究の条件下では理論予測とは異なり反転対称性を回復する方向への転移のみが実現することがわかった。

この原因を調べるため、偏光分解ポンププローブ法により軌道選択的な励起状態の緩和時間を見積もった。軌道選択則が存在すると、励起直後はバンドの一部にのみキャリアが励起される(Fig.2)。この初期状態に対し別の軌道へと散乱するような緩和過程を取り入れたレート方程式から、キャリア分布の時間発展に関する表式を導出した。この式を用いて実験結果の解析を行い、軌道間緩和は 20-40 fs 程度であると推定した。この緩和時間は剪断変位の生じる時間スケール (~ 1 ps) より十分高速であり、剪断変位の駆動前に軌道選択的な励起状態が消失するため予測された相転移が起こらないことを示している。

References

- [1] C.P. Weber, J. Appl. Phys. **129**, 070901 (2021).
- [2] E.J. Sie *et al.*, Nature **565**, 61 (2019).
- [3] M.-X. Guan *et al.*, Nat. Commun. **12**, 1885 (2021).

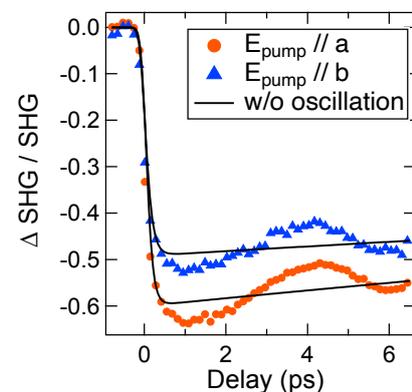


Fig. 1. SHG intensity change at 11 K as a function of time delay. The solid lines show the fitting results without the oscillation components.

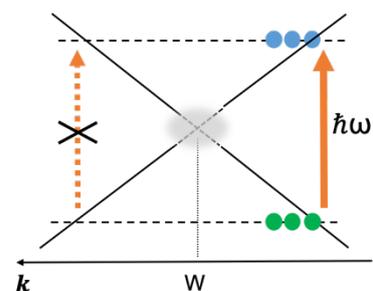


Fig. 2. Diagram of excitation in the presence of orbital selection rule.

Sr₂RuO₄ の超伝導における電流下での面内 2 回対称性 In-plane twofold anisotropy of the superconductivity of Sr₂RuO₄ under current

固体量子物性研究室 荒木遼

Quantum materials laboratory Ryo ARAKI

Abstract Toward the clarification of unusual H_{c2} behavior in Sr₂RuO₄, we performed the resistivity measurements capable of switching in-plane current directions under precise control of magnetic-field directions. We succeeded in separating the observed two-fold H_{c2} component into the current-dependent term and the current-independent term. We discuss the origins of three terms.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

層状ペロブスカイト構造をもつ Sr₂RuO₄ は転移温度 $T_c = 1.5$ K[1]での非従来型の超伝導のために長年活発に研究されてきた。近年の低エネルギーパルスを用いた核磁気共鳴実験などにより、この物質はスピン一重項 d 波超伝導体である可能性が指摘されている[2]。また、通常の第 2 種超伝導体であれば 2 次相転移となる超伝導転移が、0.8 K 以下でかつ正確に ab 面内に調整された磁場下では 1 次相転移となることが明らかになっている[3]。さらに興味深いことに、その温度領域では面内上部臨界磁場 H_{c2}/ab が明確な 4 回対称性を示すことが分かっている[4]が、その起源は明らかになっていない。これらの H_{c2} の振る舞いは Sr₂RuO₄ の超伝導を理解する上で重要なカギであると考えられる。

H_{c2} の異常な振る舞いをより詳細に調べるため、我々は電流強度 I とその方向 ϕ_I を H_{c2} を制御するパラメータとして新たに導入し、磁場の方向を正確に制御だけでなく面内電流の方向を切り替えることも可能な電気抵抗測定を行った[5]。我々の研究の先行研究で既に電流下の H_{c2} は通常の 4 回対称性に加え、付加的な 2 回対称性を示すことが明らかとなっている[6]。我々の実験では温度や電流の方向・強度を様々に変えてそうした振る舞いを網羅的に調査した。

得られた H_{c2} データ(Fig. 1)を系統的に分析することにより、我々は 2 回対称成分を電流に依存する項と依存しない項に分離することに成功した。前者は温度とともに増大し、磁場と電流の方向が垂直なときに最大の負の寄与を示したので、これは Lorentz 力により磁束渦糸が駆動した結果発生する渦糸フロー抵抗に起因すると考えられる。後者は一次相転移領域のみで現れたため、単純に試料の微細加工による表面キズや歪みが原因と考えるとその温度依存性を説明できない。この電流に依存しない 2 回対称性の出現は、一次相転移領域において試料の欠陥に対しより敏感な超伝導状態が生じていることを示唆している。

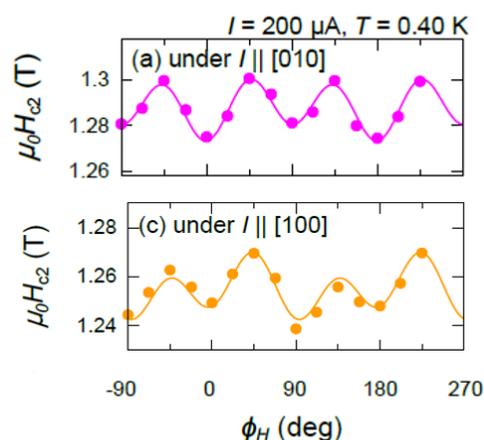


Fig. 1: H_{c2} of Sr₂RuO₄ under current parallel to the [010] direction (pink) and the [100] direction (yellow). These data clearly contain two-fold anisotropy that is altered by the current direction.

References

- [1] Y. Maeno *et al.*: Nature **372** (1994) 532.
- [2] A. Pustogow *et al.*: Nature **574** (2019) 72; K. Ishida *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **89** (2020) 034712; A. Chronister *et al.*: PNAS **118** (2021) 25.
- [3] S. Yonezawa *et al.*: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 077003; S. Yonezawa *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 083706.
- [4] Z. Q. Mao *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 991; S. Kittaka *et al.*: Phys. Rev. B **80** (2009) 174514.
- [5] R. Araki *et al.*, to be submitted (2021).
- [6] H. Suwa, 修士論文『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』(2018); T. Miyoshi, 修士論文『異方的超伝導体 Sr₂RuO₄ を用いた微細構造系の輸送特性』(2020).

超流動 ^3He -A 相におけるカイラルドメインの空間配置に対する流れの効果

低温物理学研究室 生貝悠人

Abstract In MRI measurement, we found that domain walls at the boundary of the chiral domains in superfluid ^3He -A are tilted by the superflow in the parallel-plate cell. Calculations show that the domain wall tilts about 10° if there is a flow about 0.2 mm/s in the cell.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

超流動 ^3He -A 相では、運動量空間での異方性を表す \hat{l} ベクトルとスピン空間での異方性を表す \hat{d} ベクトルが、セル中の境界条件の制約を受けて空間的に変化する空間構造をなしており、テクスチャーと呼ばれる。また同時に、セル中では、巨視的波動関数の位相の空間変化である流れもまた空間構造を持っており、テクスチャーと互いに影響しあっていると考えられる。したがって、テクスチャーの状態を知ることが、流れの空間構造を探ることにもつながる。

当研究室の笠井らは、 $100\mu\text{m}$ 間隔の平行平板間に閉じ込めた超流動 ^3He -A 相の MRI 撮像を行い、 \hat{l} の向きが平行平板面垂直向きにそろった複数のドメインと、その境界で \hat{l} と \hat{d} の向きがともに反転するドメインウォールの存在を示した[1][2]。このドメインウォールは、そこで A 相のもつカイラリティが反転するのでカイラルドメインウォールと呼ばれる。Fig. 1.はその MRI 画像で、画像中の筋がドメインウォールで、その間の領域では \hat{l} が紙面手前方向あるいは奥向きの方を向いている。ドメインウォールは \hat{l} と \hat{d} の空間変化に応じて余分なエネルギーを持っているため、その面積ができるだけ小さくなる方向(Fig. 1.の上下方向)に形成されると予想できる。しかし、笠井らの実験では、Fig. 1.のようにドメインウォールがその面積最小の向きから 10° ほど傾いたものが多く観測されていた。

笠井らのセルは超流動循環永久流が発生しうる構造だったため、超流動流によってドメインウォールが傾いていた可能性が考えられた。そこで、今回は循環流が発生しないように改造されたセルを用いて ^3He -A 相の MRI 撮像を行った。そうすると、Fig. 2. のように、ドメインウォールがあまり傾かなかった。これは、これまでのドメインウォールが超流動流の影響で傾いていたことを示唆する。

これまでドメインウォールが傾いているときはFig. 1.のようにいつも隣り合うドメインウォールが逆向きに同じぐらい傾き、ハの字のようになっていた。カイラルドメインウォールのテクスチャーをもとに超流動流の効果を計算すると、超流動流があると隣り合うドメインウォールは互いに逆向きに傾くことが分かった。ドメインウォールが交互に傾くのは、カイラルドメインのカイラリティが交互に反転していることによる。この計算によると、Fig. 1.のようにドメインウォールが 10° ほど傾くにはドメインウォール内で $\sim 0.4\text{mm/s}$ ほどの超流動流が必要なことがわかった。実際には、ドメインウォール中の超流動流も空間構造を持っており、ドメインウォール中では超流動速度が大きくなると考えられる。このことも考慮すると、ドメインウォールが 10° ほど傾いているときセル中の超流動速度自体は $\sim 0.2\text{mm/s}$ ほどと推定できた。この大きさは30循環量子程度にあたり、1循環量子より大きく、また考えられている臨界速度よりは大きくないので、十分流れうる大きさである。

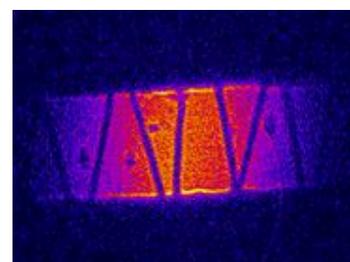


Fig. 1. MRI image of tilted domain wall [3]

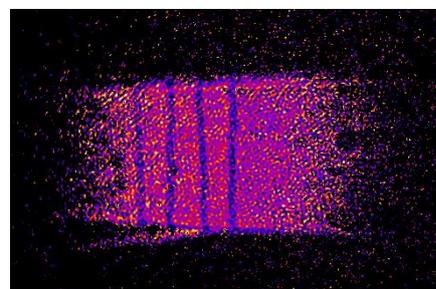


Fig. 2. MRI image of domain wall with no bias flow

References

- [1] J. Kasai, D. Sc. thesis, Department of Physics, Kyoto University (2018).
- [2] J. Kasai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 205301 (2018).
- [3] T. Nishioka, M. Sc. thesis, Department of Physics, Kyoto University (2017).

Kitaev 磁性体 α -RuCl₃ を用いた薄膜デバイスの研究

量子凝縮物性研究室 大湊浩明

Abstract: Motivated by theoretical proposals for detecting non-Abelian anyons by using atomically thin α -RuCl₃ films, we have prepared α -RuCl₃ thin films by the Scotch tape method. We also fabricated field-effect transistor devices to explore topological superconductivity induced by carrier doping into Kitaev spin liquid.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

2006年、A.Kitaevによって二次元ハニカム格子上の量子スピン模型が提案された[1]。この模型は二次元スピン模型であるにも関わらず厳密な基底状態を持つ。その状態はフラストレーションによって極低温まで磁気秩序を示さない量子スピン液体であり、電子スピンの分数化によって遍歴マヨラナ粒子と局在マヨラナ粒子で構成される Z_2 渦と呼ばれる励起が現れる。これらの複合粒子である非可換エニオンはトポロジカル量子計算への応用が期待されており、実験と理論の両面からキタエフ量子スピン液体の精力的な研究が世界的に展開されている。このキタエフ量子スピン液体の候補物質として注目を集めているのがハニカム格子磁性体 α -RuCl₃ である。非可換エニオンの存在を示唆する半整数熱量子ホール効果が観測[2]されたが、非可換エニオンを直接検出した例は未だに報告されていない。

近年、走査型トンネル顕微鏡 (STM) 測定によるマヨラナエッジ流・非可換エニオンの検出および可視化が理論的に提案されている[3][4]。金属基板上のキタエフ磁性体単層膜のトンネルスペクトルを測定することにより、探針直下に存在する非可換エニオンを直接検出できるというものである。一方で、キタエフ磁性体にキャリアドーピングすることでトポロジカル超伝導が発現する可能性も指摘されており[5]、単層膜を用いた電界効果デバイスが有効な手法のひとつである。これらの研究のためには、原子レベルで平坦かつヘテロ接合作製が可能な α -RuCl₃ 単層膜の作製が求められる。

本研究では、スコッチテープ法を用いた薄膜デバイス作製方法の開発を行った。スコッチテープ法とはテープを用いてターゲットの二次元物質を数回剥離し、そのテープを基板に張り付けて剥がすことで基板上に薄膜を得る実験手法である。金属基板上に得た原子層レベルの厚みの α -RuCl₃ 薄膜に対し STM 測定を行ったところ、真空チャンバー内で更に劈開し清浄表面を露出させることで Fig.1 のようなトポグラフ像を得ることに成功した。また、薄膜転写技術を用いることで、Fig.2 に示すような電極としてグラファイト、絶縁層として六方晶窒化ホウ素 (hBN) を用いた電界効果デバイスも作製したので、その結果もあわせて報告する。

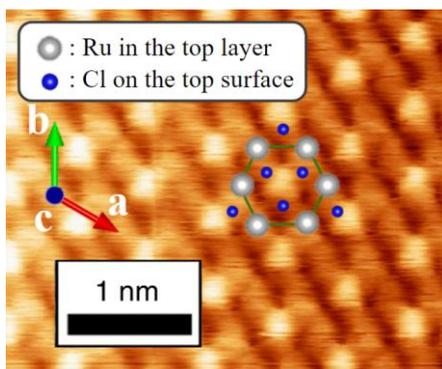


Fig.1 Topography of α -RuCl₃ thin film

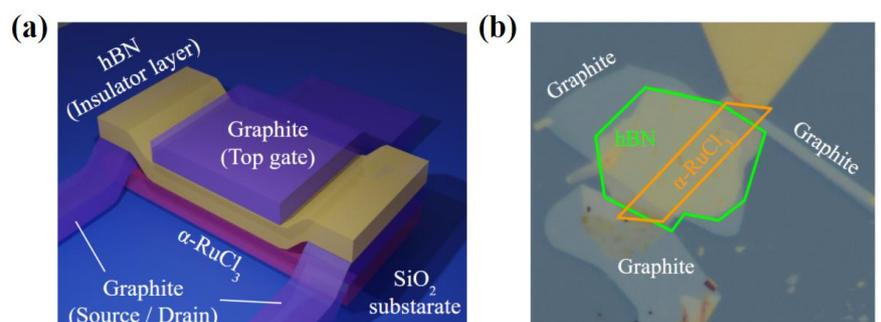


Fig.2 (a) A schematic and (b) an optical image of α -RuCl₃ FET device

References

- [1] A. Kitaev, *Annals of Physics (Amsterdam)* **321**, 2-111 (2006).
- [2] Y. Kasahara *et al.*, *Nature* **559**, 227-231 (2018).
- [3] M. Udagawa, *et al.*, *Physical Review Letters* **126**, 127201 (2021).
- [4] J. Feldmeier, *et al.*, *Physical Review B* **102**, 134423 (2020)
- [5] YZ. You, *et al.*, *Physical Review B* **86**, 085145 (2012).

RuCl₃ 薄膜の相制御と原子パターン形成

量子凝縮物性研究室 小野孝浩

Abstract We have fabricated thin films of RuCl₃, a candidate material of Kitaev spin liquid, and succeeded in growing both α and β phases with atomically flat surfaces by pulsed laser deposition. In β -RuCl₃, we discover that stripe patterns of one-dimensional atomic wires of β -RuCl₃ are formed on a graphite surface.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

量子スピン液体とは、磁性体中の量子スピン系が互いに強く相互作用しているにも拘わらず、強い量子揺らぎの効果によって極低温まで磁気秩序化を示さない状態である。2006年、A. Kitaev によって二次元ハニカム格子において量子スピン液体を実現する理論的なモデル（キタエフモデル）が提案され、大きな注目を集めた[1]。キタエフモデルの特徴は、可解モデルで基底状態が厳密に量子スピン液体と示されるとともに、励起状態においてはフェルミ統計にもボース統計にも従わない非可換エニオンと呼ばれる特異な粒子が現れることである。非可換エニオンはトポロジカル量子計算の基本粒子であることが知られており、キタエフモデルを実現する物質の探索が精力的に行われている。

α -RuCl₃ は強いスピン軌道相互作用によって誘起されたモット絶縁体であり、有効スピン 1/2 を持つ Ru で構成される二次元ハニカム構造を有する。数ある候補物質の中でもキタエフスピン液体の有力候補として精力的な研究が世界中で行われている。我々の研究グループでは α -RuCl₃ において非可換エニオンの存在を示す半整数熱量子ホール効果を観測した[2]。次に重要な課題となるのは非可換エニオンの直接検出であるが、最近、走査型トンネル顕微鏡/分光(STM/STS)による直接検出の可能性が理論的に指摘された[3]。このような測定を絶縁体である α -RuCl₃ について行うためには、試料がトンネル電流を通過できる単層膜である必要があるが、純良な単層膜作製の報告例はほとんどないのが現状であった。

以上の背景のもと、本研究ではパルスレーザー堆積法によって高配向性熱分解グラファイト(HOPG)基板に RuCl₃ 薄膜を作製し、その結晶化条件を調べた。試料の結晶性の評価は X 線回折(XRD) によって行った。基板温度 400 °C、チャンパー内圧力 1.0×10^4 Pa の場合、 α -RuCl₃ の異性体である β -RuCl₃ による XRD パターンが観測された (Fig.1)。さらにチャンパー内に塩素ガスを導入した場合、400 °C、 2.0×10^3 Pa で α -RuCl₃ の明確な回折ピークが現れた。組成分析の結果、 α 相、 β 相ともに Ru, Cl の組成比は単結晶とほぼ同一であり化学的に純良であった。これらの結果より、基板温度と塩素ガス圧力によって相制御が可能であることが明らかとなった。

さらに同条件で超薄膜を作製し、STM 測定を行った。 α -RuCl₃ においては $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ の範囲で平坦な表面が存在しており、表面のハニカム構造を観察することが出来た (Fig.2 (a), (b))。

β -RuCl₃ においては、原子スケールの幅をもつ β -RuCl₃ ワイヤが等間隔に広がった原子パターンを確認した (Fig.2 (c), (d))。観測されたパターンは非平衡散逸系におけるチューリングパターンと酷似しているが、原子スケールでは前例のないものである。

References

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
- [2] Y. Kasahara *et al.*, Nature **559**, 227-231 (2018).
- [3] M. Udagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 127201 (2021).

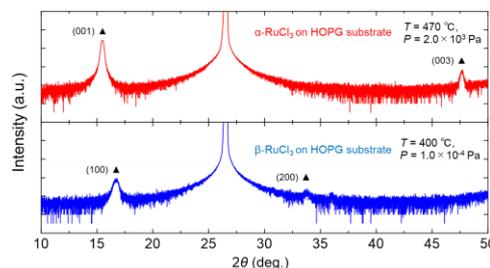


Fig.1 XRD patterns of (top) α - and (bottom) β -RuCl₃ thin films grown on HOPG substrates by PLD.

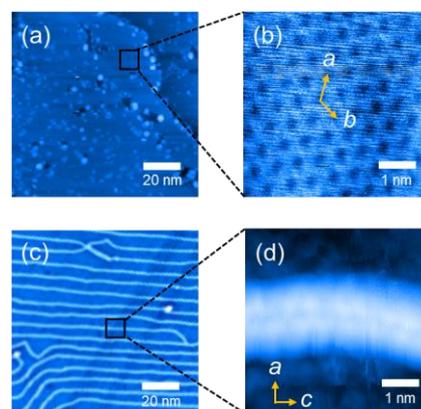


Fig.2 (a), (b) STM topographic image of ultra-thin film of α -RuCl₃. (c), (d) Topographic image of β -RuCl₃ atomic wires.

鉄系超伝導体における量子幾何学

凝縮系理論グループ 北村 泰晟

Abstract While recent studies revealed “*quantum geometry*”, which is key to understanding the geometric properties of Bloch electrons, to appear in various physics, it has a central role in only a few examples. We show “*iron-based superconductors*” to be the quantum geometric materials; two representative properties are characterized by quantum geometry.

自由な周期結晶中の電子は Bloch 電子であり、系の性質は Energy 分散と Bloch 波動関数により決定される。Energy 分散が様々な物理量に現れるのと同様に、多バンド系では Bloch 波動関数も物理量に現れ、その波数空間上での非自明な性質は物質におけるトポロジカル現象として盛んに研究されている。トポロジカル現象の主役を担う Berry 曲率は数学的には量子幾何テンソルの虚部であるが、その実部である量子計量と物理現象との関わりはあまり知られてこなかった。ところが近年、超流動密度[1,2]や多極子[3]など多岐にわたる物理量に量子計量が現れることが明らかにされ、Bloch 波動関数の幾何学的性質と物理現象の関係を探る「**量子幾何学**」として研究が盛り上がりつつある。

量子幾何学が様々な物理量に現れる中で、一つの重要な疑問は「量子幾何学は現実の物質に重要な役割を果たし得るのか」というものである。現在のところ、その例は冷却原子系の光 Lieb 格子[4]や捻り 2 層グラフェン[5,6,7]などと数が少ない上に、これらは全て人工量子系である。人工的な電子構造を持たない自然な物質において量子幾何学が物理現象に影響を与えるかは非自明な問題である。本研究ではこの問いに対して、「**鉄系超伝導体**」という一つの解答を与える。鉄系超伝導体ではその多軌道性が生み出す非自明な電子構造により、量子幾何学は鉄系超伝導体の代表的な 2 つの性質である「**ネマティック相**」と「**超伝導**」にて重要な役割を果たす。

本発表では、(i) 4 回回転対称性の破れたネマティック相の統一的な秩序変数である熱力学的電気四極子を用いた鉄系超伝導体のネマティック相の解析[8]、(ii) 超流動密度を用いた SrTiO₃ 上の単相 FeSe のゼロ抵抗転移温度の解析[9]を示す。これら二つの物理量には量子計量を通して量子幾何学が現れる。本研究で行った解析により、鉄系超伝導体のネマティック相では、量子幾何効果が 4 回回転対称性の破れを特徴づけ、単相 FeSe のゼロ抵抗転移温度は量子幾何効果により 10 K 以上も上昇することが明らかとなる。

References

- [1] S. Peotta and P. Törmä, Nat. Commun. **6**, 8944 (2015)
- [2] L. Liang, *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 024515 (2017).
- [3] A. Daido, *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 235149 (2020).
- [4] A. Julku, *et al.*, Phys.Rev. Lett. **117**, 045303 (2016).
- [5] X. Hu, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 237002 (2019).
- [6] F. Xie, *et al.*, Phys. Rev. Lett **124**, 167002 (2020).
- [7] A. Julku, *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 060505(R) (2020).
- [8] T. Kitamura, *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 245114 (2021).
- [9] T. Kitamura, *et al.*, arXiv:2108.10002 (2021).

空間反転対称性の破れた近藤強磁性体 における非線形応答の研究

凝縮系理論研究室 品田晃希

Abstract We study how the electron correlation effect changes the nonlinear conductivity in the noncentrosymmetric Kondo lattice system. As a result, we find that the nonlinear conductivity reverse its sign due to the heavy electrons' band shifting to fermi energy while changing interaction in the ferromagnetic phase.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年、空間反転対称性の破れた系における非線形伝導現象が盛んに研究されている。非線形伝導現象は例えばダイオード等に用いられる p-n 接合体などが有名で、右向きに流れる電流と左向きに流れる電流で大きさが異なる(整流効果)といったように線形応答では扱えない領域のことをいう。線形応答電流を超える領域の研究は多岐に渡っており、単純に線形応答で扱う外場の摂動の次数を上げるものや絶縁破壊現象や高次高調波発生などの摂動では扱えないような非摂動領域を扱うものもある。本発表では特に摂動の次数を 2 次まで上げた非線形応答を扱う。

2 次の非線形伝導は空間反転対称性を有する系では有限にはならず、空間反転対称性の破れた系 (ISB 系) で特有の現象である。固体中における非線形応答は Rikken らによる研究に始まりオンサーガーの相反定理に基づき電気抵抗に $R = R_0(1 + \gamma BI)$ のように磁場(または磁化)と電流の積が許されることから実際に磁場下での非線形伝導が観測された。その後の研究でも Rashba 相互作用が出るポラー物質やスキルミオン磁性体などのカイラル物質といった ISB 系で幅広く同様の観測結果が報告されている。また波動関数の幾何学的効果も非線形伝導度に現れて、磁場などで時間反転対称性を破らずとも流れる非線形量子ホール効果やバンド間の分極そのものを反映するシフトカレントなどが提案され観測にまで至った[1]。このように ISB 系においていろいろな種類の非線形応答が提案・観測されている一方で、これらの研究は弱相関係での研究にとどまり固体中の現象をさらに華やかにする電子相関の効果を取り入れた研究は始まったばかりである。最近ではワイル近藤物質 $Ce_3Bi_4Pd_3$ において巨大な非線形ホール効果が観測されたのをきっかけに、フェルミ液体において非線形応答は線形応答以上に電子相関のくり込みの効果が大きいことが分かった[2, 3]。

我々はさらに強相関効果が非線形応答に与える影響を調べどだけ豊かな情報を持っているかを探っていくために、第一歩としてよく知られた強相関係である近藤格子系における非線形伝導の解析を行った。Rikken らによる議論と同様にして Rashba 相互作用のある系において強磁性誘起の非線形伝導が出現するため、特に強磁性近藤格子系において DMFT を用いた解析を行った。近藤格子系では磁性相の中でも重い電子バンドを形成する。電子相関の強さを変化させ近藤一重項の状態に近づくにつれ磁性は抑えられ重い電子バンドがフェルミ面に向かってシフトする。その結果フェルミ面付近の構造を大きく変えて (Fig. 1) 非線形伝導度の符号が反転する (Fig. 2)、つまり左右の電流の流れやすさが反転する結果を得た[4]。

References

- [1] Y. Tokura and N. Nagaosa, Nature Communications 9, 3740 (2018).
[2] S. Dzsaber *et al.* PNAS 118, 10.1073 (2021). [3] Y. Michishita and R. Peters, PRB 103, 195133 (2021).
[4] K. Shinada and R. Peters, arxiv:2110.10496 (2021).

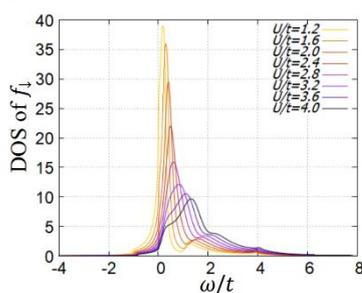


Fig. 1. DOS of f -electrons with down spin for various interaction U at $T/t=0.002$.

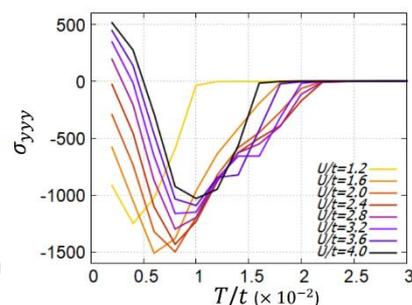


Fig. 2. Nonlinear conductivity for various interaction U and temperature T .

和周波分光を用いた単層遷移金属ダイカルコゲナイド 励起子状態の解明

光物性研究室 高橋伸弥

Abstract Energy levels of s-series and p-series excitons were determined in monolayer MoSe₂ by sum frequency generation spectroscopy and deviated from those numerically calculated by model with Rytova-Keldysh potential and Berry curvatures. Broader linewidth of 2p exciton was found than s-series excitons, which implied dephasing processes only realized in 2p exciton.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

Monolayer transition metal dichalcogenides (1L-TMDs) are atomically thin semiconductors and have attracted much attention as platforms to explore low-dimensional physics. They have direct band gaps at the $\pm K$ points and electronic states near the edges have been modeled as gapped graphene [1]. Optical properties around the band gaps are dominated by excitons, which are Coulomb-bound electron-hole pairs. In conventional semiconductors, energy levels of excitons are well described by a hydrogen model [2]. Meanwhile, in 1L-TMDs, it is well known that excitons have non-hydrogenic level structures. Modified dielectric screening in the thin film has been considered as the main reason and modeled by Rytova-Keldysh potential (RKP) [3]. S-series excitons have been observed in linear spectroscopy and analyzed by RKP model [4]. Recently, it has been pointed out that there should be non-negligible contributions from the Berry curvatures near the band edges that will bring about the deviations from the RKP model for p-series excitons [5,6,7].

In this study, sum frequency generation spectroscopy was performed to confirm the validity of RKP model in 1L-MoSe₂. S-series and p-series excitons were observed clearly as shown in Fig. 1. We found that the obtained exciton levels were deviated from those numerically calculated by the model with RKP [3] and Berry curvature effects [5]. Similar deviations were also confirmed in 1L-WSe₂ [7]. We also found that 2p exciton had a broader linewidth than those of s-series excitons, which implied novel dephasing processes only realized in the 2p exciton state. We will discuss the origins of the deviations in the energy structure and dephasing processes in more details.

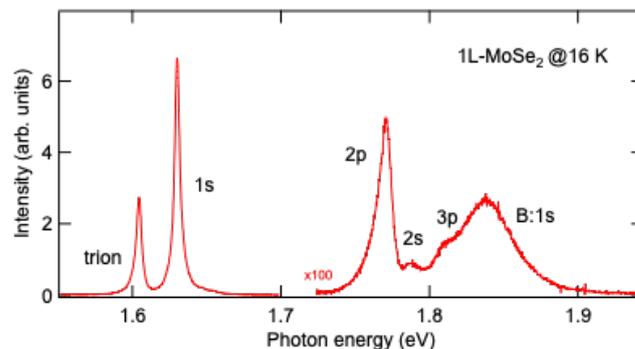


Fig. 1. Nonlinear emission spectrum of 1L-MoSe₂ at 16 K under excitation of broad near-infrared light covering from 0.52 to 1.18 eV.

References

- [1] G.-B. Liu, W.-Y. Shan, Y. Yao, W. Yao, and D. Xiao, Phys. Rev. B **88**, 085433 (2013).
- [2] Y. Toyozawa, *Optical Processes in Solids* (Cambridge University Press, 2003).
- [3] N. S. Rytova, Mosc. Univ. Phys. Bull. **3**, 30 (1967), L. V. Keldysh, JETP Lett. **29**, 658 (1979).
- [4] A. V. Stier *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 057405 (2018), M. Goryca *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4172 (2019).
- [5] Y.-W. Chang, and Y.-C. Chang, arXiv:2107.14474 (2021).
- [6] C.-K. Yong *et al.*, Nat. Mater. **18**, 1065-1070 (2019).
- [7] S. Kusaba *et al.*, Opt. Express **29**, 24629-24645 (2021).

Dirac 線ノード超伝導体 CaSb₂ の 核磁気共鳴/核四重極共鳴による研究

固体量子物性研究室 高橋秀光

Abstract We microscopically examined the normal and superconducting properties of the Dirac line-nodal superconductor CaSb₂ by nuclear quadrupole resonance (NQR) measurements. We revealed conventional metallic normal state and *s*-wave superconductivity of CaSb₂. We are also performing NQR measurements under pressure to investigate unconventional character of the superconductivity in CaSb₂.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年、バルクの電子バンドがトポロジ的に非自明な構造を持つ金属、半金属が盛んに研究されている。そのような物質で超伝導を見出すことはトポロジカル超伝導への確度の高いアプローチであり、現在精力的に物質探索が行われている。

CaSb₂は伝導帯と価電子帯が波数 k 空間で線状に接するDirac線ノード物質であると理論的に提案されている[1]。多くの線ノード物質ではスピン軌道相互作用を考慮すると線ノードは壊れてしまい、トポロジカル絶縁体やDirac/Weyl半金属になってしまう。これに対しCaSb₂では線ノードが結晶の非共面な対称性によって保護されているため、スピン軌道相互作用を考慮しても安定に存在できるという特筆すべき特徴がある。

更にCaSb₂は $T_c = 1.7$ Kで超伝導を示すことが、最近当研究室で発見された[2]。スピン軌道相互作用の下での線ノード物質、かつ超伝導を示す物質の報告例は今までほとんどなく、CaSb₂は線ノード物質における超伝導現象を研究する上で格好の舞台である。

我々はCaSb₂の物性を微視的に調べるため、常伝導および超伝導状態でSb核の核磁気共鳴/核四重極共鳴(NQR)測定を行った。その結果、線ノードに主要な寄与をするSb(1)サイトの信号の観測に成功した。核スピン-格子緩和率($1/T_1$)の温度依存性を測定したところ、常伝導状態では温度に比例する通常の金属的な振る舞い、超伝導状態では T_c 直下のピークおよび低温領域での指数関数的減衰という従来型の*s*波超伝導状態を示す明瞭な結果が得られた[3](Fig. 1)。電子構造の第一原理計算と比較すると、上記の結果は線ノードとは異なるFermi面に由来したものと理解できる。

一方で、圧力をかけていくと超伝導転移温度が3 GPaで2倍に上昇し、ピーク構造を示すということもわかった[4]。これは従来型の超伝導体には無い性質であり、CaSb₂の超伝導は従来型超伝導で理解できない一面を持つ。 T_c のピークの起源も未解明であり、圧力によってトポロジカルな性質が顕在化する可能性もある。そこで、圧力による電子状態の変化を微視的に調べるため、圧力下でのNQR測定も試みている。現在、圧力セルを用いた予備実験にも成功しており、圧力下の実験データも蓄積中である。

References

- [1] K. Funada *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 044711 (2019).
- [2] A. Ikeda *et al.*, Phys. Rev. Materials **4**, 041801(R) (2020).
- [3] H. Takahashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 073702 (2021).
- [4] S. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. B **104**, L060504 (2021).

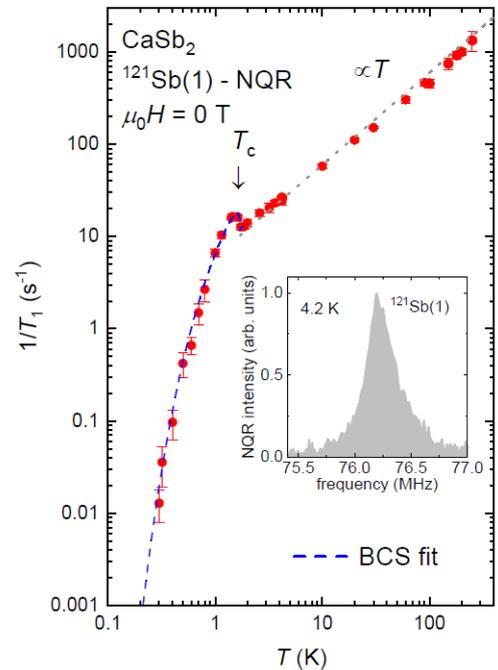


Fig. 1. T dependence of $1/T_1$ of CaSb₂. The gray dotted line and blue dashed curve indicate T -linear behavior and the fitting by the BCS theoretical model, respectively. The inset shows the Sb(1)-NQR spectrum measured at 4.2 K.

非エルミート表皮効果における乱れに関する研究

物性基礎論：凝縮系物理 中井雄介

Abstract We investigate the stability of the non-Hermitian skin effect against disorder. We find that the skin effect persists as long as the energy spectrum under the periodic boundary condition has a winding in the complex energy plane, and only in the region inside the energy winding. We also characterize the skin effect in disordered systems by using topological numbers.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

非エルミート系とは系の有効ハミルトニアンが非エルミートな行列で記述される系のことを指す。例えば、ある種の開放量子系の有効ハミルトニアンは非エルミートになる。非エルミート系は、そのエネルギーが複素数を取り得るなど、エルミート系には無い数学的性質を持ち、そのためエルミート系にはない現象が生じる。とりわけ、近年、非エルミート系特有の現象として、非エルミート表皮効果（以下、表皮効果）と呼ばれる現象[1]が注目を集めている。

表皮効果とは、開放端境界条件（Open Boundary Condition, OBC）下の固有状態が端に局在（端に局在している固有状態=Skin mode）することで、OBC 下のエネルギースペクトルと周期境界条件（Periodic Boundary Condition, PBC）下のエネルギースペクトルが大きく異なるようになる現象のことであり、古典系では電気回路、量子系では量子ウォークなどにおいて観測可能である。更に、表皮効果は点ギャップトポロジーと呼ばれる非エルミート系特有のギャップ構造に起因しているトポロジカルな現象である[2]。

一般にエルミート系におけるトポロジカルな現象は不純物などの乱れによる摂動に対して安定であると言われている。一方非エルミート系におけるトポロジカルな現象の一つである表皮効果は摂動に対してどのような安定性を持つかは明らかではない。更に、表皮効果は一種のエネルギースペクトルに関する現象であるが、非エルミート行列のエネルギースペクトルの摂動に対する振る舞いは、エルミート行列の場合とは異なることが知られている[3]。従って乱れにより表皮効果がどのような振る舞いを示すかを調べることは重要な課題である。

本研究では、対称性を持たない空間一次元系と、非エルミート系特有の対称性である転置型時間反転対称性を持つ空間 1 次元系において、行列の数値対角化による数値計算[4]とグリーン関数を用いた厳密計算の両面から乱れに対する表皮効果の安定性を調べた。その結果、両方の系において以下の結果を得た。1つ目は、点ギャップが閉じる程度大きさの乱れを加えない限り表皮効果は Skin mode は存在し続けること（Fig.1）。2つ目は、Skin mode は PBC スペクトルが巻き付きを持つエネルギー領域においてのみ存在し、巻き付きを持たないエネルギー領域では Skin mode は存在せず、固有状態はバルクにおいてアンダーソン局在を起こしていることである（Fig.2）。これらの結果は非エルミート系のトポロジカルな現象である表皮効果は、乱れに対してエルミート系の場合と同様の安定性を持つことを示している。更に以上を踏まえた上で、これらの特徴づけるトポロジカル数の計算方法を 2 通りの方法で示した。1つ目はひねり位相と呼ばれるパラメーターを導入することで新たなトポロジカル数の構築を行い、これを用いることで特徴づけを行う方法[5]。2つ目の方法は厳密計算により導出される有効ハミルトニアンを用いて特徴づけを行う方法である。

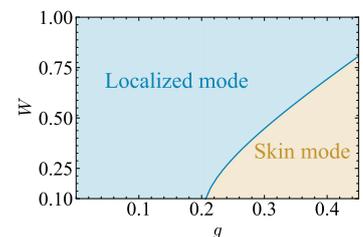


Fig. 1. Phase diagram for skin effect against disorder in transposed time-reversal symmetry systems.

g represents the strength of Non-hermicity and W represents the strength of disorder with Cauchy distribution.

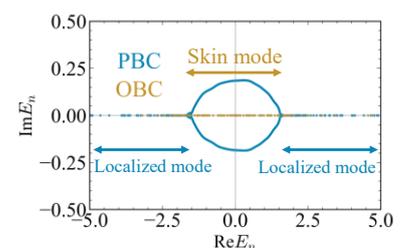


Fig. 2. Skin mode exists only in the energy region where PBC spectra have winding and not in the energy region where PBC spectra do not have winding.

References

- [1] S. Yao and Z. Wang, Phys. Rev. Lett., **121**, 086803 (2018).
- [2] N. Okuma, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).
- [3] N. Okuma and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 097701 (2019).
- [4] Y. Nakai, *et al.*, 日本物理学会春季大会, PSD-13. (2021)
- [5] Y. Nakai, *et al.*, EP2DS-24/MSS-20, E-PS-1-21 (2021)

パウリ常磁性の強い系における 高磁場渦糸状態と超伝導揺らぎの理論

凝縮系理論グループ 中島大

Abstract Motivated by recent experiments in FeSe, we study superconducting vortex states with strong Pauli paramagnetism and examine fluctuation effects on the FFLO vortex states. Possible FFLO states in FeSe in $H // c$ and $H // ab$ are discussed based on our study on the vortex lattice melting line.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

磁場下の超伝導は多様な姿を示す。近年注目されている層状鉄系超伝導体 FeSe では、層に平行な磁場下と層に垂直な磁場下の両方の場合で、Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 相と思われる新奇超伝導相の存在が見出されている [1, 2]。しかし、FeSe は強い超伝導揺らぎを同時に示すため、パウリ常磁性の強い超伝導体における渦格子融解という新たな超伝導理論を作る必要がある。また、FeSe は 2 バンド系であり、多バンド系で可能な FFLO 状態の考察も必要となる。

今回、これらの問題の解明を進めるために、まず 2 バンド系で FFLO 変調が磁場方向に起こっていると仮定し、その下で可能な FFLO 相を調べた。FeSe での熱伝導測定の結果から、この仮定は層に垂直磁場 $H // c$ 下の FeSe [2] に当てはまる。この問題への暫定的な調査は過去に足立ら [3] が行っているが、今回この問題をさらに詳細に調べた。実験 [2] では、 $H // c$ 超伝導相の試料表面で超伝導ギャップが消失していることから、これが Larkin-Ovchinnikov (LO) 状態に特有の面ノードであり、従って LO 状態がバルクでも実現している証拠であると主張された。しかし今回、FeSe の、不連続転移の様相を示さない $Hc_2(T)$ 線の特徴と無矛盾な $H // c$ 下の FFLO 相はヘリカル位相変調を表わす Fulde-Ferrell (FF) 相しかないことを理論的に示した。

一方で、大きな Ginzburg-Levanyuk (G_i) 数を有する FeSe では、超伝導揺らぎが生成する渦液体状態が十分広い温度領域で現れる。Hardy ら [4] は、彼らの比熱の実験データから得られた $H // ab$ での渦液体領域の有限温度での消失が、安立らが以前に提案した可能性 [5] とコンシステントであると解釈した。そこで今回、渦格子融解線を自由エネルギーの計算から直接決める氷上らの方法 [6] をパウリ常磁性のある場合に拡張して求めた。その結果、渦液体領域の消失は、右の Fig. 1, 2 の差異が示すように Hc_2 での平均場近似転移がパウリ常磁性により不連続転移になる低温度域 (Fig. 2 における $T < 0.4T_{c0}$) に限られることがわかった。 $H // ab$ での FeSe の Hc_2 転移は連続転移の様相であることから、この結果は $H // ab$ の FeSe では磁場方向に変調する FFLO 相は起きておらず、その高磁場低温相は高次 ($N=1$) ランダウ準位渦格子 [5] であることを示唆する。実際、最近行っている揺らぎ伝導度の計算と抵抗データ [1] の整合性もこの解釈を支持する。

References

- [1] S. Kasahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 107001 (2020).
- [2] S. Kasahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 257001 (2021).
- [3] 足立景亮 修士論文 (2016, 1月)。
- [4] F. Hardy *et al.*, Phys. Rev. Research **2**, 033319 (2020).
- [5] H. Adachi and R. Ikeda, Phys. Rev. B **68**, 184510 (2003).
- [6] S. Hikami *et al.*, Phys. Rev. B **44**, 10400 (1991).

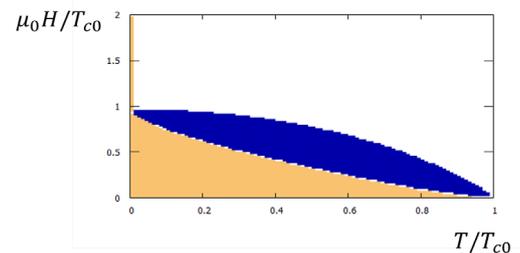


Fig. 1. H - T phase diagram with a second order Hc_2 . Blue and light orange regions represent the vortex liquid region and the vortex lattice phase, respectively.

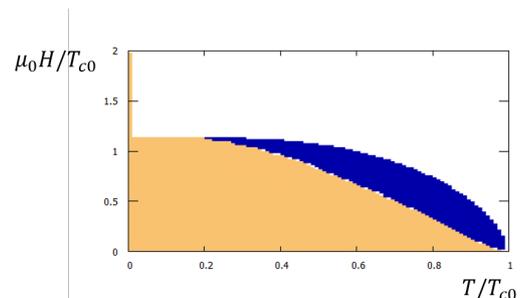


Fig. 2. H - T phase diagram with a first order Hc_2 .

外力駆動下でガラス的振る舞いを示す格子模型

非線形動力学研究室 布谷幹太

Abstract Toward understanding of a replica-symmetry breaking at non-equilibrium steady states, we study the driven Biroli-Mézard model on a special random lattice, where the model on a regular random graph exhibits a replica-symmetry breaking at equilibrium. We observe that the particle current obeys the Vogel-Fulcher law as a function of density.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

平衡状態におけるガラス転移は、1段階レプリカ対称性の破れで特徴づけられると予想されている。このガラス転移は実験では決して到達できないと考えられており、観測される現象との関係は議論が続いている[1]。また、近年では、平衡状態における熱力学転移が平衡近くの非平衡定常状態でも質的に変わる現象が注目されている[2]。そこで、本研究では、レプリカ対称性の破れの非平衡性による影響を明らかにすることを目指す。

具体的に、Biroli と Mézard によって提案された格子模型[3]を考える。レギュラーランダムグラフ上で定義されたこの模型は1段階レプリカ対称性の破れを示すことが知られている[4]。この模型に非平衡性を持ち込むために、レギュラーランダムグラフの構造を保ちつつ粒子が流れうる格子[5]を用いる。まず、平衡状態で、ベータ方程式により求まる状態方程式とシミュレーテッドアニーリング法で計算される状態方程式は低密度領域で一致するが、エントロピー危機が生じる密度には到達できないことを確認する。これは平衡状態のガラス転移に実験では到達できないことに対応している。これは平衡状態のガラス転移に実験では到達できないことに対応している。

次に空間的に一様な外力を加える場合、密度が十分小さいと粒子は流れるが、ある密度以上で粒子は流れなくなる。様々な密度 ρ に対して流速 j を測定すると、ガラス系でしばしば観測されている Vogel-Fulcher 則

$$j \propto \exp[-a/(\rho_c - \rho)^b]$$

が成り立っていることが分かる。(Fig.1 を参照。)

ここで、 ρ_c, a, b はフィッティングパラメータであり、それぞれ $\rho_c = 0.64, a=2.9, b=0.32$ と推定される。この結果は非平衡定常状態におけるレプリカ対称性の破れを調べるための第一歩である。

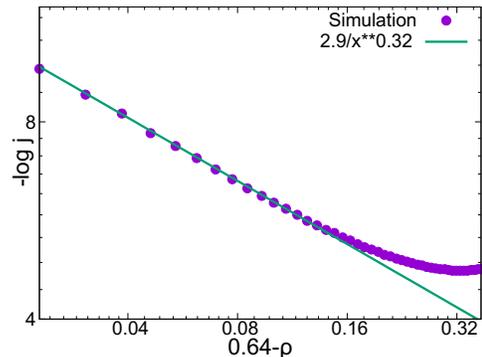


Fig. 1 Density dependence of current.

References

- [1] G. Biroli, J. P. Bouchaud. “The random first-order transition theory of glasses: a critical assessment.” *Structural Glasses and Supercooled Liquids: Theory, Experiment, and Applications*. 31-113 (2012).
- [2] H. Nakano, Y. Minami and S. -i. Sasa, Phys. Rev. Lett. **126**, 160604 (2021).
- [3] G. Biroli and M. Mézard, Phys. Rev. Lett. **88**, 025501 (2001).
- [4] O. Rivoire, G. Biroli, O. C. Martin and M. Mézard, Eur. Phys. J. B **37**, 55-78 (2004).
- [5] H. Ohta, M. L. Rosinberg and G. Tarjus, Europhy. Lett. **104**, 16003 (2013).

リオトロピックネマティック液晶とコロイド粒子間の動的結合

ソフトマター物理学研究室 花田康佑

Abstract Dynamic coupling effects between translational Brownian motion of colloidal particles and orientation fluctuation of nematic liquid crystal were studied in the complex system of lyotropic nematic liquid crystal and colloidal particles in SDS/DTAB/water system. Critical slowing down near N-I transition is affected by the dynamic coupling effect.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

SDS(sodium dodecyl sulfate)/DTAB(dodecyl trimethyl ammonium bromide)を水に溶解した系は、低濃度でネマティック相を呈するリオトロピック液晶(LLC)である[1]。リオトロピックスメクティック液晶(LSLC)においては、ゲスト試料であるコロイド粒子を添加することで、LSLCの揺らぎとコロイド粒子の運動間の動的結合が、層間相互作用に寄与することが先行研究により見出されている[2]。本研究の目的は、リオトロピックネマティック液晶(LNLC)にゲスト試料であるコロイド粒子を添加し、ミセルの並進ブラウン運動とLNLCの配向ゆらぎを、ネマティック(N)-等方(I)相転移点付近において独立に測定することで、コロイド粒子のブラウン運動がLNLCの揺らぎに与える動的効果を理解することである。

試料としてSDS/DTAB混合水溶液系のLNLCに、直径20nmシリカコロイド水溶液を添加した混合系を用いた。SDSとDTABのモル混合比 α は、ミセルの表面電荷の中和度と関係し、 $\alpha=2.7\sim 2.85(=SDS/DTAB)$ の間で変化させた。シリカコロイド濃度は $\phi_{col}=0\sim 0.5wt\%$ 、界面活性剤濃度 ϕ はシリカコロイドの濃度に関わらず、 $\phi=9.0wt\%$ を保つように試料を作成した。ミセルのブラウン運動とLNLCの配向揺らぎは、動的散乱法(DLS)を用い、レーザーの偏光方向に対して偏光板配置を平行(VV)および垂直(VH)にして、それぞれ独立に緩和時間を測定した。

Fig. 1は、コロイド混合系のN-I相転移点付近の温度におけるVV散乱の自己相関関数の温度依存性である。液晶ミセルによる単一の緩和のみが観測され、コロイドの緩和は確認できない。このことは、コロイドは一定の粒子サイズのため緩和時間に温度依存性が無いのに対して、Fig. 1は液晶ミセルに特徴的な相転移に伴う緩和時間の変化が見られることからわかる。一方でFig. 2はN-I相転移点付近の温度における、VH散乱で得られた緩和周波数の温度依存性である。純粋なLNLC(●)とコロイド混合系(●)を比較すると、N-I相転移の臨界現象に関わる緩和周波数の増大($\omega \sim A(T-T^*)$)の傾き A が異なり、コロイドを混合することで A が小さくなることが確認された。純粋なLNLCにおいては A の値は、SDS/DTAB混合比 α に強く依存し、 α の増加に伴って棒状ミセルの異方性が低下、臨界異常性が増大して A は小さくなる。すなわち、シリカコロイドの並進ブラウン運動が、ミセルの球-棒転移に動的に結合し、棒状ミセルの成長を阻害していることが示唆される。

References

- [1] 山本潤ほか, “超膨潤リオトロピックネマティック相の等方相-ネマティック2次相転移,” 2014年日本液晶学会討論会講演予稿集, 2014
- [2] J. Yamamoto and H. TANAKA. Dynamic control of the photonic smectic order of membranes, Nature Materials, 4, 75 (2005)

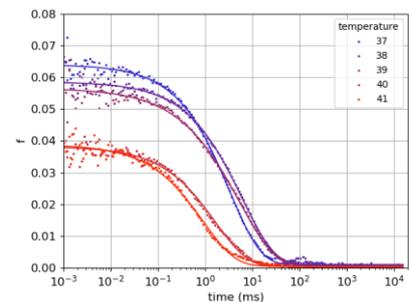


Fig. 1. Correlation function of silica colloid mixture ($\alpha=2.7$, $\phi_{col}=0.5wt\%$) in VV measurement. Only a single relaxation by the liquid crystal micelles is observed.

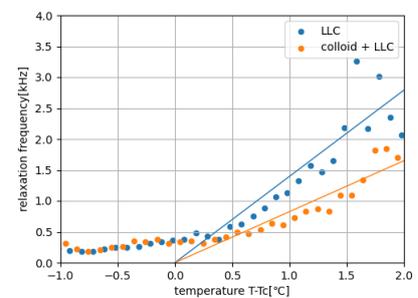


Fig. 2. Temperature dependence of the relaxation frequency of lyotropic liquid crystals and silica colloid mixture in VH measurement. The slope at $T>T_c$ is smaller for the silica colloid mixture.

コロイドの不可逆凝集によるネットワーク構造とその形成ダイナミクス

相転移動力学研究室 平田光一

Abstract Using reduced network scheme, we analyze the chain structure and dynamic property of two-types of irreversibly aggregated colloid gels, i.e. MD-DLCA and S models. In the former, the distance between bonding points is constrained. The chains tend to be straight in S model, while they are not in MD-DLCA model.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

コロイドは、塗料やセラミック、食料品など多くの身の回りの材料に存在しており、そのレオロジー的特性を理解することは極めて重要である。コロイドの系は相互作用や体積分率に対して様々な状態を呈するが、本研究の対象である「コロイドゲル」とは、コロイド粒子が化学反応や引力相互作用によって凝集し、自己組織化したものである。その構造はネットワーク状であり、自分自身を力学的に支えることができるようになるため、弾性的な応答を示す。

コロイドゲルの弾性的特性を理解するためには、その構造との関係を具に調べなければならない。構造はネットワーク構造であるため、直感的には、鎖とその連結で構成されている。高分子を架橋することで形成されるゲルでは部分鎖と架橋点の存在が自明であるが、粒子の凝集構造に対しては、構造を鎖に分割する処方箋は未だ存在していないのが現状である。

本研究では、不可逆凝集で得られる低密度(体積分率 10%以下)コロイドゲルに対し、Reduced Network[1]の構築を通して鎖の構造を定めた。また、そのようにして定めた鎖構造の性質と形成ダイナミクスについて調べた。Reduced Networkとは、ネットワークの繋がりにとって不必要な粒子を最大限削減したものであり、ゲル構造の骨格を際立たせたものといえる。また、ゲル構造を得るための凝集のルールとして、粒子の接着後に表面上の接着点を拘束するもの(MD-DLCA model)とそうでないもの(S model)の2種類(Fig. 1)を用いることで、不可逆凝集の範囲内ではあるが、拡散による効果とクラスターの変形による効果を比較できるようにした。

構造に関しては、主に3つのことが分かった。(i)いずれのモデルでも鎖の数密度は体積分率に対し冪的に増加する。(ii)骨格における鎖の構成粒子数(ステップ長)は、指数分布に従う。(iii)Sモデルでは鎖の末端間距離も指数分布に従い、したがって鎖は直線的に伸びている。

ダイナミクスに関しても、主に3つのことが分かった。(i)凝集初期ではモデルによらず拡散が支配して鎖構造が発達する。(ii)小さいクラスターができた段階で、Sモデルではクラスターの変形に伴う鎖構造の消失が起きる。一方でMD-DLCAモデルではそのようなことは起きない。(iii)いずれのモデルでも、凝集の後期では鎖の平均的なステップ長が減少する振る舞いが見られ、その時間領域におけるステップ長の時間相関関数は指数的に減衰する。



Fig. 1. Snapshots of two type colloidal gels (volume fraction = 6%). Left: MD-DLCA model. Right: S model. Coloring depends on the number of adjacent particles(N). N=1 is cyan, N=2 is yellow and $N \geq 3$ is purple.

References

[1] M. Gimperlin and M. Schmiedeberg, *J. Chem. Phys.* **154**, 244903(2021).

古典通信のみ用いた Certified Deletion 付き公開鍵暗号

物性基礎論：量子情報研究室 廣岡大河

Abstract Certified Deletion security guarantees that a sender can check whether a receiver deletes a quantum ciphertext correctly or not. In previous results, both sender and receiver need quantum operations to achieve Certified Deletion security. We show that Certified Deletion security is possible even if a sender cannot perform quantum operations.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

Broadbent と Islam は Certified Deletion と呼ばれる新しい安全性を持った量子暗号プリミティブを構成した[1]。彼らが新たに導入した Certified Deletion 安全性の定義を一言で説明すると、量子暗号文を所有している受信者が量子暗号文を正しく消去したかどうかを確認できる機能である。より厳密に言うと、Certified Deletion 安全性を持った暗号プリミティブにおいて、量子暗号文を所有している受信者は、量子暗号文を消去したことを証明する証明書を発行することができる。証明書が有効な場合には、証明書を発行して以降に量子暗号文の復号鍵が受信者に漏洩したとしても、受信者は平文に関する情報を得ることができない。この安全性は送信者と受信者が古典的な情報処理しか行えない場合には、達成できない安全性である。なぜなら、暗号文が古典のビット列である場合、悪意のある受信者は暗号文を複製することができるため、受信者が暗号文を完全に消去したかどうかを確認する方法が存在しないためである。一方で、暗号文が量子状態の場合、量子複製不可能性定理から悪意のある受信者であっても量子暗号文を複製することが出来ないため、暗号文が古典のビット列である場合の不可能性を回避することができる。このように、Certified Deletion 安全性は古典的な情報処理のみでは達成できなかった安全性を、量子性を用いることで達成できる新しい例である。

従来の結果では、Certified Deletion 安全性を満たす暗号機能はワンタイム秘密鍵暗号のみに限られている。ワンタイム秘密鍵暗号は応用に乏しい暗号機能である。そのため、他の暗号機能に Certified Deletion 安全性を拡張することは重要である。また、従来の結果では Certified Deletion 安全性を達成するには送信者と受信者の両方が量子操作を行う必要がある。応用を考えた場合、送信者と受信者の両方が古典的な情報処理のみで Certified Deletion 安全性を達成できることが重要である。その一方で、上述したように Certified Deletion 安全性は量子性を用いることで初めて達成できる安全性であるため、送信者と受信者に必要な量子操作をどこまで取り除くことができるのかは非自明な問題である。

本研究では、**Certified Deletion 安全性を満たす公開鍵暗号の構成方法を示す**[2]。本研究の構成方法において**送信者は古典的な情報処理のみを行うことで Certified Deletion 安全性を達成することができる**。本研究の構成方法では noisy trapdoor claw-free (NTCF) 関数[3]と injective trapdoor 関数[4]と IND-CPA 安全性を満たす公開鍵暗号を用いる。NTCF 関数と injective trapdoor 関数はある暗号学的性質を持った関数で Learning with errors 問題が量子多項式時間で解けないという計算量的仮定 (LWE 仮定) から構成できることが知られている。我々は本研究での構成方法の安全性を示すために、NTCF 関数と injective trapdoor 関数に対して成り立つ、cut-and-choose adaptive hardcore property という新しい暗号学的性質を導入し、この性質が NTCF 関数の adaptive hardcore bit property と injective invariance に帰着できることを示す。本研究で新たに導入する cut-and-choose adaptive hardcore property はそれ単体で有用で、古典通信のみ用いた Certified Deletion 付き公開鍵暗号以外にも様々な量子暗号プロトコルの構築への応用が期待される。

References

- [1] A. Broadbent and R. Islam, TCC2020 pp.92-122.
- [2] **T. Hiroka**, T. Morimae, R. Nishimaki and T. Yamakawa, Asiacrypt2021 pp.606-636.
- [3] Z. Brakerski, P. Christiano, U. Mahadev, U. V. Vazirani, and T. Vidick, FOCS2018 pp. 320-331.
- [4] U. Mahadev, FOCS2018 pp.259-267.

フラストレーションを内在する希土類化合物 の低温磁気状態の研究

固体量子物性研究室 堀文哉

Abstract We have performed $^{63/65}\text{Cu}$ -nuclear quadrupole resonance measurements on a magnetic frustrated compound YbCuS_2 , in which Yb atoms form zigzag chains. We revealed the antiferromagnetic ordering at $T_0 = 0.95$ K and the presence of novel gapless spin excitation below 0.5 K in YbCuS_2 .

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

幾何学的にフラストレートした結晶構造や低次元構造をもつ量子スピン系では、強い量子揺らぎにより長距離秩序が抑制され、新奇な基底状態が出現する。フラストレート磁性の研究は、これまで d 電子系の遷移金属化合物においてなされてきたが、近年、 $4f$ 電子系の希土類化合物においても盛んに研究されるようになった。希土類化合物では、強いスピン軌道相互作用や結晶場効果、伝導電子との近藤効果などの多彩な相互作用により、従来の遷移金属化合物には見られなかった新奇な状態が期待できる。我々はフラストレーションを内在する希土類化合物の基底状態を微視的に明らかにするために、いくつかの候補物質に対して核磁気共鳴 (NMR) /核四重極共鳴 (NQR) 測定を低温まで行った。

研究を行った1つの物質 YbCuS_2 は、Fig.1のように希土類であるYbがジグザグ鎖を形成しており[1]、フラストレーションの効果が期待できる磁性半導体である。ゼロ磁場において、 $T_0 = 0.95$ Kで相転移を示唆する比熱のピークは報告されたが[2, 3]、この相転移の詳細については明らかになっていなかった。

我々は低温磁気状態を調べるために、 YbCuS_2 の多結晶試料を用いて $^{63/65}\text{Cu}$ -NMR/NQR測定を行った。 $T \geq T_0$ において、シャープなNQR信号を観測した。 $T_0 > T$ では内部磁場により信号が分裂するが、 $T_0 > T > 0.85$ Kの温度範囲で常磁性相と秩序相の信号が共存することを見出した。この結果は、 T_0 の相転移が一次の反強磁性転移であることを示唆する。ただしスペクトルの分裂から磁気秩序モーメントは $0.1 \mu_B$ 程度の小さなものと考えられる。

さらに、スピンゆらぎの情報を得るために核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ の測定を行った。Fig. 2に示すように、 $1/T_1$ は $T \geq T_0$ で臨界ゆらぎを示さず、 T_0 以下で急激に減少する。その後0.5 K-0.08 Kの広い温度領域で $1/T_1 \sim T$ の振舞いが観測された。この振舞いは通常金属で観測されるものであり、 YbCuS_2 が半導体であることと対照的な結果である。さらに興味深いことに、 YbCuS_2 の低温の $1/T_1$ の値はCu金属の値に比べて1桁以上も大きい。我々は、Ybジグザグ鎖半導体 YbCuS_2 の反強磁性秩序相において、ギャップレスな磁気励起の存在を見出した[4]。

References

- [1] L. D. Gulay and I. D. Olekseyuk, J. Alloys Compd. **402**, 89 (2005).
- [2] Y. Ohmagari *et al.*, JPS Conf. Proc. **30**, 011167 (2020).
- [3] Y. Ohmagari *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 093701 (2020).
- [4] F. Hori *et al.*, submitted to Phys. Rev. Lett.

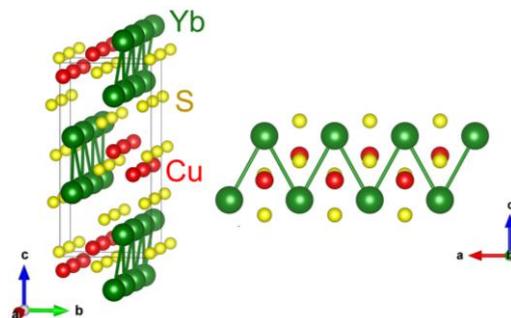


Fig. 1. Crystal structure of YbCuS_2 with Yb zigzag chain along the a -axis.

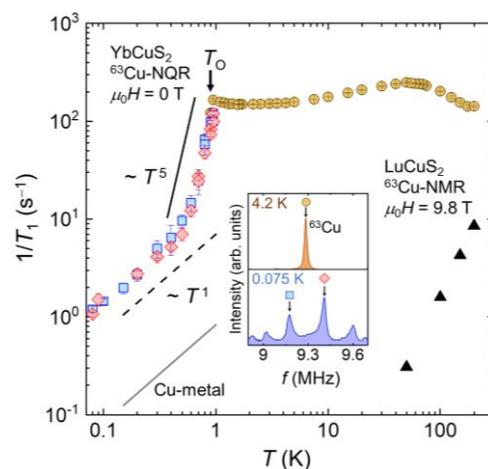


Fig. 2. Temperature dependence of $1/T_1$ of YbCuS_2 and a reference compound LuCuS_2 [4]. $1/T_1$ of Cu metal is shown by the solid line. The inset shows the ^{63}Cu -NQR spectrum above and below $T_0 = 0.95$ K.

キタエフ磁性体 α -RuCl₃における Planar 熱量子ホール効果

量子凝縮物性研究室 横井太一

Abstract We have performed thermal Hall measurements on the Kitaev candidate material α -RuCl₃. We observed quantized thermal Hall conductance even in a planar Hall geometry, providing evidence for the presence of chiral Majorana edge modes. These results demonstrate non-Abelian topological order persisting even in the presence of non-Kitaev interactions in α -RuCl₃.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

2006年にKitaevにより提案された二次元蜂の巣格子におけるスピン1/2モデルでは、厳密解を持つ量子スピン液体状態が実現する[1]。このスピン液体状態では、電子スピンの分数化によってマヨラナ粒子や非可換エニオンが素励起として生じる。このキタエフスピン液体の候補物質 α -RuCl₃において傾斜磁場下で熱ホール伝導率を測定した結果、熱ホール伝導度が磁場や温度によらないプラトーを示し、その値が電子系の量子ホール状態で観測される値の半分の値に量子化される、半整数熱量子ホール効果が観測された[2]。このことは、磁場中の α -RuCl₃においてカイラルマヨラナエッジ流およびバルクに非可換エニオンが存在することの強力な証拠である。

α -RuCl₃において観測されたこの量子化現象の起源を明らかにするために、我々は面内磁場を含む様々な角度の磁場下において熱ホール伝導率を測定した[3]。その結果、Fig1. aのように面直成分を持たない a 軸方向の面内磁場下においても有限の熱ホール伝導率が観測された。さらに高磁場でプラトーが観測され半整数量子化値に量子化することを観測した。一方、 b 軸方向の磁場下では熱ホール伝導度はほぼゼロであるが、これは蜂の巣格子の対称性によるものである。また、Fig1. bに示すように $\pm 60^\circ$ の傾斜磁場、すなわち面直磁場成分は変わらずに面内磁場方向が反転することで、熱ホール伝導度が符号反転を示した。キタエフスピン液体状態においては、Fig1. cに示したように従来のランダウ量子化による量子ホール効果とは異なる特徴的なチャーン数 C_h の磁場角度依存性を示す。今回観測された結果は、純粋なキタエフスピン液体状態において期待される C_h の磁場角度依存性に整合するものであった。二次元電子系のランダウ量子化による量子化現象では磁場の面直成分によってチャーン数が定義されるため、今回の a 軸方向の磁場下で観測されたPlanar熱量子ホール効果を説明することが出来ない。

Planarホール効果とその量子化、符号反転すべてを説明するのは、現在のところキタエフスピン液体の他にない。キタエフスピン液体状態におけるトポロジカル秩序が現実物質中で非キタエフ相互作用の影響下にあっても保たれていることを示しており、非可換エニオンの存在を示唆している。

References

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
- [2] Y. Kasahara *et al.*, Nature **559**, 227–231 (2018).
- [3] T. Yokoi *et al.*, Science **373**, 568–572 (2021).

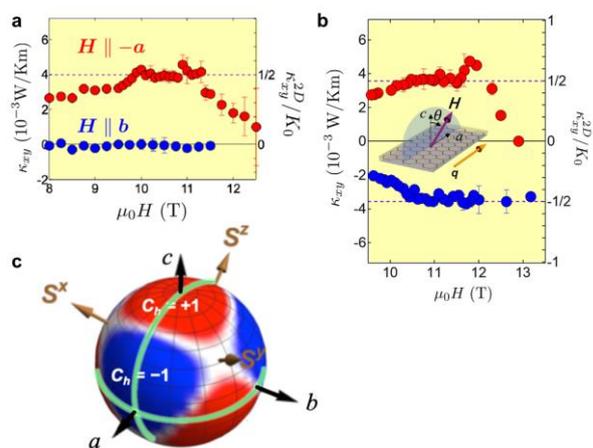


Fig. 1. *a*: Field dependence of thermal Hall conductivity for $H \parallel -a$ (red) and $H \parallel b$ (blue) at para-magnetic phase. *b*: Field dependence of thermal Hall conductivity for $\theta = \pm 60^\circ$. *c*: Field-angular variation of Chern number C_h in pure Kitaev model.

非エルミートキタエフ鎖における基底状態の縮退の安定性

物性基礎論：凝縮系物理 岡 大翔

Abstract Today, non-Hermitian systems is a hot topic. I studied about the robustness of twofold-degenerate ground states in Kitaev chain with non-Hermiticity and electron-electron interactions. I showed the robustness for the model with general parameters using perturbation theory, and with restricted parameters not using perturbation theory.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年、エルミート性を持たない、非エルミートの有効ハミルトニアンによって系を記述する非エルミート系が注目を集めている。一般に、外部との相互作用が全く存在しない孤立系に関してはハミルトニアンのエルミート性が原理的に仮定されている。しかし、着目している系（着目系）とその外部との相互作用が弱く存在しているとき、着目系の時間発展が有効的に非エルミートハミルトニアンで記述できる場合があることが知られている[1]。

また、それとは別にトポロジカル超伝導体に現れるマヨラナゼロモードも量子コンピュータへの応用可能性から近年、精力的に研究されている。一次元トポロジカル超伝導体の基底状態は系の両端に存在するマヨラナゼロモードに由来して二重に縮退しており、その二状態の重ね合わせ状態を qubit として用いる応用が考えられている。この縮退はマヨラナゼロモードの性質から局所的な摂動に対して安定であることが知られている。さらに、この縮退は近距離の電子間相互作用を加えた場合も、安定であることが摂動論や数値計算から示されている[2][3]。また、上記の非エルミート系と組み合わせて、非エルミートに拡張したトポロジカル超伝導体についても数多くの研究がなされており、たとえば、先行研究[4]では電子間相互作用のない、非エルミートトポロジカル超伝導体については、エルミートの場合と同様、マヨラナゼロモードに由来する縮退は安定であることが示されている。

そこで本研究では、1次元トポロジカル超伝導体の最もシンプルなモデルである Kitaev chain[5]について、非エルミート性と近距離の電子間相互作用をともに加えたときの縮退の安定性を議論した。具体的な研究成果として[2]などの研究を非エルミート Kitaev chain に拡張して、摂動的に電子間相互作用を加えた場合に縮退が安定であることを示した。また非エルミート性、電子間相互作用がともにある場合でも考えているモデルのパラメータに対して、ある制限を課す場合には非摂動的な議論で縮退が安定であることを示した。

References

- [1] Gulácsi, Balázs, and Balázs Dóra. "Defect production due to time-dependent coupling to environment in the Lindblad equation." *Physical Review B* 103.20 (2021): 205153.
- [2] Kells, G. "Many-body Majorana operators and the equivalence of parity sectors." *Physical Review B* 92.8 (2015): 081401.
- [3] Hassler, Fabian, and Dirk Schuricht. "Strongly interacting Majorana modes in an array of Josephson junctions." *New Journal of Physics* 14.12 (2012): 125018.
- [4] Lieu, Simon. "Non-Hermitian Majorana modes protect degenerate steady states." *Physical Review B* 100.8 (2019): 085110.
- [5] Kitaev, A. Yu. "Unpaired Majorana fermions in quantum wires." *Physics-uspekhi* 44.10S (2001): 131.

繊毛虫集団の実験測定に基づく 界面付近の運動に関する確率論モデル

流体物理学研究室 奥山紘平

Abstract We experimentally measured the spatio-temporal cell distribution of ciliates, *T. pyriformis*, in water by utilizing an image processing. The distributions showing their accumulation on both air-water and solid-water interfaces were successfully described with a diffusion model. We also proposed a stochastic model for their two-dimensional motions on interfaces.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

繊毛虫テトラヒメナ (*Tetrahymena pyriformis*, Fig.1) は淡水域に生息する単細胞真核生物であり、体表に無数に生えた繊毛を振り動かすことによって水中を遊泳する。流体力学的には、一様な推力で遊泳する回転楕円体のマイクロスイマーとみなし、数値シミュレーションすることが可能である [1]。また、自然界におけるテトラヒメナは、栄養分が集積する固体壁 (湖沼の底や水草の表面など) を好む習性がある。この性質は繊毛の壁に対する機械的応答と細胞の形状を流体力学的に考察することで物理学の視点で理解されてきた [2–3]。このように細胞単独での遊泳については明らかになってきたが、上記の性質を持った個体の運動から集団的な挙動を理解するのは難しい。

本研究ではまず、上下を気液界面と固液界面に囲まれたテトラヒメナ懸濁液の観察実験を行い、3次元的な顕微鏡画像を撮影した。そして、機械学習を用いたソフトウェアと適切な画像処理を組み合わせることによって、各画像において焦点面内に存在する個体のみを正確に検出することに成功した。この手法により、水中を泳ぐテトラヒメナ集団の鉛直方向の個体数分布が得られ (Fig.2)、繊毛虫が気液界面や固液界面に集積するという先行研究における結果が集団としても定量的に確かめられた。さらに、境界の性質を考慮した簡単な拡散方程式モデルによって水中の個体数分布を再現できることを示した [4]。

テトラヒメナは集団として界面に集積することが明らかになったので、次に我々は界面上に滞留する個体の2次元面内の運動を観察した。撮影した動画に同様の画像解析手法を適用し、遊泳するテトラヒメナを検出・追跡することによって個体の位置の時系列データを取得した。我々は各個体が円形の軌跡を描くという特徴に着目し、円運動の角振動数を算出したところ、回転方向が系統的に偏っていることがわかった (Fig.3)。この結果を踏まえ、一個体の運動について確率論モデル (式 (1)) を適用し、実験データからパラメータ推定を行なった。

$$\dot{x}(t) = v \cos \theta(t) + \xi_x, \quad \dot{y}(t) = v \sin \theta(t) + \xi_y, \quad \dot{\theta}(t) = \Omega + \xi_\theta \quad (1)$$

さらにこのパラメータの分布から集団の運動の特徴づけを試みた。

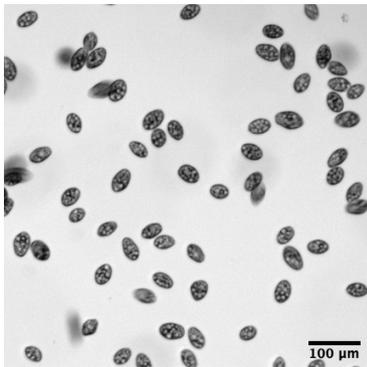


Fig.1: Population of *T. pyriformis*.

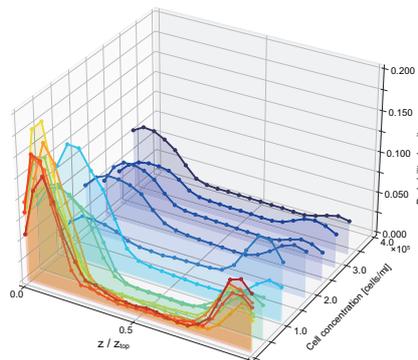


Fig.2: Spatial cell distributions of various suspensions [4].

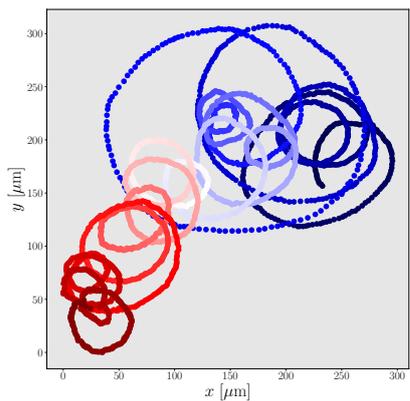


Fig.3: A trajectory of *T. pyriformis* showing circular motion.

References

- [1] J. Manabe, *et al.*, *Journal of Fluid Mechanics* **892** (2020).
- [2] Y. Nishigami, *et al.*, *Commun. Integr. Biol.* **11** (2018), no. 4, e1506666.
- [3] T. Ohmura, *et al.*, *PNAS* **115** (2018), no. 13, 3231-3236.
- [4] K. Okuyama, *et al.*, *Micromachines* **12** (2021), no. 11.

2 波長同時照射による分子マニピュレーションの高解像度化

ソフトマター物理学研究室 川西 永起

Abstract Molecular manipulator is a method of controlling the concentration of fluorescent molecules in nematic phase by spatial modulation of the order parameter induced by photoisomerization of azobenzene. In this study, we have achieved higher resolution manipulation than in previous study by irradiating the entire sample with blue light simultaneously.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

アゾ分子を混合したネマティック液晶試料の一部に励起光(UV)を照射すると、アゾ分子の trans-cis 光異性化によって配向秩序変数の空間変化が誘起される。分子マニピュレータでは、この秩序変数の空間変化を利用して、試料中に分散した蛍光分子の濃度分布を制御する[1]。これまで、光異性化したシス体のアゾ分子が、UV照射領域外に拡散することで、分子マニピュレーションの解像度が低下することが問題となっていた[1]。本研究では、励起光(UV光)より長波長の青色光を試料全体に励起光と同時に照射し、励起光照射領域外でアゾ分子を cis 体から trans 体へと戻すことで、分子マニピュレーションの高解像度化を目指した。複屈折率 Δn は秩序変数 S の 2 乗に比例するため、まず $\Delta n/\Delta n_0$ を励起光単独の場合(Fig.1(a))と青色光同時照射の場合(Fig.1(b))で比較する。 $\Delta n/\Delta n_0$ の空間変化はローレンツィアンを仮定して、その FWHM を図中に示した。青色光の同時照射により $\Delta n/\Delta n_0$ の空間変化が急峻となった。励起光の照射プロファイルの FWHM は $10.2\mu\text{m}$ なので同時照射によりそれに近い秩序変数変化が誘起され、高解像度化が実現された確認できた。

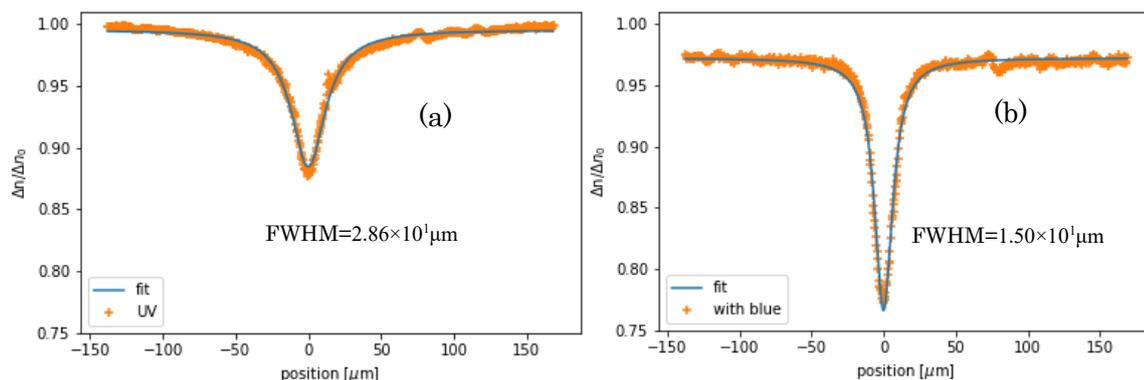


Fig.1 複屈折率の空間変調 (a)励起光(UV)単独照射 (b)青色光同時照射

さらに、試料中に分散した蛍光分子の濃度分布の変化を蛍光強度として観測し、励起光単独照射(a)と青色光同時照射の場合(b)で比較した。蛍光分子の濃度分布変化の FWHM を比較すると、青色光を同時照射した場合、FWHM が小さくなり、分子マニピュレーションの高解像度化が実現された。

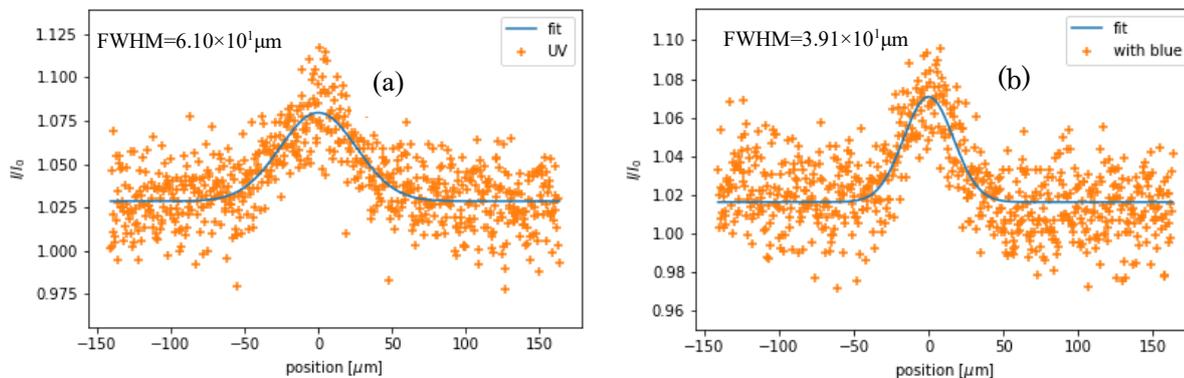


Fig.2 蛍光分子濃度分布の空間変化 (a)励起光(UV)単独照射 (b)青色光同時照射

References

[1] Samitsu, S., Takanishi, Y. & Yamamoto, J. Molecular manipulator driven by spatial variation of liquid-crystalline order. Nature Mater 9, 816–820 (2010)

固浸レンズを用いた量子気体顕微鏡による 光格子中単一イッテルビウム原子の観測

量子光学研究室 北村紀貴

Abstract We develop an ytterbium quantum gas microscope using a solid immersion lens. We prepare a Bose-Einstein condensate of ^{174}Yb atom and a Fermi-degenerate gas of ^{173}Yb , and load them into a two-dimensional optical lattice. We demonstrate fluorescence imaging of Yb atoms with single-site resolution.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年、冷却原子気体を光格子に導入した系を利用した Hubbard 模型の量子シミュレーション研究が盛んである。このような光格子中冷却原子系の実験における強力な観測ツールが量子気体顕微鏡(QGM)である。量子気体顕微鏡とは、光格子中にトラップされた個々の原子を空間分解能の高いイメージング系を用いて直接観測する装置である。量子気体顕微鏡の実現により、Fermi-Hubbard 模型における長距離反磁性相関の観測[1]などが実現している。

従来の量子気体顕微鏡は、そのほとんどがアルカリ原子を観測対象としていた。一方で、我々の研究グループが開発する量子気体顕微鏡は、アルカリ土類様原子であるイッテルビウム(Yb)原子を対象とするものである。イッテルビウム原子は安定同位体が豊富であり、5つのボゾン同位体と2つのフェルミオン同位体が存在する。さらに、2電子原子であることに由来して、2つの準安定状態 $^3\text{P}_0$, $^3\text{P}_2$ が存在する。これらの特徴を生かすと、核スピン $I=5/2$ を持つ ^{173}Yb を使用した $\text{SU}(N \leq 6)$ 対称な Hubbard 模型の研究[2]や、 $^3\text{P}_0$ 状態と組み合わせた2軌道 $\text{SU}(N)$ Hubbard 模型の研究[3]が可能である。

我々の開発する量子気体顕微鏡装置の特色として、固浸レンズ[4]の使用が挙げられる。固浸レンズとは半球形の高屈折率媒質でできたレンズであり、対物レンズと試料の間に設置することでイメージング系の実効的な開口数を増大させることができ、顕微鏡の分解能を向上させることが可能となる。

本研究では、まず ^{174}Yb (ボーズ同位体)を使用して、ボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)の生成と光格子中原子の単一格点分解能イメージングに取り組んだ。まず、固浸レンズ直下に用意した原子集団に対して蒸発冷却を行うことにより、 ^{174}Yb 原子のボーズ・アインシュタイン凝縮を実現した。Time of Flight 法によりトラップから開放された原子の拡散の様子を観測し、BEC の特徴である非等方的拡散を確認した。つづいて、原子を格子間隔 541 nm の2次元光格子に導入し、固浸レンズを用いた高分解能イメージングを行なった(Fig.1)。単一格点からの発光を解析した結果、測定空間分解能を表す点分布関数(PSF)の広がり 400 nm(FWHM)であり、格子定数以下の分解能で単一原子を観測することに成功したと言える。

また、 ^{173}Yb (フェルミ同位体)の実験も進めており、フェルミ縮退の生成、サイト分解発光イメージングに成功した。今後、スピン分解測定法と組み合わせることにより $\text{SU}(N)$ 量子磁性を明らかにできると期待される。

References

- [1] A. Mazurenko et al., Nature, 545(7655), 462(2017).
- [2] H. Ozawa et al., Physical Review Letters, 121(22), 225303(2018).
- [3] A. Gorshkov et al., Nature Physics, 6(4), 289(2010).
- [4] S. Mansfield et al., Applied Physics Letters, 57(24), 2615(1990).

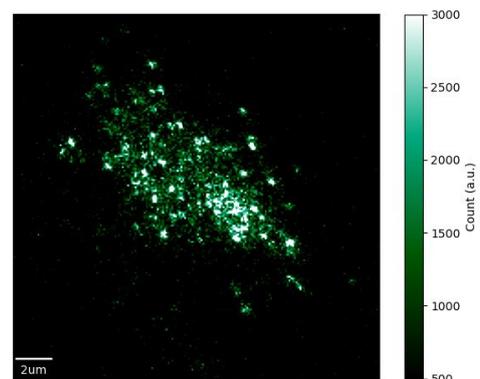


Fig. 1. Site-resolved fluorescence image of ^{174}Yb atoms in a two-dimensional optical lattice.

ノイズ印加された非線形 Schrödinger 方程式における rogue wave 的発達

流体物理学研究室 酒井亮

Abstract We numerically calculated one-dimensional nonlinear Schrödinger equation (NLSE) with a random potential and found that rogue waves (spatio-temporal localized huge waves) appear more and more frequently as we increase the randomness. These rogue waves are developed by soliton-like waves' collisions which do not appear in the noise-free NLSE.
© 2022 Department of Physics, Kyoto University

rogue wave は、主に水面波の文脈において、周囲の平均的な波高に比べ局所的に数倍程度高くなった波である [1]。水面波の波束を記述する方程式として、水深が無限に深い場合には非線形 Schrödinger 方程式 (NLSE) が知られている。近年、NLSE と rogue wave を結びつけることを目的とした研究が盛んである。また、同様の方程式で系が記述される非線形光学においても optical rogue waves と呼ばれ、研究が進められている [2]。一方、NLSE を含む可積分方程式が作る乱流のように見えるランダムな波動場は、Zakharov により可積分乱流 (integrable turbulence) [3] と呼ばれ、理論的・実験的研究の対象として注目されている。

本論文では、Sun らの先行研究 [4] と同様に 1 次元 NLSE に対して微小なランダムポテンシャルを加えて数値実験を行い、rogue wave 発達の様相及びその統計的な性質を調べた。本研究で扱う方程式は

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + (1 + \eta(x))|\psi|^2\psi - \xi(x)\psi = 0 \quad (1)$$

の形を取る。ここで $\eta(x), \xi(x)$ はガウシアンノイズで Sun らと同様であるが、本研究では Sun らよりも強いノイズを用いた。境界条件は周期境界とし、周期を $L = 256\pi$ とする。初期条件は $\psi(x, t = 0) = 1$ とする。ただし $\eta(x) = \xi(x) = 0$ の場合、初期条件に適当なガウシアンノイズ $\zeta(x)$ を加え $\psi(x, t = 0) = 1 + \zeta(x)$ とし、ノイズの影響を考慮した。

rogue wave 的な性質を測る統計量として 4 次モーメント $M_4 = \frac{1}{L} \int |\psi|^4 dx$ や波高の確率密度関数 $P(|\psi|^2)$ を用い、ノイズの影響を調べた。NLSE では $M_4 \sim 2$ となり $P(|\psi|^2)$ は指数減衰するが、 M_4 は増加し、 $P(|\psi|^2)$ のすそが上がる。また、波の波形の時間変化では、ランダムポテンシャルがある場合 (Fig.1 右) ではいくつかの波が波高の高い状態を維持しながら孤立波的にある方向に一定速度で移動し他の波と衝突を起こしている。この衝突の際に波の振幅が局所的に増大することで rogue wave となる。ノイズのない場合 (Fig.1 左) は大きく並進する孤立波が生じず、それらの衝突もないため、rogue wave の発達は弱い。

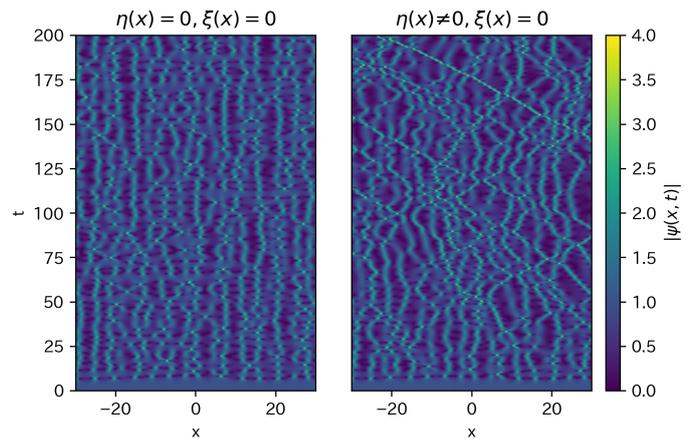


Fig.1 Space-time evolution of $|\psi(x,t)|$ for one realization. Left: without noise, right: with noise.

References

- [1] 田中光宏 「非線形波動の物理」 (森北出版, 2017).
- [2] D. R. Solli et al., Nature **450**, 1054-1057(2007).
- [3] V. E. Zakharov, Studies in Applied Mathematics, **122**, 3, 47-89(2009).
- [4] Z. Sun et al., Phys. Rev.E. **103**, 062203(2021).

超伝導体における新奇圧電現象の研究

凝縮系理論研究室 茶園宙弥

Abstract Motivated by the recent studies of the magnetopiezoelectric effect and superconductors lacking inversion and time-reversal symmetry, we propose a supercurrent-induced lattice distortion, namely the superconducting piezoelectric effect (SCPE). We demonstrate the SCPE in a helical superconductor and clarify a close relation between the SCPE and Cooper pairs' momentum.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

空間・時間反転対称性の両方が破れた系は、電気磁気効果や非相反応答など対称性が高い系では実現しない多彩な物理現象が研究される舞台となっている。電流によって結晶ゆがみが誘起される磁気圧電効果は、近年の研究で発見されたこの対称性の系に特有の新奇な現象である。PT 対称な系に特徴的な非対称なバンド構造に起因する電流誘起電子ネマティック秩序として理論的に提案され[1]、EuMnBi₂において実際に磁気圧電応答が観測された[2]。この現象は、新しい圧電材料開発への応用のほか、磁性金属の対称性の特定にも活用できると考えられている。

また、近年の結晶作成技術の進歩や新たな超伝導物質の発見をうけて、空間・時間反転対称性が破れた超伝導の研究が多角的に行われるようになってきた。超伝導体に特有な非相反応答が精力的に研究されているほか、クーパー対が有限の重心運動量を持つエキゾチックな超伝導相の存在が理論的に指摘されているなど、空間・時間反転対称性が破れた系は今後の超伝導研究の中心的なトピックの一つになることが予想される。

以上の磁気圧電効果の発見および空間・時間反転対称性が破れた超伝導の研究の進展に着想を得て、超伝導電流が結晶のゆがみを誘起する「超伝導圧電効果」の提案と定式化を行った[3]。これは、磁気圧電効果と同様に空間・時間反転対称性が破れた系でのみ実現が許される現象であり、超伝導状態の対称性の決定に利用することができると考えられる。その対称性の超伝導の例として、クーパー対が有限の重心運動量を持つ2次元ヘリカル超伝導のモデルを取り上げ、超伝導圧電係数の計算を行った。その結果として、磁気圧電応答と同程度の大きさの超伝導圧電応答が期待できることや、超伝導圧電効果とクーパー対の重心運動量の間に関係があることを明らかにした。

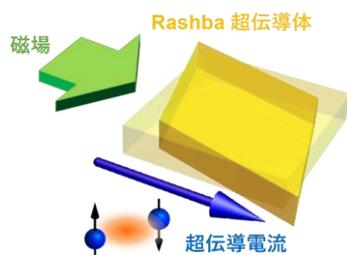


Fig. 1. Schematic of the SCPE in a 2D helical superconductor.

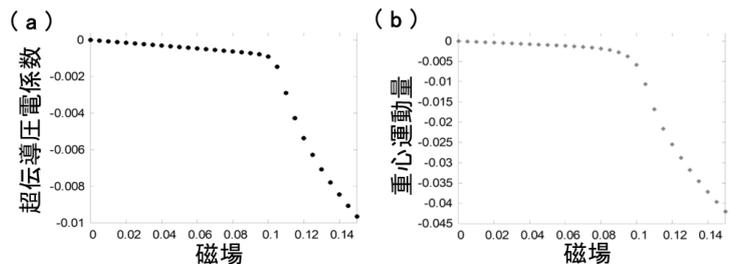


Fig. 2. Magnetic field dependence of the (a) SCPE coefficient and (b) Cooper pairs' total momentum.

References

- [1] H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **96**, 064432 (2017).
- [2] Y. Shiomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 127207 (2019).
- [3] M. Chazono, H. Watanabe and Y. Yanase, Phys. Rev. B **105**, 024509 (2022).

光格子中冷却 SU(N) フェルミ気体 - 散逸およびスピン不均衡系の量子磁性 -

量子光学研究室 本多寛太郎

Abstract We studied the novel quantum magnetism in unconventional systems with ultracold Fermi gases with SU(N) symmetry in optical lattices: (1) we revealed the dissipation-induced-sign-reversal of quantum magnetism by introducing dissipation with two-body losses, and (2) we systematically measured spin correlation between adjacent sites for spin-imbalanced system generated by optical pumping.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

強相関を記述するハバードモデルにおける重要な研究対象の一つに量子磁性がある。これは、Mott絶縁体において2次摂動として生じるスピン間の相互作用によって実現するスピンの多体状態であり、これまでも盛んに研究がなされてきた。特に、光格子中の冷却原子系は、数値計算において困難が伴う多体スピン系を実際にシミュレートする有用なプラットフォームとして用いられている。これまでに2次元の正方格子系においては、量子気体顕微鏡を用いて長距離の反強磁性スピン相関が直接的に観測されている[1]。また、冷却原子系ではスピン成分数 N が2より大きく SU(N)対称性をもつ系での量子磁性の実験研究もなされている。我々の研究室では、基底状態間の斥力相互作用が SU(N=6)対称性を示す ^{173}Yb を用いた研究が行われており、3次元格子中の SU(N=6)スピン系などにおいて隣接サイト間のスピン相関を測定することで、大きなスピン自由度が量子磁性にもたらす影響についてこれまでに報告している[2]。本研究では、この SU(N)対称性をもつ ^{173}Yb の冷却フェルミ気体を導入した光格子系を用いて、この系で期待される非自明な量子磁性の振舞いを明らかにするために以下の2つの研究を行った。

(1) 散逸系の量子磁性

近年、従来の孤立系とは異なる散逸のある開放系における量子磁性が注目されている。特に、同一サイトからの2体ロスのある Fermi-Hubbard model においては、散逸下でスピン相関が反強磁性相関から強磁性相関へと反転していくことが指摘されている[3]。そこで本研究では、光会合によって散逸を導入し、隣接サイト間のスピン相関ダイナミクスを測定した。その結果、理論的に指摘されていたスピン相関が反転する振舞いが観測された (Fig. 1)。さらに、二重井戸から一様な1次元光格子への光格子パラメータや散逸強度を変えた系統的な測定を行い、散逸系の量子磁性の振舞いを明らかにした。

(2) スピン不均衡系の量子磁性

スピン成分の存在比に偏りのあるスピン不均衡系における量子磁性も近年注目されている。先行の理論研究においては、plaquette格子 (Fig. 2) 中の不均衡な SU(4) スピン系において、s波RVB状態と SU(4) singlet 状態が混在した新奇な量子磁性相の存在が指摘されている[4]。そこで本研究では、まず、不均衡な SU(N=4,6) スピン系を系統的に生成可能な光ポンピング手法を開発した。そして、この手法を2次元正方格子系から plaquette 格子系に渡る様々な格子系に適用して隣接サイト間のスピン相関を系統的に測定し、その振舞いを明らかにした。

References

- [1] A. Mazurenko *et al.*, Nature **545**, 462-466 (2017).
- [2] S. Taie *et al.*, arXiv:2010.07730v1 (2020).
- [3] M. Nakagawa *et al.*, PRL **124**, 147203 (2020).
- [4] Y. Miyazaki *et al.*, AIP Advances **11**, 025202 (2021).

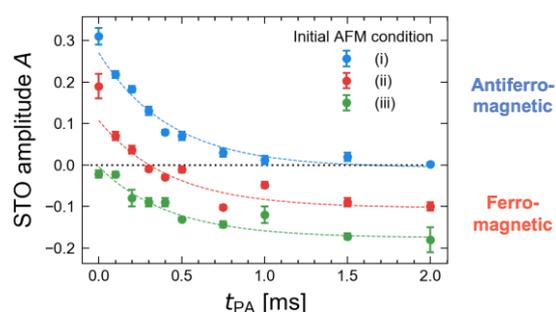


Fig. 1. Dynamics of spin correlations in double well lattice system.

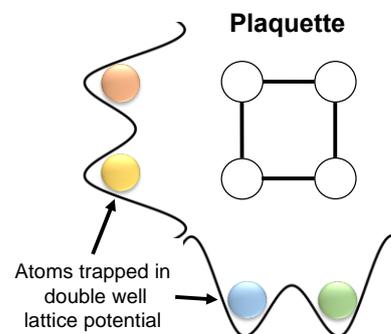


Fig. 2. Plaquette lattice made by combining two orthogonal optical superlattices.

遊泳微生物の集団ダイナミクスの測定と解析手法の開発

時空間秩序・生命物理研究室 今西遼人

Abstract We develop an image analyses process for suspension of swimming microorganisms by use of a machine learning-based segmentation algorithm Cellpose. We calculated the radial distribution function with the nematic order parameter, which gives us the local orientation order in the cell-aggregated system.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

細胞集団のダイナミクスは、組織形成や形態形成だけでなく[1]、微生物の生態やそれらが住む溶液中の物質輸送にも関連する[2]。これらを知ることは、医学や生物学など基礎学問的なものだけでなく、培養の最適化や制御の点で工業生産や環境維持などでも重要になってくる。その中でも溶液中を遊泳する微生物が示す、数密度分布の自発的な偏りや遊泳方向の配向秩序などは、自己遊泳モデルを用いた現象再現をはじめとした物理学的・流体力学的なアプローチが一定の成功を収めてきた。しかし、粗密差の激しい実験条件など細胞が密集しつつ運動している場合では、個々の細胞を分離し運動を追跡することは正確性の面でも課題が多く、数密度以上の情報が確かめられていないことが多い。運動の測定は細胞画像の相関から一定領域の並進速度を得るなどオイラー的な視点からの解析がほとんどであり、個々の細胞の運動は平均化のときに棄却されている。細胞が最密充填されている場合を除けば、細胞やその集団という流体素片は、オイラー的描像とラグランジュ的描像が一致しない対象であることは殆ど自明であろう。

そこで本研究では、固液界面や気液界面に集積する性質をもつ遊泳微生物 *T. pyriformis* を用いて流体中での集団運動を解析し、低密度から高密度が混在した細胞集団に対して個々の細胞を分離し追跡しつつ集団運動を定量化する事を試みた。今回の条件では、深層学習ベースのセグメンテーションアルゴリズムである Cellpose[3]をベースに、画像輝度歪み平坦化の為に rolling ball アルゴリズム[4]を組み合わせて、個々の細胞の見分けを行った(Fig.1)。続いて、得られた輪郭の時系列データから動径分布関数を計算した。細胞密度によらず、*T. pyriformis* の短径に相当する 30~35 μm にピークが現れた(Fig.2)。

さらに、局所的な配向秩序を表すネマティック秩序変数を計算した(Fig.3)。

References

- [1] S Garcia, *et al.*, PNAS. **112**(50), 15314-15319 (2015)
- [2] T. Ishikawa *et al.*, Phys. Rev. Lett., **107**, 028102, (2011)
- [3] C Stringer *et al.*, Nature Methods **18**, 100–106 (2021)
- [4] SR Sternberg. Computer, **16**(01), 22–34, (1983)

predicted outlines

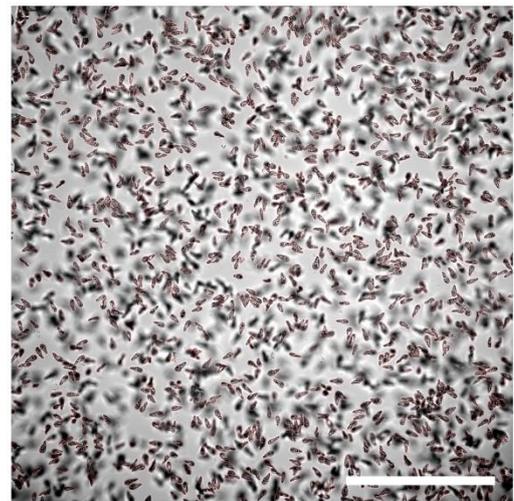


Fig.1 Predicted outlines labelled with red lines. Scale bars, 1mm

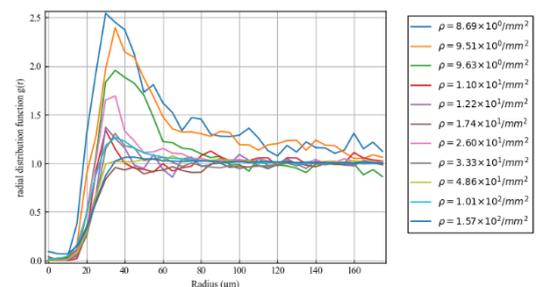


Fig.2 Normalized Radial distribution function

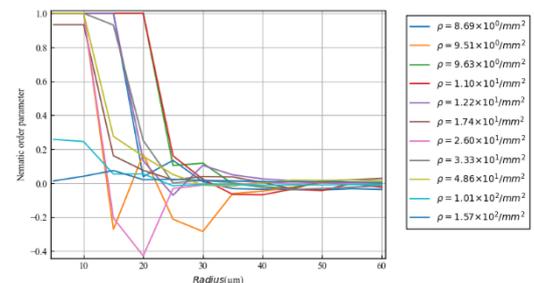


Fig.3 nematic order parameter

Kitaev スピン液体候補物質 $\alpha\text{-RuCl}_3$ における 磁場誘起トポロジカル相転移

量子凝縮物性研究室 鵜飼柚希

Abstract We measured thermal conductivity and specific heat of $\alpha\text{-RuCl}_3$, which is a candidate material for Kitaev spin liquid. Thermal conductivity exhibits a discontinuous jump at $\mu_0 H^* \sim 11\text{T}$ and specific heat has anomaly at H^* , which implies the first-order transition that separates two QSL phases with distinct topological properties.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

A. Kitaev により提案された二次元ハニカム格子における量子スピンモデルでは、基底状態として量子スピン液体状態が厳密解として得られる[1]。さらに、この Kitaev スピン液体では、電子スピンの分数量化によりマヨラナ粒子が素励起として現れることが期待されており、注目を集めている。

これまで我々のグループはキタエフ量子スピン液体候補物質 $\alpha\text{-RuCl}_3$ において磁場により反強磁性秩序が抑制されたスピン液体状態において熱ホール効果測定を行い、熱ホール伝導度の半整数量子化を観測することに成功した[2][3]。この半整数熱量子ホール効果は、キタエフスピン液体状態におけるマヨラナ粒子のカイラルエッジ流、および非可換エニオンの存在を示す強力な証拠である。

この半整数熱量子ホール効果は限られた磁場領域においてのみ観測され、一定以上の磁場をかけるとそれが消失することが明らかとなっている。このことは強磁場において何らかのトポロジカル相転移の可能性を示唆している。実際、最近の比熱測定では、熱ホール伝導度が消失する磁場近傍において比熱に異常が観測されており、さらに高磁場ではエネルギーギャップが開いたまま結晶の 6 回対称性を破るネマティック状態が現れることが指摘されている[4]。また、他の測定からも高磁場相の存在が示唆されている[5]。

その一方で、高磁場相が存在しないという報告もいくつかあり、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ における高磁場相への相転移の存在は曖昧なままである。

以上の背景を踏まえ、今回我々は熱ホール伝導度の半整数量子化が確認された純良な $\alpha\text{-RuCl}_3$ の試料に対して、磁場中における熱伝導率と比熱の測定を行った。その結果として、 $\mu_0 H^* \sim 11\text{T}$ において熱伝導率の不連続なジャンプを観測した。熱伝導率はエントロピーの流れに関する物理量であり、そのジャンプは 1 次相転移の存在を示している。さらに、比熱測定では $H-H^*$ においてブロードなピークを観測し、 H^* 付近の広い磁場範囲でゆらぎが存在すると考えられる(Fig. 1)。このことから、この相転移は弱い 1 次相転移であることが示唆される。また、この H^* は熱ホール伝導度が消失し始める磁場に非常に近く、これらの結果は、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ の量子スピン液体状態において、磁場誘起のトポロジカル相転移が存在することを示している。

References

- [1] A. Kitaev, *Annals of Physics*, **321**, 2 (2006).
- [2] Y. Kasahara, *et al.*, *Nature*, **559**, 227 (2018).
- [3] T. Yokoi, *et al.*, *Science*, **373**, 568 (2021).
- [4] O. Tanaka, *et al.*, arXiv:2007.06757 (2020).
- [5] C. Balz, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **100**, 060405 (2019).

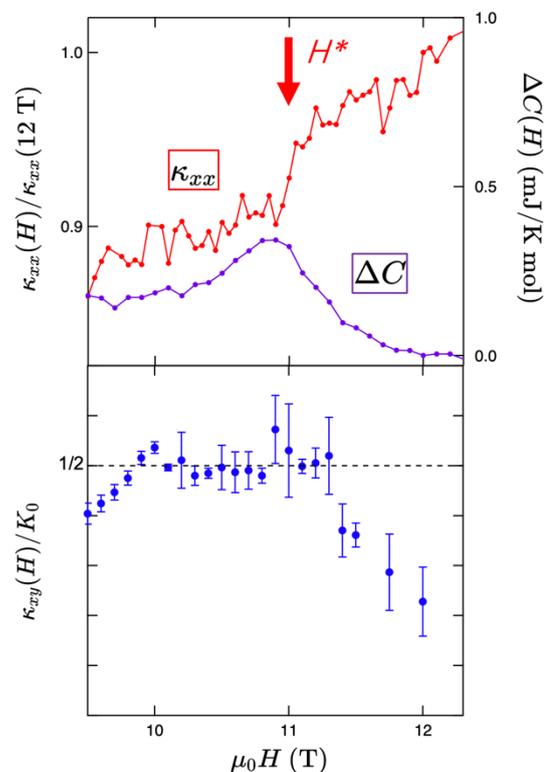


Fig. 1: H -dependence of thermal conductivity, specific heat and thermal Hall conductivity [3]

カゴメ超伝導体 CsV_3Sb_5 の比熱異方性

Anisotropy of the specific heat of Kagome Superconductor CsV_3Sb_5

固体量子物性研究室 小畑慶人
Quantum Materials Laboratory Keito OBATA

Abstract We study the specific heat of the Kagome superconductor CsV_3Sb_5 under precise field-direction control. We find that the specific heat and the upper critical field exhibit multi-band and nodal behavior. We also discuss in-plane and out-of-plane anisotropies of the superconductivity.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

CsV_3Sb_5 は、Fig. 1 のように結晶構造に V イオンの理想的なカゴメ格子をもつ金属である。他の多くのカゴメ格子物質でもみられるように、 CsV_3Sb_5 においてもバンド構造に van Hove 特異点や Dirac コーンが存在する。この物質では 94 K で電荷密度波 (CDW) 秩序が発現する[1]。それに加えて CsV_3Sb_5 では、約 3 K 以下で超伝導状態が実現する[1]。カゴメ格子をもつ物質において実際に超伝導転移が見られる例は稀有であり、この物質は非常に注目されている。特に CDW 相の低温域において、電子状態が結晶の持つ 6 回回転対称性を破った 2 回回転対称性をもつというネマティック性が実験的に示唆されており[2,3]、超伝導相においてもネマティック状態が保たれているか関心が高まっている。また、超伝導ギャップ構造に関して、核四重極共鳴の測定からはフルギャップを示唆する結果[4]が報告されている一方で、熱伝導の測定からはノードの存在を示唆する結果[5]が報告されており、未だに超伝導ギャップ構造の決定には至っていない。

我々は、バルクの熱力学量の測定によって CsV_3Sb_5 の超伝導の性質を調べるために、 CsV_3Sb_5 の単結晶試料に対して高精度磁場方向制御下における比熱測定を行った。比熱の磁場強度依存性から、0.2 K の低温域まで上部臨界磁場 H_{c2} を決定した (Fig. 2)。その結果、 ab 面内の H_{c2} の温度依存性が 2 K 付近に変曲点をもつという、複数の電子バンドが超伝導状態に関与していることを示唆する結果を得た。また、比熱の温度および磁場依存性から超伝導ギャップにノードがあることが示唆される。さらに、 H_{c2} が約 10 倍もの大きな面外異方性をもつことや H_{c2} が Pauli 対破壊効果ではなく軌道対破壊効果によって決定されていることを強く示す結果を得た。これらの測定に加え、比熱の面内磁場角度依存性の測定も行い、興味深い面内異方性のふるまいを観測した。

References

- [1] B. R. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Lett., **125**, 247002 (2020).
- [2] Y. Jiang *et al.*, Nat. Mat. **20**, 1353 (2021).
- [3] S. Ni *et al.*, Chin. Phys. Lett., **38**, 057403 (2021).
- [4] C. Mu *et al.*, Chin. Phys. Lett. **38**, 077402 (2021).
- [5] C. C. Chao *et al.*, arXiv: 2102.08356 (2021).

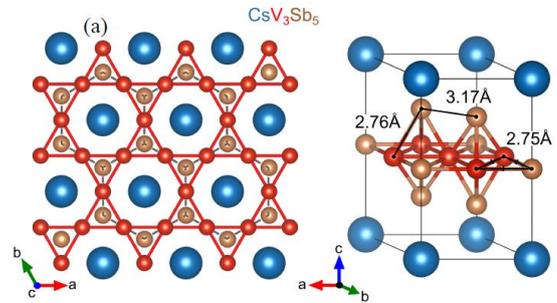


Fig. 1: Crystal structure of CsV_3Sb_5 , having the Kagome lattice of V (red spheres) in the ab plane [1].

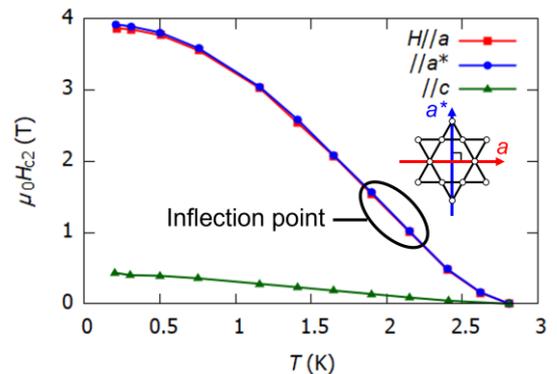


Fig. 2: Temperature dependence of the upper critical field H_{c2} of a CsV_3Sb_5 single crystal. In-plane H_{c2} has an inflection point at around 2 K, which is characteristic behavior of a multi-band superconductor.

SiC-PEG による Slippery 界面の安定化

ソフトマター物理学研究室 金澤 和律

Abstract We investigate the slippery interfaces made by Si coupled PEG thin film to avoid the damage of the LC display cell induced by repetition of the switch on/off process. The slippery interface of Si-PEG has about the same anchoring energy as PEG. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

【諸言】既存の液晶ディスプレイにおいては、基板表面におけるダイレクター（表面ダイレクター）は強いアンカリング力により完全に固定されている。一方本研究室では、アンカリング力が弱く表面ダイレクターがバルクのダイレクターの運動に伴い回転することができる、「Slippery 界面」を提唱して研究を行ってきた。「Slippery 界面」を用いた液晶ディスプレイでは、駆動電圧の低減と、表面ダイレクターの回転に伴う透過率の改善、すなわち優れたモード効率が実現される。先行研究において、液晶と相溶性が悪いポリエチレングリコール (polyethylene-glycol:PEG) ゲルを基板上に形成した界面 (PEG 界面) が良好な Slippery 界面となることを発見したが、長時間のスイッチング動作により、電場を遮断した際の遮光性が劣化する「焼き付き」の発生が見られていた。そこで、本研究においては「焼き付き」を軽減するため、基板に強固に結合する SiC-PEG を用いて、Slippery 界面耐久性の向上を目指した。

【試料】 fig. 1 に示すように、上面はラビングされた強アンカリング基板、下面は SiC-PEG が塗布された櫛歯電極基板で $2\mu\text{m}$ のビーズをスペーサーとして用いた水平電場液晶セルを作製した。クロスニコル条件下で偏光顕微鏡観察をしつつ、櫛歯電極に 1kHz のバースト波を印加し、電場 On/Off 時の透過光強度の時間依存性を測定し、モード効率・閾電圧・応答時間を求めた。また比較のため、下面に PEG 塗布界面と強アンカリング基板を用いた液晶セルをそれぞれ用意した。

【実験結果】 Fig. 2 に 30°C における、電場応答測定の結果を示す。横軸は時間 (秒)、縦軸は規格化された透過光強度、すなわちモード効率を示した。0.1sec から 0.6sec までの 0.5 秒間に渡ってバースト波を印加した。片面 SiC-PEG 界面においては、80%以上のモード効率が得られ、両面強アンカリング界面と比較すると大幅に改善されたことがわかった。また、Fig. 3 より片面 PEG 界面の液晶セルと同様に片面 SiC-PEG 界面の液晶セルにおいても、閾電圧の低下が観測された。しきい値電場、電場オフ時の緩和時間は、SiC-PEG 界面が強アンカリング界面と PEG 界面との中間的なアンカリング強度を持つと理解できる。しきい値電場以上の電圧を印加し続け、1 時間ごとに十分短い時間で透過光強度の測定を行った結果、片面 PEG 界面と片面 SiC-PEG 界面の「焼き付き」を定量的に測定できた。詳細は発表会で議論する。

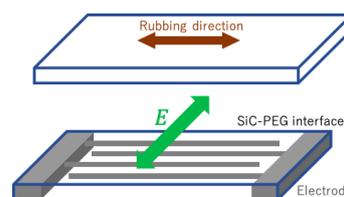


Fig. 1. 電場応答測定に用いる液晶セル（上面のみ強アンカリング状態）

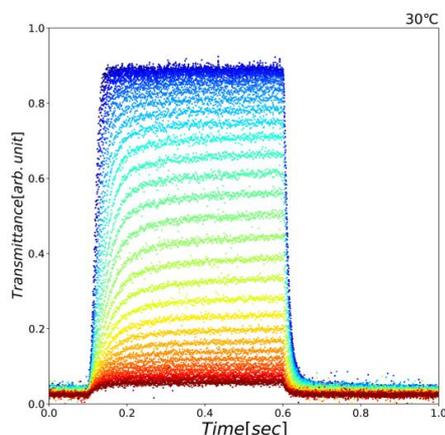


Fig. 2. SiC-PEG 界面のモード効率

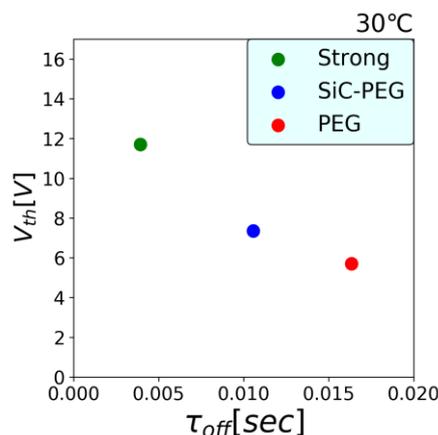


Fig. 3. 閾電圧 V_{th} vs 緩和時間 τ_{off}

核磁気共鳴による多元素ナノ粒子の研究

固体量子物性研究室 木下雄大

Abstract Size-dependent deviation of spin-lattice relaxation rate $1/T_1$ from bulk-like behavior was reported by nuclear magnetic resonance (NMR) measurements on Pt nanoparticles. To investigate the origin of the anomaly, we performed ^{195}Pt and ^{63}Cu -NMR measurements on $\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x$, $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x$, and $\text{Au}_{1-x}\text{Cu}_x$ nanoparticles, and revealed the anomaly is caused by d electron contribution.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

金属ナノ粒子では電子のエネルギー準位が離散的になるため、低温では物理量がバルクの金属とは異なる振る舞いを示すことが期待される[1]。このような効果は、久保効果と呼ばれ、1960年代より理論・実験研究が行われてきた。フェルミエネルギー近傍におけるエネルギーギャップの大きさは、状態密度と1ナノ粒子当たりの原子数に反比例すると考えられる。

近年、ナノ粒子作成においても進歩があり、ナノ粒子試料表面をポリビニルピロリドン(PVP)で覆うことで酸化及びナノ粒子同士の接触を防げるようになった。我々の研究室では、Ptナノ粒子の核磁気共鳴(NMR)による測定から、低温で核スピン格子緩和率 $1/T_1$ がバルクの金属で見られる温度 T に比例する振る舞いから大きくはずれて上昇することを報告した[2]。このような $1/T_1$ の異常が現れる温度 T^* の粒径依存性と磁場依存性[3]を詳しく調べた結果、それらが理論的に見積もった久保効果におけるエネルギーギャップの大きさとよく一致することを指摘した。ただし、このような異常が発生するメカニズムの詳細に対する理解は十分ではない。

そこで私は、異なる金属元素を混合することで、 $1/T_1$ の低温での振る舞いにどのような影響が生じるか、特にCuやAuなどの s 電子の寄与が主要である金属元素と、PdやPtなどの d 電子の寄与が主要である金属元素の違いに着目して調べるために、 $\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x$ 、 $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x$ 、 $\text{Au}_{1-x}\text{Cu}_x$ の3種類のナノ粒子で ^{195}Pt -NMR および ^{63}Cu -NMR 測定を行った。測定した試料は、化学教室の北川宏教授の研究室から提供を受けた。

久保効果では、CuやAuなど状態密度の小さい金属元素のナノ粒子は、より大きいエネルギーギャップをもつことが予想される。しかしながら、 $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x$ ナノ粒子では、Fig. 1のように、Cuの割合の増加に伴って温度 T^* は変化せず、むしろ $1/T_1$ の異常な振る舞いが大きく抑制された。さらに、 $\text{Au}_{1-x}\text{Cu}_x$ ナノ粒子では、低温で $1/T_1$ の異常は見られなかった。これに対して、 $\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x$ ナノ粒子では、混合比に依らずにPtナノ粒子の場合と同様の $1/T_1$ の異常が観測された。これらの結果から、Ptナノ粒子の低温で見られた $1/T_1$ の異常は従来考えられていたように粒子のサイズに因るだけでなく、状態密度に d 電子の寄与をもつナノ粒子にのみ見られる現象であることを明らかにした。

References

- [1] R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn. **17**, 975 (1962).
- [2] T. Okuno *et al.*, Phys. Rev. B. **101**, 121406(R) (2020).
- [3] T. Okuno *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 095002 (2020).

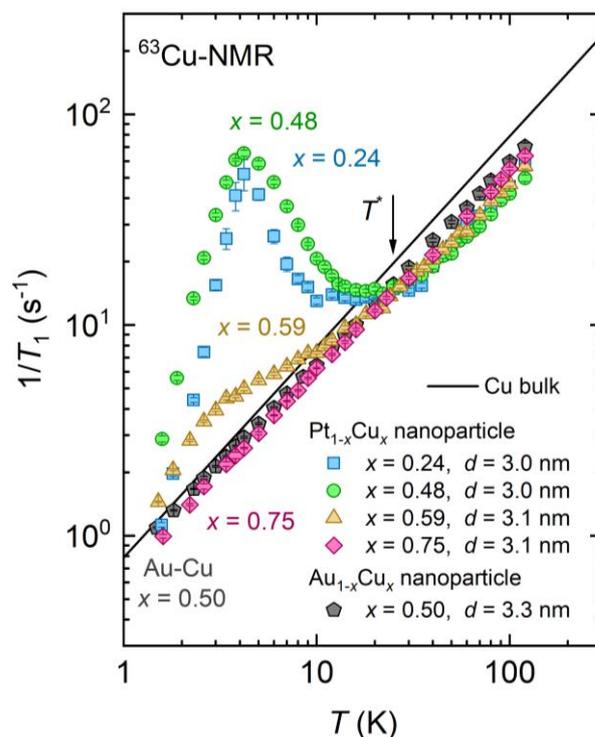


Fig. 1. Temperature dependence of nuclear spin-lattice relaxation rate $1/T_1$ of $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x$ nanoparticles ($x = 0.24, 0.48, 0.59,$ and 0.75) and $\text{Au}_{0.50}\text{Cu}_{0.50}$ nanoparticles.

2 軌道光格子量子シミュレーター： キング関係式による新粒子探索とアンダーソン直交性崩壊 への応用

量子光学研究室 齋藤 優冴

Abstract We conducted two experiments using the 1S_0 - 3P_0 two-orbital-quantum-simulator platform of Yb atoms. First, by performing the ultraprecise-isotope-shifts measurement with all bosonic Yb, we demonstrated the novel quantum sensor for new particles. Second, we studied many-body-induced decoherence of localized spins towards quantum simulation of Anderson's orthogonality catastrophe.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年、光格子を用いた量子シミュレーションの研究が盛んに行われており、当研究室では主にイッテルビウム(Yb)原子を用いた研究を行っている。Yb原子などの2電子原子の特徴として基底状態 1S_0 と準安定状態 3P_0 を持ち、その両方で電子の全角運動量が0になる。またBose同位体5種、Fermi同位体2種と、多くの安定同位体を持つこともYb原子の特徴として挙げられる。本研究ではこれらの性質を生かして精密同位体シフト測定による新粒子の量子センサー実験とアンダーソン直交性崩壊の量子シミュレーションに向けた実験の2つの実験を行った。

近年の冷却原子による精密分光実験の発展は目覚ましく、それを利用して標準模型を超えた物理現象を調べる際のプラットフォームとして注目されている。具体的には、King plotの線形性の破れを検証することで新粒子の探索をすることが提唱された。King plotとは複数の光学遷移について異なる同位体間の共鳴周波数のシフト量をプロットしたものであり、標準模型の範囲では高い精度でプロットが線形に並ぶ。標準模型の範囲でも高次の効果で線形から外れることは予想されているが、それに加えて新粒子が存在した場合にも線形性を破る新たな要因となると考えられている。本研究ではHzレベルの狭線幅レーザー光を準備して 1S_0 - 3P_0 遷移の共鳴を5種のBose同位体について、時計動作という方法で各同位体ペアの同位体シフトを数Hzのオーダーで測定し、先行研究による2種類のYbイオンでの結果[1]と比較してKing plotを作成した。さらに観測された非線形性の評価を行い、新粒子の電子・中性子に対する結合定数の積の大きさに関する制限のプロットを得た[2]。

一方、Yb原子の2軌道系を活かした量子シミュレーションは理論、実験双方から幅広く研究がなされており、そのうちの一つにアンダーソン直交性崩壊の観測が挙げられる。アンダーソン直交性崩壊とはFermi面に対して突然局在ポテンシャルを印加したときに、原子数が十分多い極限でその前後の状態は直交するという効果である。最近この効果について冷却原子の系をツールとして研究する方法が提案された[3]。遍歴Fermi粒子系に少量の局在スピンを混ぜた系を用意し、局在スピに対してRamsey干渉の測定をすることで、アンダーソン直交性崩壊において重要な概念であるオーバーラップ関数を得ることができる。本研究では、まず ^{173}Yb を用いてスピン自由度を備えた 1S_0 遍歴- 3P_0 局在の(0+1)混合次元系を実現し、さらに 3P_0 状態に局在した原子スピンのRamsey干渉およびスピンエコー信号を観測する手法を新たに開発し測定を行うことで、遍歴する量子多体系による局在スピンの緩和の振舞いを確認することに成功した。

References

- [1] I. Counts *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 123002 (2020).
- [2] K. Ono *et al.*, arXiv:2110.13544 (2021).
- [3] M. Knap *et al.*, Phys. Rev. X **2**, 041020 (2012).

空間反転対称性の破れた電子流体力学における 非従来の量子輸送現象

凝縮系理論グループ 佐野涼太郎

Abstract In this study, we formulate a theory of electron hydrodynamics with broken inversion symmetry under magnetic fields. Specifically, we clarify that there exist a novel type of nonreciprocal collective modes and reveal that these modes indeed give rise to the directional dichroism in magneto-optical responses.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年の結晶成長技術の発展をうけ、「流体力学領域」と呼ばれる電子系の新たな非平衡領域が急速に開拓されつつある。「流体力学領域」とは、散乱過程として不純物/フォノン散乱が抑制された結果、電子-電子散乱が最も支配的になる状態を指しており、高い伝導性と強い電子相関を併せ持った金属物質がその実現の舞台とされている。この領域における電子系のダイナミクスは「電子流体力学」によって記述されることが知られており、2016年のグラフェンでの実現[1]を契機に、様々な物質群 (PdCoO₂[2], WP₂[3]など) で次々と確認されており、今まさに物性物理学に新たな潮流を生み出しつつある。加えて、流体力学的手法はその汎用性の高さから、多種多様な準粒子間の交差応答や非局所・非線形光学応答への応用が期待され、今日盛んに研究が行われている高強度/超高速光学応答やスピントロニクス/バレートロンクスなどの分野に新たなブレイクスルーをもたらすと考えられる。

本研究はこの新奇な非平衡領域を舞台に、非従来の非線形・非局所輸送現象の予言・解析を行い、それらを実現するための実験的なプラットフォームを提案する。特に、「空間反転対称性の破れ」をテーマに、電子流体力学が内包している様々な研究分野 (光物性・トポロジカル物性・スピントロニクス・バレートロンクス・プラズモニクスなど) との密接な関係を新たに見出すことで、この分野の隠れた可能性・重要性を引き出すことを1つの目標として掲げた。

本発表では、結晶対称性と Bloch 電子の幾何学的位相に注目し、磁場中における非相反応答を流体力学的なアプローチから考察する[4]。具体的には、空間反転対称性の破れに誘起された Berry 曲率の効果を取り入れた流体力学方程式を定式化し、それに基づいて集団励起である表面プラズモンを解析的に調べる。その結果、流体力学領域では、非相反な集団モード (非相反磁気表面プラズモン) が現れ、その分散関係の非相反性によって、反射率・透過率スペクトル等の磁気光学応答が強い方向 2 色性を示す [Fig.1] ことが明らかになる。また、これらの結果を歪グラフェンなどの電子流体物質に適用することで定量的な評価を与えるとともに、流体力学的な振舞いを観測するための候補物質・現実的な実験セットアップを提案する。

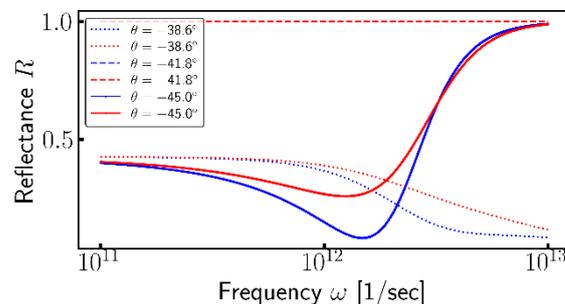


Fig.1 Directional dichroism in the magneto-optical reflectance peaks. The forward (blue) and backward (red) reflectance is shown as functions of the frequency for three incident angles.

References

- [1] D. Bandurin *et al.*, Science **351**, 1055 (2016).
- [2] P. J. Moll *et al.*, Science **351**, 1061 (2016).
- [3] J. Gooth *et al.*, Nature Communications **9**, 4093 (2018).
- [4] R. Sano, R. Toshio, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **104**, L241106 (2021).

共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における周波数混合過程

光物性研究室 島ノ江 励

Abstract: We have investigated multi-mode injection locking into Resonant Tunneling Diode (RTD). Comb-like mode generation has been observed and its origin is attributed to the nonlinear frequency mixing process. The frequency-mixing efficiency was estimated as 1 % that is much larger than those in conventional nonlinear materials. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

共鳴トンネルダイオード(RTD)テラヘルツ発振器は、室温動作する小型のテラヘルツ光源として注目されている[1]。近年 RTD 発振器からの出力を戻り光として注入すると、特定の条件下で RTD 発振器がマルチモードで発振し、かつそれがモード同期状態であることが報告された[2]。これまで RTD 発振器はシングルモードで発振する光源と考えられていたが、そのマルチモード発振メカニズムの理解が進めば、テラヘルツ帯における単一素子での周波数コムなどの実現も期待できる。しかし、RTD 発振器がマルチモードで発振するメカニズムについては今のところ理解されていない。

本研究では、RTD 発振器においてマルチモードテラヘルツ波を用いた注入同期の実験を行なった。マルチモードの注入光は、周波数 300.20 GHz (ω_0) の連続テラヘルツ波を、10 MHz ($\Delta\omega$) のサイン波形により振幅変調することで生成した。図(a)に注入に用いたテラヘルツ波のスペクトルを示す。期待通り、 $\omega_0 \pm \Delta\omega$ のサイドバンドがキャリアの半分程度の強度で発生している。図(b)に注入光のパワーが約 10 μ W の場合の RTD 発振器のスペクトルを示す。RTD 発振器からの発振スペクトルは、注入光のモードに加えて、コム (comb) 状の新たなモード ($\omega_2, \omega_3, \omega_4, \dots$) が生成されており、その間隔は $\Delta\omega$ であることがわかった。これは注入同期により RTD 発振器が注入光と同じモードで発振すると同時に、四光波混合のような非線形光学過程により周波数混合された新たなモードを生成していることを示している。

さらに、生成された新たな ω_2 のモードの強度は図(b)の ω_0 のモードに比べて約 1 %程度であることがわかった。この値は、通常の半導体材料において、発振器内部の電場強度で期待される 3 次の非線形周波数混合過程の効率に比べてかなり大きい。これは、動作状態の RTD 発振器のような内部にゲインを有するアクティブデバイスにおいては非線形光学定数の値が巨大な値をとり得ることを示唆している[3]。

以上のように、RTD 発振器の内部では周波数混合過程をはじめとする非線形光学効果が通常の物質よりも強く起きていることがわかった。これがこれまで観測されてきた RTD 発振器のマルチモード発振に寄与している可能性がある。

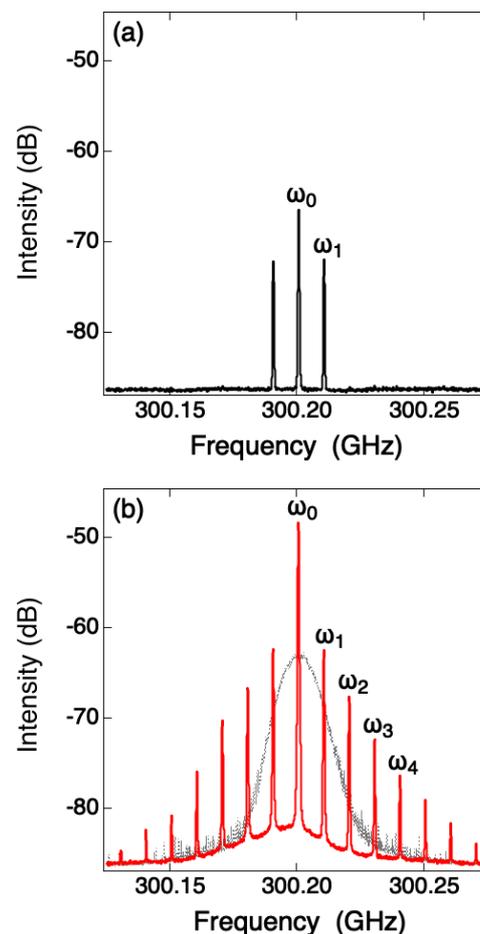


Fig.1 (a) Spectrum of multi-mode terahertz light injected into the RTD oscillator.

(b) Spectrum of RTD oscillator when the light in Fig.1(a) is injected (gray trace : spectrum of RTD in free-running state)

References

- [1] M. Asada and S. Suzuki. *Sensors*. **21**, 1384 (2021)
- [2] T. Hiraoka, Y. Inose et al. [DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-919266/v1>]
- [3] P. Friedli, H. Sigg, B. Hinkov et al. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 222104 (2013)

紫外光レーザーを用いた分子マニピュレーション

ソフトマター物理学研究室 高富士愛子

Abstract We investigate the molecular manipulation by using the fringe pattern of UV laser. We confirm that the concentration of the fluorescent polymer is sinusoidally modulated along the modulation of the light intensity created by the fringe pattern of the crossed laser beams ($\lambda=60\mu\text{m}$).

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

【序】ネマティック液晶中の不純物分子は、液晶の配向秩序度に依存した溶解度を示す。そこで、当研究室では、配向秩序度の空間分布を制御することで不純物の空間的な濃度を制御する「分子マニピュレータ」の原理を考案して実現した[1]。配向秩序度の制御は液晶にアゾベンゼン分子を混合し、蛍光顕微鏡の落射紫外光をピンホールによって局所的に試料に照射することで Trans-cis 光異性化により、照射領域の配向秩序を乱し、配向秩序度の空間分布を制御した。本研究では、励起光の拡張を目指し、紫外レーザー光の干渉縞によるパターン光照射の分子マニピュレーションの可能性を研究した。

【実験】分子マニピュレーション用の試料は、ネマティック液晶として E44 と T15 の混合物、メタクリル酸 11-[4-(4-ブチルフェニアゾ)フェノキシ]ウンデシル (Azo)、捕捉用の蛍光高分子 ADS12PQT (PQT) を混合したものである。試料は水平配向界面処理を行った石英ガラスセルの中に封入した。励起光は 325nm の He-Cd レーザー光の干渉縞を用いて、縦状に強度変調して試料に照射した (Fig. 1)。使用した干渉縞の縞間隔は 60-100 μm で調整した。Fig. 2a は典型的な干渉縞 (縞間隔 60 μm) を蛍光分子の蛍光で観察した顕微鏡写真である。

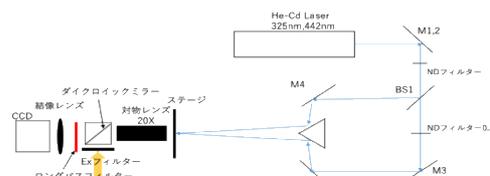


Fig.1 interference device

【結果】蛍光分子濃度の空間分布は同軸落射方式で照明光 (400-475nm) を照射し、冷却 CCD カメラで観測した。Fig. 2 は PQT 0.08wt%、Azo 3.5wt%、温度 120 $^{\circ}\text{C}$ 、照射光強度 145 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ とした時、秩序変数に大きな変化が誘起され、照射領域で等方相への転移が確認された (Fig. 2c 赤丸)。これにより照射レーザー干渉縞が有効な秩序変数の変化を誘起できることを示した (Fig. 2c)。試料を変更しアゾベンゼンの混合量を 3.2wt%、温度を 108 $^{\circ}\text{C}$ 、照射レーザー強度を 15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ に下げた。試料に同様のレーザー干渉光を照射するとネマチック状態での蛍光高分子の輝度変化が見られた (Fig. 3 青線)。Fig. 3 の横軸は干渉縞の縦縞に垂直方向の位置 (μm) で蛍光強度 (青線) は照射後の蛍光強度を照射前の蛍光強度で規格化したものである。励起光である紫外光干渉縞の強度は緑線で示した。干渉縞の光強度の強弱に追従して蛍光輝度変化しており、紫外レーザー光の干渉光によるネマチック状態での分子マニピュレーションの実現を確認した。

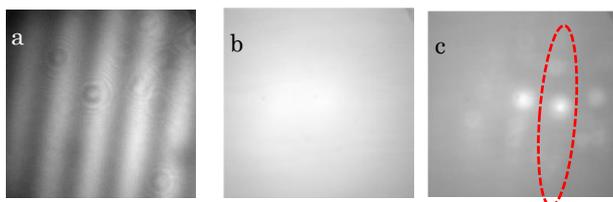


Fig.2(a) Interference fringe of the UV laser ($\lambda=60\mu\text{m}$). Fluorescence intensity distribution image (b) before UV irradiation and (c) after UV irradiation

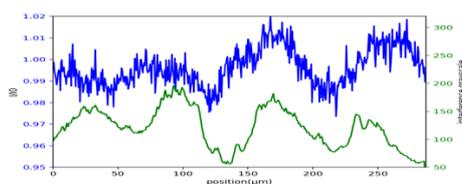


Fig.3(blue) Normalized fluorescence intensity (blue line) and the light intensity modulation of the fringe pattern of the UV laser beams (green line). (green) Brightness of irradiated interference

References

[1] S. Samitsu, et al., Nature Materials, 2010, 9, 816

液体 ^3He のスピン流とスピンドイナミクス

低温物理学研究室 寺木陽和

Abstract We observed long-lived FIDs from liquid ^3He using Pulsed-NMR at about 3mK in about 80mT. In such a situation, Leggett-Rice effect generates spin currents and the domain structure which forms the long-lived FIDs. We got results that support existence of the domain structure.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

超流動 ^3He -B 相のオーダーパラメータに含まれる \hat{n} と θ は系の自由エネルギーを最小にするように空間配置を取り、テクスチャーと呼ばれる。各種自由エネルギー、容器壁の効果が競合してテクスチャーは決まるが、エネルギー的に縮退した 2 つの領域が存在する場合にはそれらを滑らかに繋ぐ空間構造が出現し、ドメインウォールと呼ばれる。磁場下において、 \hat{n} が磁場と平行、反平行になる配置がエネルギー的に縮退している。特に円筒容器においては、容器壁付近で \hat{n} が向きを反転する場所が予想され、欠陥の形成が期待される。また、スピンスーパー流による磁化の輸送によってドメインが形成されることがある。ドメインウォールの形成、消滅のダイナミクスや安定性に関する調査と可視化を計画し、直径 1mm の狭小な円筒容器型のサンプルセルを設計・制作した。

超流動転移温度直上の 3mK 付近の温度、80mT 程度の磁場下において、10mK 付近のものとは異なる、非常に長寿命な NMR 信号が観測された(Fig1)。横緩和時間の長い液体 ^3He においては、通常ならば磁場の不均一性で寿命が決まるが、観測された長寿命 NMR 信号の寿命は磁場の不均一性による寿命の 5 倍以上となる。液体 ^3He が十分に高磁場・低温の環境におかれた場合、準粒子の平均自由行程が増大することを反映して、磁場勾配下で歳差運動をする核スピン系において新たにスピン流が生じる(レゲット・ライス効果)[1]。このスピン流はブロッホ方程式とは異なる挙動のスピンドイナミクスにおいて重要になる。特に、パルス NMR により核スピン系が一様に励起された後、スピン流によって核磁化が磁場と平行なドメインと反平行なドメインに分離することがあり、ドメインウォールの中の磁化がスピン流によってコヒーレンスを保った歳差運動をして長寿命の NMR 信号を放出することが、強磁場下の ^3He - ^4He 混合液などで観測、議論されている[2]。

レゲット・ライス効果が有意に働く条件は spin-rotation パラメータが 1 以上というものであるが、3mK という低温での測定条件下ではスピン拡散係数を測定して得た spin-rotation パラメータが 2 程度である。磁場勾配を直径 1mm サンプルセルの先端が高磁場になる方向に印加することでサンプルセル長軸方向にドメイン分布を制御し、長寿命 NMR 信号を観測したところ、tip 角に依存して長寿命 NMR 信号の周波数が時間変動することが観測された(Fig2)。これらの挙動は Dmitriev らにより観測、提案されていた ^3He - ^4He 混合液におけるドメイン構造[3]と定性的には対応しており、純粋な液体 ^3He においても同種の効果が出ることを確認したことになる。

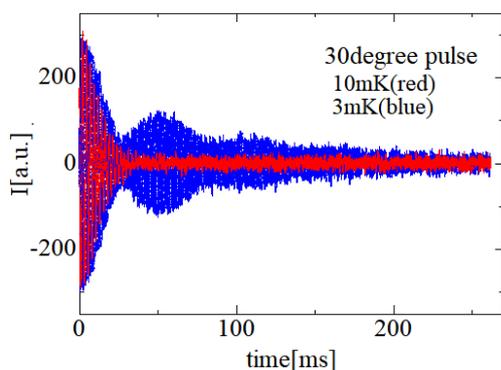


Fig.1 long-lived FID

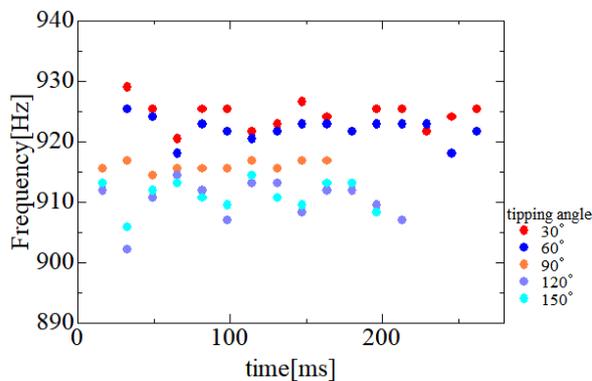


Fig.2 frequency of the FID for different tipping angle

References

- [1] A.J. Leggett and M.J. Rice, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 586 (1968)
- [2] G. Nunes Jr., C. Jin, D.L. Hawthorne, A.M. Putnam and D.M. Lee, *Phys. Rev. B* **46**, 9082(1992)
- [3] V.V. Dmitriev, V.V. Moroz, A.S. Visotskiy and S.R. Zakazov, *Physica B* **210**, 366(1995)

フォノン側線発光解析による ダイヤモンドの励起子基礎特性の解明

光物性研究室 戸田倫太郎

Abstract We have measured and analyzed the phonon-assisted luminescence of excitons in intrinsic and phosphorus-doped diamond. By simulating the spectral shapes by considering the phonon dispersion, the translational excitonic mass and the effective Bohr radius of the bound exciton were determined.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

ダイヤモンドは近年、パワーデバイス材料に適した究極のワイドギャップ半導体として注目されている[1]。常温のダイヤモンドでは、大きな励起子束縛エネルギーのためにキャリアと励起子が併存しており、両者が輸送特性[2]や光学特性[3]と深く関わっていることが明らかになってきた。しかし、自由励起子の重心質量や束縛励起子の有効ボーア半径など、重心波数空間上の励起子特性については未解明な点が多い。本研究では、重心波数空間における励起子構造を、自由励起子と束縛励起子のフォノン側線発光解析によって決定する新たな手法を実証することを目的とした。

図 1(a)はダイヤモンドにおける自由励起子の発光過程を概念的に示す。励起子は Γ -X 方向にバンドの底がある間接型構造をとっており、バンドの曲率は励起子の重心質量に対応する。発光に伴い、励起子の持つ重心波数に等しい波数を持つフォノンが放出される。実験では、非ドープのダイヤモンドを紫外パルス光で励起し、エネルギー分解能 0.6 meV で発光を測定した。図 1(b)の赤線は 7 K で測定した発光スペクトルである。フォノンモードの異なる四つのフォノン側線において、線幅が異なることが新たに観測された。これらの違いを理解する為に、これまで考慮されていなかったフォノンエネルギーの波数依存性を取り入れ、フォノン側線スペクトル形状のシミュレーションを行った。その結果、フォノンモードに依存したスペクトル線幅が得られ(図 1(b)の青線)、実験で観測された線幅の振る舞いを再現できた。また、線幅は励起子重心質量にも依存することを明らかにし、実験とシミュレーションで得られる線幅を比較することで、間接励起子の重心質量を $M_L = 3.1 m_0$ と初めて決定した。

一方、リンドープダイヤモンドに対しても束縛励起子のフォノン側線発光解析を行った。3次元波数空間全体のフォノン分散を取り入れた計算で得られるスペクトルと、実験のスペクトルを比較することで、束縛励起子の有効ボーア半径を $a_B = 0.3 \text{ nm}$ と決定した。

このように、本研究では、フォノン分散を新たに考慮したフォノン側線発光解析を提案し、重心波数空間上における励起子の基礎特性に関する新たな知見を得ることができた。

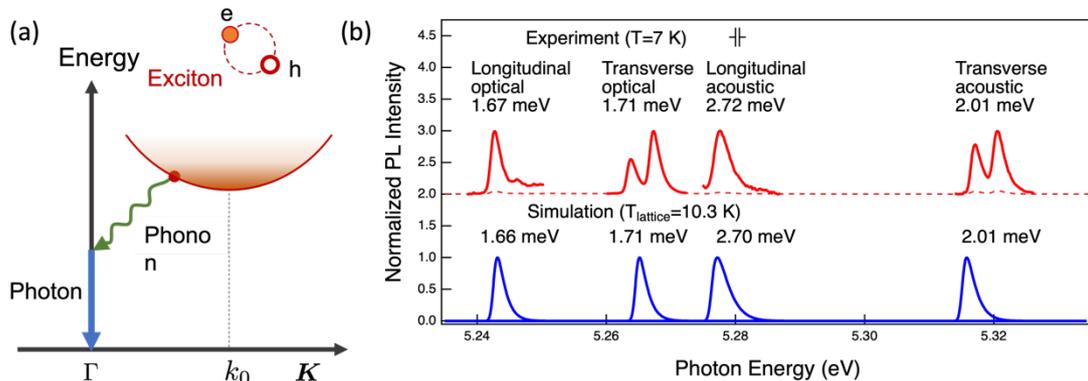


Fig.1 (a) Schematic of indirect excitonic band and phonon-assisted luminescence process. (b) Experimental and simulated spectra for different phonon modes. Only the ground state exciton is considered in the simulation.

References

- [1] M. Kasu, N. C. Saha, T. Oishi, and S.-W. Kim, Appl. Phys. Express **14**, 051004 (2021).
- [2] K. Konishi, I. Akimoto, J. Isberg, and N. Naka, Phys. Rev. B **102**, 195204 (2020).
- [3] K. Konishi and N. Naka, Phys. Rev. B **104**, 125204 (2021).

単一イッテルビウム原子を用いた量子計算に向けた光ピンセットアレイシステムの開発とリドベルグ分光

量子光学研究室 中村勇真

Abstract We construct an optical tweezer array system for quantum computation with Ytterbium (Yb) atoms. We successfully trap, cool and image single ^{174}Yb atoms in the optical tweezers. We also perform spectroscopy of Rydberg states via the metastable $^3\text{P}_2$ state in an ensemble of ^{174}Yb atoms.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年、冷却原子系において単一原子の観測および制御が高い精度で可能になってきている。特に、複数の微小光トラップからなる光ピンセットアレイにトラップされた単一原子は、冷却原子を用いた量子計算や量子シミュレーションのプラットフォームとして注目を集めている[1]。この系では、リドベルグ状態と呼ばれる、価電子が主量子数 n の大きな軌道へ励起された状態の原子間に働く相互作用を利用して、量子計算に必要な量子ゲート操作を行うことが可能[2]であり、これまで主にアルカリ原子を用いて研究が行われてきた。

一方で我々は、アルカリ原子とは大きく異なる特徴を持ったアルカリ土類様原子のイッテルビウム(Yb)原子を用いて、より高精度な量子計算の実現を目指している。Yb原子は2電子原子であり、準安定状態 $^3\text{P}_0$ 、 $^3\text{P}_2$ の存在や、リドベルグ状態がトラップ可能であることなど、アルカリ原子に対して様々な優位性を持つ。本研究では、量子計算実現に向けた重要なステップとして、光ピンセットアレイシステムの構築と、準安定状態 $^3\text{P}_2$ からのリドベルグ分光を行った。

初めに我々は、リドベルグ状態検出が可能で、高分解能光学系を備えた超高真空チャンバーを構築し、音響光学素子による光ピンセットアレイ生成システムを開発した。開発したシステムを用いて実際にトラップ深さ1.5mKの光ピンセットアレイを生成し、単一 ^{174}Yb 原子のトラップ、冷却および原子の近共鳴光による蛍光イメージングに成功した(Fig. 1)。さらにトラップされた単一原子に対し、フィードバックプログラムによる原子の再配列および、量子ビット操作に向けた準安定状態 $^3\text{P}_2$ への励起実験を行った。

また、リドベルグ量子計算に向けて、光双極子トラップ中の原子集団に対して準安定状態 $^3\text{P}_2$ を経由したリドベルグ分光を行った。先行研究で報告されている $^3\text{D}_2$ 系列[3]、 $^3\text{S}_1$ 系列[4]などの結果を再現するとともに、 $^3\text{D}_3$ 系列のリドベルグ状態を $n = 65 \sim 80$ の範囲において世界で初めて観測した。

これらは、今後Yb原子を用いて量子計算・量子シミュレーションの研究を進めるうえで重要な成果である。

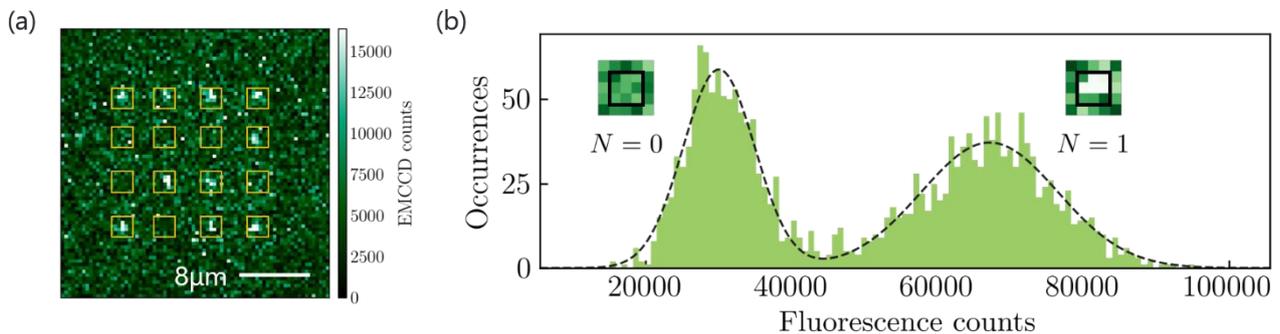


Fig.1 (a) A fluorescence image of single ^{174}Yb atoms trapped in a 4×4 optical tweezer array. Each site is occupied or empty with 50 % probability. (b) A histogram of the fluorescence counts for each site created from 200 fluorescence images.

References

- [1] A. Kaufman and K-K. Ni, Nature Physics **17**, 12, 1324-1333 (2021).
- [2] M. Saffman *et al.*, Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010).
- [3] H. Lehec *et al.*, Phys. Rev. A **98**, 062506 (2018).
- [4] J. Wilson *et al.*, arXiv:1912.08754 (2019).

情報理論的に健全な BQP 決定問題の古典検証を可能にする Trusted Center モデルの研究

物性基礎論：量子情報研究室 米川岬

Abstract A BQP problem is known to be verified by a classical verifier with a trusted center transmitting random BB84 states to a prover and their classical descriptions to a verifier. We show that the states do not have to be random BB84 states and the requirements can be eased.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年小規模な量子計算機を用いた量子計算が実現し、現在の古典計算機の性能を凌駕するような大規模な量子計算機の完成へ向け開発が進んでいる。しかしながら大規模な量子計算機は極低温など特殊な環境下でないと量子状態が壊れてしまい正常に動作しないと考えられており、仮に大規模な量子計算機が実現したとしても近い将来においては限られた機関だけがそれを保有し、それを利用したいユーザーは機関に量子計算を委託するという形を取ることが予想される。ここで、もし量子計算機を持つ機関に悪意があり正しい計算結果を返さなかった場合、量子計算機を持たない委託者はそれを感知することができるのか、という問題がある。これは計算量理論の枠組みでは「古典計算機 (BPP マシン) を持つ検証者は、量子計算機 (BQP マシン) を持つ (誠実とは限らない) 証明者の出力を検証できるか？」という量子計算の古典検証と呼ばれる問題になる。

Fitzsimons らは 2-local Hamiltonian 問題 (2 体の Hamiltonian の基底エネルギーがある閾値よりも低いか別の閾値よりも高いかを判定する問題) が QMA 完全である [1, 2] ことや [3] などを利用して、検証者は量子操作として Pauli X 基底または Pauli Z 基底での 1 量子ビットの測定さえ可能であれば、健全性 (証明者に悪意があったとしても検証者は騙されない度合い) が情報理論的 (いかなる仮定も必要なく、証明者が無限の計算能力を持っていたとしても検証者は騙されない) の下で量子計算の検証が可能であることを示し [4]、Mahadev は健全性が計算量的 (Learning with errors 問題 (誤差付き多元連立一次方程式に関する問題) が量子計算機でも効率的に解けないだろうという、耐量子暗号における標準的な仮定が必要) でも良いならば、量子計算の古典検証が可能であることを示した [5]。しかしながら「情報理論的健全性の下で、量子計算の古典検証は可能か？」という問題は未解決であり、一つの方向性として森前は Trusted Center と呼ばれる、証明者にはランダムに選んだ BB84 状態 $\{|0\rangle, |1\rangle, |+\rangle, |-\rangle\}$ ($Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ の 2 つの固有状態を $|0\rangle, |1\rangle, X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ の 2 つの固有状態を $|+\rangle, |-\rangle$ とする)、

検証者にはその古典記述を送信するような誠実な第三者機関を導入すれば、情報理論的健全性の下で量子計算の古典検証が可能であることを示した [6]。

今回我々は Trusted Center が送信する状態が BB84 状態に限らず、(i) ノイズの影響を受けるとき (ii) $|+\rangle, |-\rangle$ の代わりに $\cos\theta X + \sin\theta Z$ ($\theta \in \mathbb{R}, 0 < |\theta| < \frac{\pi}{2}$) の 2 つの固有状態を用いるときを解析し、

(i) でノイズがある閾値よりも小さい場合と (ii) では情報理論的健全性の下で量子計算の古典検証が可能であることを示し、情報理論的健全性の下で量子計算の古典検証をする際に Trusted Center に要求される量子状態の作成能力を緩和できることを明らかにした。

References

- [1] J. Kempe *et al.*, SIAM Journal on Computing **35**, 1070-1097 (2006).
- [2] T. Cubitt *et al.*, SIAM Journal on Computing **45**, 268-316 (2016).
- [3] T. Morimae *et al.*, Phys. Rev. A **93**, 022326 (2016).
- [4] J. F. Fitzsimons *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 040501 (2018).
- [5] U. Mahadev, FOCS 2018, pp.259-267.
- [6] T. Morimae, arXiv:2003.10712.