

令和4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

2023年1月30日(月)、1月31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）

---

2023年1月30日（月）9：00～17：50

---

## 目次

1. 新奇重い電子系超伝導体  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  の超伝導多重相と磁性の研究  
尾方 司貴（9：00）・・・ 1
2. 重い電子系における非エルミート表皮効果  
金城 信（9：20）・・・ 2
3. カゴメ超伝導体  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  における新奇回転対称性の破れ  
福島 和実（9：40）・・・ 3
4. ウラン化合物超伝導体  $\text{UTe}_2$  の  $^{125}\text{Te}$  核磁気共鳴  
藤林 裕己（10：00）・・・ 4
5. 改良ストレインセルを用いた超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の一軸圧効果  
松原 匠矢（10：20）・・・ 5

---

10：40～10：50 休憩

---

6. 励起子絶縁体  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  における非線形光学応答  
森本 克己（10：50）・・・ 6
7. 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における非線形光学応答  
山崎 星雅（11：10）・・・ 7
8. 全ファイバー型磁気光学 Kerr 効果測定装置の開発と実証  
山根聡一郎（11：30）・・・ 8
9. 新物理探索に向けたイッテルビウム原子の新時計遷移の観測  
石山 泰樹（11：50）・・・ 9
10. 自己駆動液滴クラスターの秩序と運動  
大元 隆史（12：10）・・・ 10

---

12：30～13：30 昼休み

---

11. 空間光変調器を用いた単一イッテルビウム原子の光ピンセットアレイトラップ  
草野 透志（13：30）・・・ 11
12. 混合溶媒中の高分子電解質が形成するメソスケールパターン  
松原 大（13：50）・・・ 12

- 1 3. 確率的反応拡散系が示す相共存状態  
柳澤 優介 (14 : 10) . . . . . 13
- 1 4. 気液相共存系における不純物効果と非平衡効果  
横田 和磨 (14 : 30) . . . . . 14

---

14 : 50 ~ 15 : 00 休憩

---

- 1 5. 1次元構造体における組み立ての難しさ  
小林 郁海 (15 : 00) . . . . . 15
- 1 6. スカーリングで生じる渦と手部間の相互作用の数値解析  
明石 大輝 (15 : 20) . . . . . 16
- 1 7. STM 測定によるキタエフ候補物質  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> 原子層膜の電子状態の研究  
芥川 聖 (15 : 40) . . . . . 17
- 1 8. 第二種超伝導体における渦ガラス転移への渦格子融解転移の影響  
NUNCHOT NARATIP (16 : 00) . . . . . 18

---

16 : 20 ~ 16 : 30 休憩

---

- 1 9. *d*波超伝導体 CeCoIn<sub>5</sub> の三色超格子における非相反輸送測定  
浅枝 寛人 (16 : 30) . . . . . 19
- 2 0. 非エルミート系における、外因性トポロジーに関する研究  
田舎 和也 (16 : 50) . . . . . 20
- 2 1. 強相関電子系における波数空間上の量子計量とチャーン数の関係  
柏原 昂紘 (17 : 10) . . . . . 21
- 2 2. 超伝導体における非線形光学応答  
田中 大登 (17 : 30) . . . . . 22

---

2023年1月31日 (火) 9 : 00 ~ 14 : 30

---

- 2 3. 運動学的ダイナモのラグランジュ記述による最適化  
松村 智己 (9 : 00) . . . . . 23
- 2 4. 磁気トルク測定による CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> の奇パリティネマティック状態の観測  
清末 俊紀 (9 : 20) . . . . . 24
- 2 5. 脈流に対する繊毛虫の非線形応答測定と解析手法の開発  
小林 琢実 (9 : 40) . . . . . 25
- 2 6. スピン三重項超伝導体 UTe<sub>2</sub> の超伝導ギャップ構造  
下邨 真輝 (10 : 00) . . . . . 26

27. RuCl<sub>3</sub>原子層膜の成長とナノ構造

田中 伊蒨 (10:20) . . . . . 27

---

10:40~10:50 休憩

---

28. 跳水の大域的な流れ構造と動力学の粒子法による解析

戸田 朔 (10:50) . . . . . 28

29. 空間的に不均一な弾性を有する液晶セルの電気光学応答とサイズ効果

中山 瑛葵 (11:10) . . . . . 29

30. 冷却原子を用いた量子少数系の研究

春名 裕貴 (11:30) . . . . . 30

31. アゾ混合リオトロピック液晶の光誘起相転移ダイナミクス

板東 涼 (11:50) . . . . . 31

32. 励起偏光操作による GaAs からの高次高調波発生の制御

坂本 実 (12:10) . . . . . 32

---

12:30~13:30 昼休み

---

33. 二系統 4f 光学系を用いた Cu<sub>2</sub>O の和周波分光

田原 圭 (13:30) . . . . . 33

34. 液晶ゲルのポリドメインモノドメイン転移と力学・光学応答挙動

藤森 大渡 (13:50) . . . . . 34

35. 延伸下液晶ゲルの粘弾性ダイナミクス

森 翔太 (14:10) . . . . . 35

# 新奇重い電子系超伝導体CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の 超伝導多重相と磁性の研究

固体量子物性研究室 尾方司貴

**Abstract** We have performed <sup>75</sup>As-nuclear magnetic resonance measurements on the heavy-fermion superconductor CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, which has multiple superconducting phases and coexisting antiferromagnetism (AFM). We revealed the spin-singlet superconducting state in both phases and the disappearance of the AFM in high-field superconducting phase. We also determined the magnetic structure of the AFM.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>は2021年に報告された超伝導転移温度 $T_{SC} = 0.3$  Kの重い電子系超伝導体であり、磁場誘起超伝導多重相が報告されている[1]。CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>は結晶全体では空間反転対称性をもつが、Ce原子位置では空間反転対称性をもたない層状の結晶構造を持つ。このような結晶構造を持つ超伝導体では、隣接した層間で符号の異なるRashbaスピン軌道相互作用が存在し、それにより低磁場の偶パリティ超伝導相と高磁場の奇パリティ超伝導相の2つの超伝導相が実現すると理論研究から指摘された[2]。特に、奇パリティ超伝導状態は隣接した層間で逆符号の超伝導ギャップを持つスピン一重項状態であり、全く新しい超伝導状態である。本物質の超伝導多重相はその最有力候補として現在盛んに研究が行われている。

これまでに当研究室では、<sup>75</sup>As核の核四重極共鳴法によりCeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の超伝導相内部で実現する反強磁性秩序を世界に先駆けて報告した[3]が、超伝導との関連や磁気構造については特定に至っていなかった。そこで我々はCeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の超伝導多重相や反強磁性秩序の磁場依存性を微視的観点から調べるために、<sup>75</sup>As核の核磁気共鳴実験を行った。

*c*軸磁場下で低磁場超伝導相(SC1)と高磁場超伝導相(SC2)のナイトシフト測定を行い[4]、どちらの超伝導相でもナイトシフトが減少するスピン一重項的な状態が実現することを見出した。また、*ab*面方向の磁場下の測定からもSC1相のナイトシフトの減少が確かめられた。SC2相におけるナイトシフトの減少量はSC2相の高い上部臨界磁場(14 T)から予測されるよりも非常に大きく、SC2相においては超伝導波動関数の空間的な変調に由来するスピン変調が実現していると期待される。

さらに、Asサイトにおける内部磁場の測定から、SC1相では磁場下でも反強磁性秩序が実現する一方で、SC2相への転移と同時に反強磁性秩序が消失することを明らかにした。くわえて*c*軸方向と*ab*面方向の結果を比較することによって、内部磁場が*c*軸方向を向いていることを見出し、反強磁性秩序の磁気構造を決定した。

## References

- [1] S. Khim *et al.*, Science **373**, 1012 (2021).
- [2] T. Yoshida *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 134514 (2012).
- [3] M. Kibune *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 057002 (2022).
- [4] S. Ogata *et al.*, Submitted in Phys. Rev. Lett.

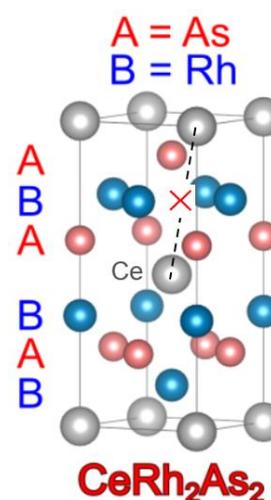


Fig. 1 The crystal structure of CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>. The inversion center (x) does not exist at atomic position.

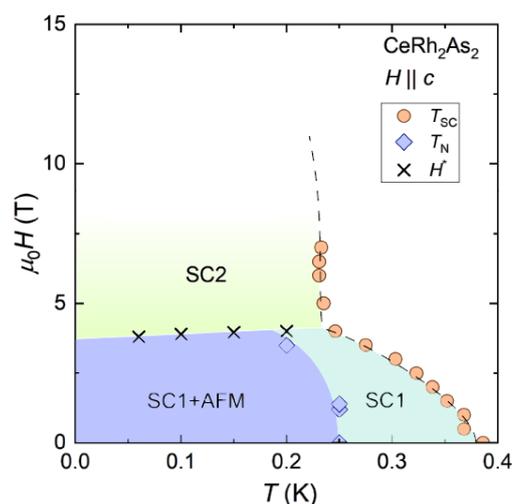


Fig. 2 The *H-T* phase diagram of CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub> in *H* || *c*. AFM coexist only with SC1 [4].

# 重い電子系における非エルミート表皮効果

凝縮系理論研究室 金城 信

**Abstract** The Non-Hermitian Skin Effect (NHSE), which does not have a counterpart in Hermitian systems, has attracted much attention. My research shows that heavy-fermion systems in equilibrium have the potential to display the NHSE. This NHSE is temperature dependent and changes its behavior near the Kondo temperature.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

近年の著しいレーザー技術の向上に伴い、冷却原子系やフォトニック結晶などの開放量子系における非平衡現象が開拓されつつある。このような系では熱浴との相互作用がハミルトニアンのエルミート性を破り、従来のエルミートな系では実現しえない新奇の現象を引き起こす。特にエルミートな系における中心的概念であるトポロジーは、非エルミート系へ拡張される中で「非エルミート表皮効果」という新たな一面を見せた。非エルミート表皮効果の下では、バンドギャップが非エルミート性によって特異な構造を獲得し、エッジモードだけではなく多数のバルクモードも系の境界付近に局在する。

一方で近年、平衡系である強相関電子系においても、1粒子グリーン関数を通じて非エルミート性があらわれることが指摘されている[1]。強相関電子系では Mott 転移や近藤効果、高温超伝導などの電子相関に由来する豊かな現象に加えて、結晶対称性などの複雑な内部構造が存在する。ゆえに非エルミート表皮効果は固体中の非エルミート性を通じてその豊かさを増やすことが期待できる。

本研究では、近藤効果が有効ハミルトニアンにおける例外点の出現と関連を持つことに着目し、重い電子系である周期アンダーソン模型において非エルミート表皮効果が起こるための条件を調べた。その結果、スピン軌道相互作用が時間反転対称性に守られた Z2 型非エルミート表皮効果を誘起することを発見した。加えて、この非エルミート表皮効果の性質を一般化ブリュリアンゾーン[2]と擬スペクトル[3]を用いて解析することで、表皮効果の性質が例外点の出現に伴い、近藤温度周辺で変化することを示した(Fig. 1)。

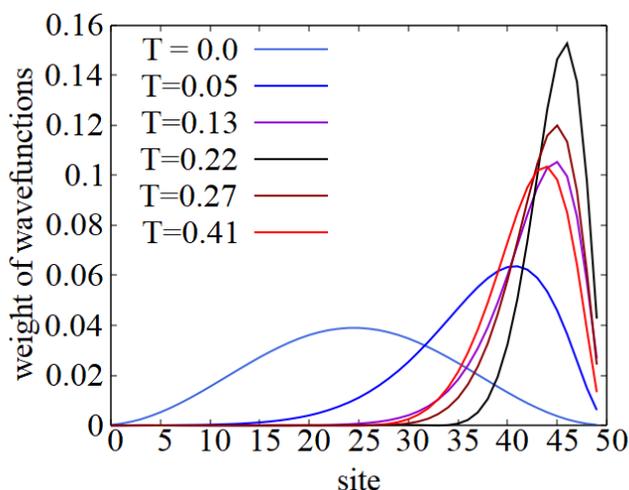


Fig. 1. The Kondo temperature is around  $T=0.22$ . The appearance of exceptional points around the Kondo temperature changes the localization of the wave functions.

## References

- [1] Y. Michishita, R. Peters, Phys. Rev. Lett. **124**, 196401 (2020)
- [2] K. Yokomizo and S. Murakami, Phys. Rev. Lett. **123**, 066404 (2019)
- [3] N. Okuma and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **126**, 176601 (2021)

# カゴメ超伝導体 CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> における新奇回転対称性の破れ

固体量子物性研究室 福島和実

**Abstract** We investigate temperature dependence of in-plane anisotropy of the upper critical fields  $H_{c2}$  of CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> to clarify superconducting order parameter. We find that in-plane  $H_{c2}$  consists of oscillation with 6-fold and 2-fold symmetric components. Both components cannot be expected for hexagonal materials. The results can be well explained by two-component order parameter coupled with weak symmetry lowering.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> は、結晶構造に V イオンによる理想的なカゴメ格子をもつ金属である。2次元の理想的なカゴメ格子では、バンド構造が van Hove 特異点や Dirac cone などの際だった特徴をもつが、これらの特徴が現実物質において発現しているのが CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> の興味深い点である。この物質では 94 K で電荷密度波 (CDW) 秩序が発現し、約 2.6 K で超伝導状態が実現する[1]。理想的なカゴメ格子と共通のバンド構造をもつような物質において、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。しかし、この物質の超伝導状態はフルギャップという報告[2]がある一方で、ノーダルギャップを示唆する報告[3]もあり、秩序パラメータやギャップ構造について詳しいことが分かっていない。理論的には、ハバードモデルでは chiral-d 波超伝導であるという可能性[4]や、ボンド秩序の揺らぎに基づく理論の  $p_x$  波および  $p_y$  波または  $s$  波超伝導が形成されている可能性[5]なども考えられている。

我々は、超伝導の秩序パラメータを調べるため、上部臨界磁場  $H_{c2}$  の面内異方性の温度依存性を測定した。六方晶系において 2 回対称性は通常であれば存在しない。また、Ginzburg-Landau (GL) 理論によると、六方晶系において 6 回対称性は非常に小さい。この性質は Emergent Rotational Symmetry (ERS) と呼ばれている[6]。しかし、この物質で我々は上部臨界磁場  $H_{c2}$  の面内異方性には Fig.1 のように 6 回振動成分と 2 回振動成分が存在することを明らかにした。さらに、異方性の温度依存性をくわしく調べると、 $H_{c2}$  の 6 回対称性成分は GL モデルから予想では説明できないことが分かった。これらのことを説明する有力な説としては、CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> は 2 成分超伝導であり、CDW 秩序に誘起された超伝導ネマティシティを持つという可能性が考えられる。

## References

- [1] B. R. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Lett., **125**, 247002 (2020).
- [2] C. Mu *et al.*, Chin. Phys. Lett. **38**, 077402 (2021).
- [3] C. C. Chao *et al.*, arXiv: 2102.08356 (2021).
- [4] S.L. Yu and J. X. Li, Phys. Rev. B **85**, 144402 (2012).
- [5] R Tazai, *et al.*, Sci. Adv. **8**, eabl4108 (2022).
- [6] J.W.F. Venderbos *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 094522(1–7) (2016).
- [7] K. Fukushima *et al.*, to be submitted.

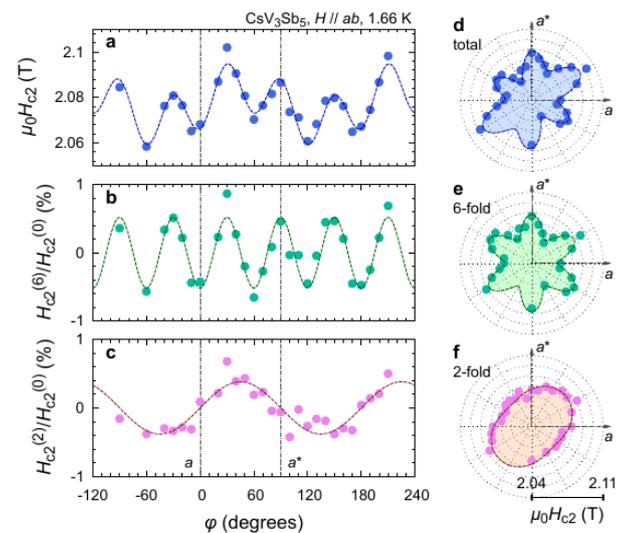


Fig.1 In-plane anisotropy of  $H_{c2}$ . **a.** Raw data **b.** Extracted 6-fold component. **c.** Extracted 2-fold component.[7]

# ウラン化合物超伝導体 $\text{UTe}_2$ の $^{125}\text{Te}$ 核磁気共鳴

固体量子物性研究室 藤林裕己

**Abstract** We performed  $^{125}\text{Te}$ -nuclear magnetic resonance measurements on a high-quality single crystal of  $\text{UTe}_2$ , which is a promising candidate for a spin-triplet superconductor. We measured the Knight shift along the all-crystalline axes and discuss the possible superconducting state.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

従来のスピン一重項超伝導体とは異なり、Cooper 対の全スピン  $S = 1$  をとるスピン三重項超伝導体では、その内部自由度によって多様な超伝導状態が可能となる。そのため、これまでの常識を超えた新奇な現象の実現が期待される。しかし、スピン三重項超伝導対が実現している系は非常に少なく、未だスピン三重項超伝導の完全な理解には到達していない。

ウラン化合物  $\text{UTe}_2$  は、2018 年末に超伝導が報告された重い電子系物質である[1]。低温での磁化率の大きな異方性[1]や、磁場困難軸 ( $b$  軸) 方向への印加磁場で増強される特異な上部臨界磁場[2]など、ウラン系強磁性超伝導体と類似した振る舞いが見られ、さらに磁場圧力温度相図で多彩な超伝導多重相[2]を示すことから、スピン三重項超伝導対の実現が確実視されている。

最近、試料合成法に進展があり、超伝導転移温度  $T_c$  は超伝導発見当初の 1.6 K から 2.1 K まで上昇した[3]。  $T_c$  が 2.1 K の試料 (2.1 K 試料) では、従来の試料 (1.6 K 試料) で見られていた大きな残留電子比熱がほとんど見られず、磁化や電気抵抗で量子振動が観測されるほど純良化が進んでいる[4]。

スピン三重項超伝導体の実験的実証には、スピン磁化率測定が重要である。NMR 測定は超伝導状態のスピン磁化率を測定できる数少ない測定手法の 1 つである。我々は、超伝導状態のスピン磁化率を調べるために、NMR 測定核  $^{125}\text{Te}$  を濃縮した  $T_c$  が 1.6 K と 2.1 K の単結晶試料を用いて、全ての結晶軸方向磁場下の  $^{125}\text{Te}$ -NMR ナイトシフト (スピン磁化率) 測定を行った。Fig. 1 は、両試料に対する、各結晶磁場下における常伝導状態の  $^{125}\text{Te}$ -NMR 信号である。ナイトシフトの値には大きな変化は見られず、スピン磁化率に大きな変化がない。また、1.6 K 試料と比較して 2.1 K 試料ではシャープで対称的な通常状態の NMR 信号が得られ、結晶の均一さがうかがえる。どちらの試料に対しても、超伝導転移温度以下で、 $b$ ,  $c$  軸方向のナイトシフトはわずかに減少した振る舞いが見られた。一方、 $a$  軸方向について、1.6 K 試料では超伝導転移温度以下で超伝導反磁性の影響を差し引くと、ほとんどナイトシフトに変化はなかったが[5]、2.1 K 試料では 1.6 K 試料とは大きく異なる温度依存性を示した。

修士論文発表会では、両試料の  $a$  軸方向のナイトシフトの温度依存性が異なる理由について考察し、群論的な観点から  $\text{UTe}_2$  で実現している超伝導対称性について議論する。

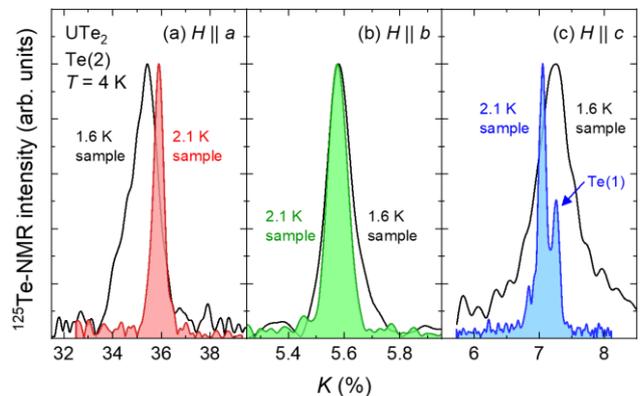


Fig. 1. Normal-state  $^{125}\text{Te}$ -NMR spectra measured in the 1.6 K and 2.1 K samples when the magnetic field is applied to three crystalline axes.

## References

- [1] S. Ran *et al.*, *Science* **365**, 684 (2019).
- [2] D. Aoki *et al.*, *J. Phys. Condens. Matter* **34**, 243002 (2022).
- [3] H. Sakai *et al.*, *J. Phys. Rev. Materials* **6**, 073401 (2022).
- [4] D. Aoki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 083704 (2022).
- [5] G. Nakamine *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 113703 (2019); G. Nakamine *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 064709 (2021); G. Nakamine *et al.*, *Phys. Rev. B* **103**, L100503 (2021); H. Fujibayashi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 043705 (2022).

# 改良ストレインセルを用いた超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の一軸圧効果

固体量子物性研究室 松原匠矢

**Abstract** We have succeeded in developing a technique to apply uniaxial strain to a thin crystal placed on a substrate. This technique prevents sample breakage or strain inhomogeneity, and can be applied to various materials. We adapted this technique to  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  and observed substantial enhancement of superconductivity.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

Uniaxial strain is a powerful tool to control electronic properties through changes of the crystal structure and symmetry. Recently, application of uniaxial strain has been widely used when searching for novel phenomena. For example, in our group, it was demonstrated that the nematicity of the nematic superconductor  $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  can be tuned by uniaxial strain [1].

As another prominent example, it was found that the superconducting transition temperature  $T_c$  in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  substantially increases by applying uniaxial strain along the  $a$ -axis direction [2]. This compound under ambient condition is considered to be a chiral superconductor with broken time-reversal symmetry. Under uniaxial strain, a non-chiral superconducting state emerges [3]. This phenomenon was observed by breaking the tetragonal symmetry of the crystal structure, but not seen under isotropic pressure [4].

Thus, uniaxial pressure has an important role when we discuss the superconducting symmetry issue of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ .

To study this issue, as well as to manifest future applicability to wide class of materials, we have been developing a new method to apply strain to a thin crystal indirectly by applying uniaxial pressure to a quartz substrate. With this method, the probability of breaking of the crystals is highly reduced. We have checked that attached samples on a piezo-based strain cell [5] were successfully compressed by up to 0.3% at room temperature. And then, we cooled down the samples and strain cells with a  $^3\text{He}$  refrigerator. We measured its  $T_c$  under uniaxial pressure by using a parallel LC circuit made by a capacitor and a micro-size coil. We succeeded in measuring  $T_c$  of small crystals whose thickness is less than  $30\ \mu\text{m}$ . Under uniaxial strain, we observed the clear  $T_c$  enhancement up to 3.5 K, which is consistent with literature [2,3].

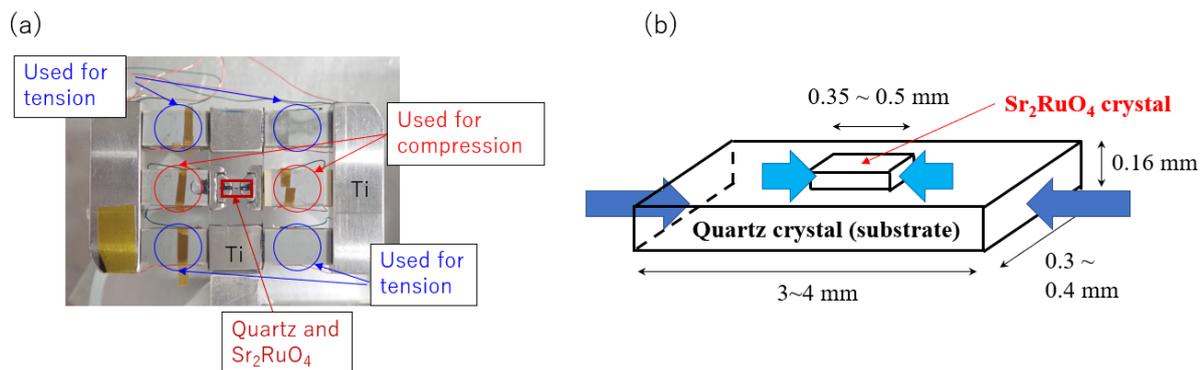


Fig. 1. (a) Picture of our strain cell. (b) Schematic figure of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  crystal on a quartz substrate.

## References

- [1] I. Kostylev *et al.*, Nat. Commun. **11**, 4152 (2020).
- [2] A. Steppke *et al.*, Science **355**, eaaf 9398 (2017).
- [3] V. Grinenko *et al.*, Nat. Phys. **17**, 748 (2021).
- [4] V. Grinenko *et al.*, Nat. Commun. **12**, 3920 (2021).
- [5] I. Kostylev *et al.*, J. Appl. Phys. **125**, 082535 (2019).

# 励起子絶縁体 $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ における非線形光学応答

光物性研究室 森本克己

**Abstract** We investigated sideband generation in an excitonic insulator  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  with the gap-resonant mid-infrared pulse and observed a monotonic enhancement of sideband radiation with decreasing temperature. A possible origin of the enhancement is the temperature dependence of the dephasing time of the amplitude mode in the excitonic insulating phase.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

固体中の電子と正孔はクーロン相互作用により励起子と呼ばれる束縛状態を形成する。多くの場合、励起子は半導体のバンドギャップを超える光子エネルギーを持つ光励起に伴って生成されるが、バンドギャップの小さい半導体、半金属では、基底状態において励起子が自発的に生成・凝縮を起こし、エネルギーギャップが生じた相(励起子絶縁相)が現れることが予言されている[1]。このような相転移を経て絶縁体となる物質を励起子絶縁体と呼ぶ。励起子絶縁相への相転移は連続的な対称性  $U(1)$  を自発的に破り、2つの集団励起モード(振幅モード、位相モード)が出現することが予想されている[2]。集団励起モードの性質は励起子秩序と色々な自由度(例えば準粒子や格子振動)との相互作用を理解するために重要だが、集団励起モードを検出した報告はなく、その性質について未解明なことが多い。励起子絶縁体と同様に  $U(1)$  対称性を破る相転移を示す系である超伝導体では、集団励起モードが非線形分光により研究されており[3]、近年、励起子絶縁体においても、集団励起モードによる非線形光学応答の増強が予言された[4]。ギャップエネルギーの温度変化に由来して、集団励起モードの性質も温度依存するので、非線形光学応答の温度依存性を調べることで集団励起モードの特性を明らかにできることが期待されるが、励起子絶縁体において非線形光学応答を調べた報告は少ない。

本研究では、励起子絶縁体  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ [5]に着目し、ギャップエネルギーに共鳴的な中赤外光励起によるサイドバンド発生の温度依存性を調べた。サイドバンド発生とは、物質に弱強度の近赤外光( $\hbar\Omega_{\text{NIR}}$ )と高強度の中赤外光( $\hbar\Omega_{\text{MIR}}$ )を同時に入射したとき、近赤外光に中赤外光の整数倍を足した光子エネルギーでの放射( $\hbar\Omega_m = \hbar\Omega_{\text{NIR}} + m\hbar\Omega_{\text{MIR}}$ ;  $m$  は整数)が発生する非線形光学現象である[6]。

Fig. 1 は  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  における  $m=+2$  のサイドバンド放射強度の温度依存性を複数の中赤外光子エネルギーについて示したものである。光子エネルギーに依らず、温度低下に伴う放射強度の単調な増大が観測された。この増大の起源を調べるため、サイドバンド放射が振幅モードに由来するモデルを考え、放射強度が振幅モードの緩和レートによって変化する理論式を導出した。Fig. 2 にこの理論に基づいた解析で得られた緩和レートの温度依存性を示す。10-290 K の範囲で単調に増加し、290 K では 10 K での値の3倍になることが見積もられた。全ての温度で緩和レートはギャップエネルギー  $2\Delta$  に対して十分に大きいことから、振幅モードは過減衰の状態にあることがわかった。さらに、緩和レートの温度依存性は、熱分布した低エネルギー(16 meV)のボソンによる高速な散乱( $\sim 13$  fs)で期待される散乱レートの温度依存性によく一致した(Fig. 2 実線)。この結果は、振幅モードと位相モード間の相互作用による緩和過程の存在を示唆している。

## References

- [1] D. Jérôme, T. M. Rice, and W. Kohn, Phys. Rev. **158**, 462 (1967).
- [2] Y. Murakami et al., Phys. Rev. B **101**, 195118(2020).
- [3] R. Shimano and N. Tsuji, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **11**, 103–124 (2020).
- [4] T. Tanabe et al., Phys. Rev. B **104**, 245103 (2021).
- [5] Y. Wakisaka et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 026402 (2009).
- [6] J. Kono et al., Phys. Rev. Lett. **79**, 1758 (1997).

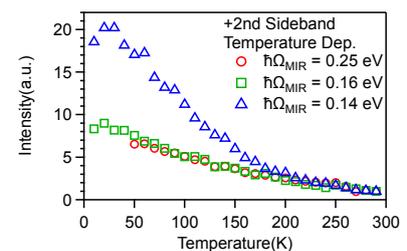


Fig. 1 Temperature dependence of  $m=+2$  sideband emission intensity.

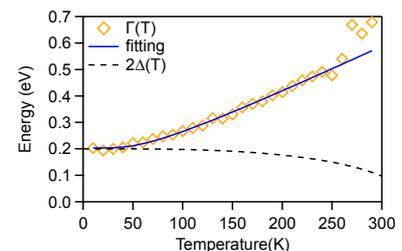


Fig. 2 Temperature dependence of the relaxation rate of the amplitude mode.

# 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における 非線形光学応答

光物性研究室 山崎星雅

**Abstract** We have investigated two-mode injection into Resonant Tunneling Diode (RTD). Highly efficient multi-mode generation was confirmed. The origin is attributed to the nonlinear optical response including injection locking and four-wave mixing (FWM). In the saturated region, higher-order nonlinearities than FWM were also confirmed. © 2023 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、室温動作するコンパクトなテラヘルツ光源として注目されている[1]。これまでの研究で、RTD 発振器は単一周波数の狭線幅テラヘルツ光注入による注入同期[2]や、自己注入によるマルチモード同期発振[3]など、様々な注入条件における発振状態の変化が確認されてきた。これらの現象を非線形光学応答として捉えそのメカニズムを理解することで、RTD 発振器の発振状態を制御できるようになると期待できる。それによってモード同期したコム動作を実現することができれば、RTD 発振器によるテラヘルツ帯での周波数標準機の実現が期待できる。そこで本研究では、RTD 発振器に外部から2つの異なる周波数の狭線幅テラヘルツ光を注入し、その時の RTD の発振スペクトルを観測することで非線形光学応答を調べた。

実験では、フォトミキシングに使う一方の光をマッハツェンダ干渉計によって搬送波抑圧両側波帯変調することにより、2つの周波数の注入テラヘルツ光を発生した。図1(a)はRTD発振器の自由発振スペクトル(青)および、注入テラヘルツ光を入れた時のスペクトル(赤)である。注入光と同じ周波数のd0, u0モードに加えて、多数のモードが新たに生成された。d0, u0モードの線幅は1 Hz以下の狭線幅であることから、2つのモードが同時に注入同期されたことがわかった。d1,d2,d3,u1,u2,u3モードは等間隔に生成されていることから、d0, u0モードの四光波混合により生成されたと考えられる。ラベルなしのモードは、搬送波が両側波14 dB下に弱く存在することから現れたモードである。

図1(b)は各モードのピーク強度を縦軸、d0モードのピーク強度  $I_{d0}$  を横軸にとった両対数プロットである。どのモードもべき乗則に従うが、ある閾強度でべきの値が変わることがわかった。この閾強度の近傍で注入同期モードd0, u0の出力が飽和することから、注入同期の飽和と関連した現象であることがわかる。閾強度以下では、各モードの強度依存性は、d0, u0モードの四光波混合の強度依存性に従う。一方、閾強度以上では四光波混合の強度依存性よりも高次の非線形性が見られた。

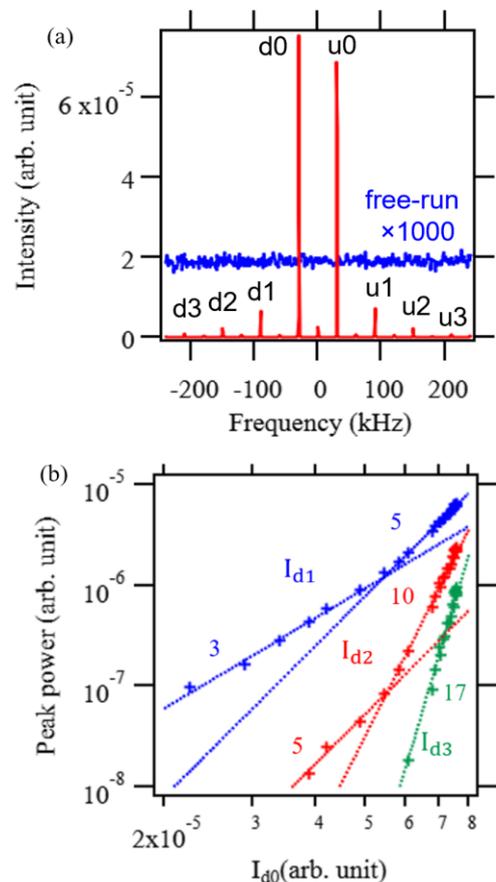


Fig.1 (a) Spectrum of RTD w/ inj. (red) and w/o inj. (blue) (b) Dependence of each mode intensity on d0 mode's intensity.

## References

- [1] M. Asada and S. Suzuki, *Sensors* **21**, 1384 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041384>]
- [2] T. Hiraoka, T. Arikawa et. al., *APL Photonics* **6**, 021301 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0033459>]
- [3] T. Hiraoka, Y. Inose et. al., *Nat Commun* **13**, 3740 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31071-3>]

# 全ファイバー型磁気光学 Kerr 効果測定装置の開発と実証

## Developments and verifications of the all-fiber magneto-optical Kerr-effect interferometer

固体量子物性研究室  
Quantum Materials Lablatory

山根 聡一郎  
Soichiro Yamane

**Abstract** We construct all-fiber zero-area-loop Sagnac interferometer (AFZALS) in order to study time-reversal symmetry breaking (TRSB) of unconventional materials. We evaluate our AFZALS by detecting clear ferromagnetic transition of SrRuO<sub>3</sub> film. We also investigate time-reversal symmetry of the charge ordered state in CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> and observe TRSB signal.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

数学における位相幾何学 (トポロジー) の概念は、物性物理学において物質の状態を記述する新しい基本原理の一つになりつつある。トポロジーと結びついた物性を発現するトポロジカル物質は、時間反転対称性などの対称性の有無で分類される。従って、時間反転対称性の破れ (TRSB) を検出することは、トポロジカル物質の発見やさらなる応用への重要な糸口となる。

磁気光学 Kerr 効果測定法は、物質の磁化の大きさや方向 (符号) に依存した反射光の偏光方向の変化 (Kerr角度) を通じて物質の TRSB を検出できる手法である (Fig. 1)。しかし、例えば、TRSBを示すトポロジカル超伝導体 (カイラル超伝導体) の局所磁化に起因する Kerr角度は非常に小さい。そのため、このような測定においては、相対論的效果に起因する微小なノイズ等をも排除できる zero-area-loop Sagnac干渉計が用いられている[1]。我々はこの手法の安定性や操作性を格段に向上した、「全ファイバー型」の超高感度 Kerr 効果測定法 (AFZALS) の装置開発を行い、トポロジカル物質における TRSBの有無を探っている。

我々の AFZALS は最低温 1.8 K、最高磁場 11 T の冷凍機と組み合わせる。この干渉計の評価として、SrTiO<sub>3</sub> 基板上的強磁性体薄膜 SrRuO<sub>3</sub> の磁気 Kerr 効果測定を行った。140 K で明瞭な強磁性転移を観測し (Fig. 2)、zero-area-loop Sagnac干渉計を用いた先行研究[2]と矛盾のない結果が得られた。

CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> は 2019 年に発見された、V イオンが形成する理想的なカゴメ格子を持つ金属である[3]。この物質は 95 K に電荷密度波 (CDW) 転移を起こし、更に温度を下げると 3 K 以下で超伝導が発現する。この CDW 状態では、カゴメ格子内にカイラルループカレントが生じることに起因した TRSB が理論的に予想されている[4]。我々は、このカゴメ物質に対して AFZALS を用い、磁気 Kerr 効果測定を行った。磁場下では、CDW 転移の磁化変化に対応する Kerr 角度の飛びが観測された。ゼロ磁場では、トレーニング磁場の方向に依存する有限の Kerr 角度が観測された。このことから、我々の結果は CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> の CDW 状態が TRSB を有すること示唆している[5]。

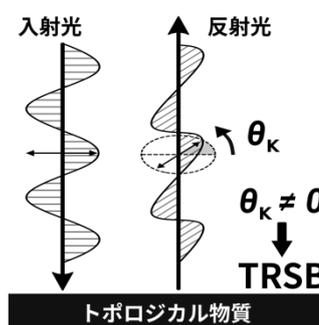


Fig. 1 Scheme of the magneto-optical Kerr effect.

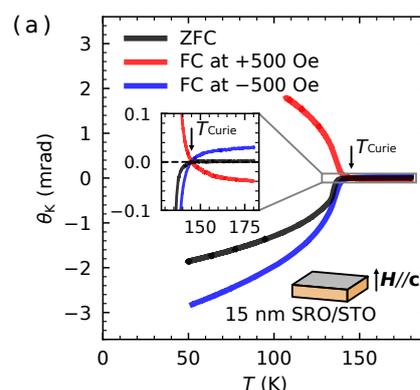


Fig. 2 Ferromagnetic transition of SrRuO<sub>3</sub> measured by AFZALS.

### References

- [1] J. Xia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).
- [2] J. Xia *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 062508 (2006).
- [3] B. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Materials **3**, 094407 (2019).
- [4] X. Feng *et al.*, Sci. Bull. **66**, 1384 (2021).
- [5] Y. Hu, S. Yamane *et al.*, arXiv:2208.08036 (2022).

# 新物理探索に向けた イッテルビウム原子の新時計遷移の観測

量子光学研究室 石山泰樹

**Abstract** We observed and investigated a new clock transition  $^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2$  ( $J=2$ ) in neutral ytterbium atoms. This transition is theoretically estimated to be highly sensitive to several kinds of new physics, and our observation paves a new way for new physics search by low-energy precision measurements.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

標準模型は、素粒子物理学実験で観測されたほとんどの現象を説明する理論モデルである一方で、不完全であることも知られている。これまで、高エネルギー加速器実験[1]から低エネルギーでの精密測定[2]まで、様々な手法で標準模型を超える新物理の探索が行われてきた。精密測定のうち特に高い精度を誇るのが、原子の狭線幅光学遷移（時計遷移）の遷移周波数を高精度に測定する光原子時計であり、その相対不確かさは  $10^{-18}$  に達している[3]。これまで光原子時計は、超微細構造定数の恒常性の検証による超軽量暗黒物質の探索や、局所ローレンツ不変性の検証、電子・中性子間の新湯川型相互作用の探索[4]など、様々な新物理探索実験に活用されてきた。新物理探索の精度をより向上させるためには、測定精度の改善と合わせて、これらの新物理に高い感度をもつ原子遷移を用いることが重要である。

このような背景のもと、イッテルビウム（Ytterbium, Yb）原子の準安定状態  $4f^{13}5d6s^2$  ( $J=2$ ) が新物理探索に有望であると提案された[5, 6]。基底状態  $4f^{14}6s^2$   $^1S_0$  間の光学遷移は自然幅約 0.8 mHz の時計遷移であり、Yb の他の時計遷移  $^1S_0 \leftrightarrow ^3P_0$ ,  $^3P_2$  よりも細く将来の精密分光に向けて高いポテンシャルを持つ (Fig. 1 (a))。また、超微細構造定数の時間変化や、局所ローレンツ不変性の破れ、電子・中性子間の新湯川型相互作用などに高い感度を持つことが予想されている。

そこで本研究ではYb原子の新時計遷移  $4f^{13}5d6s^2$   $^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2$  ( $J=2$ ) の共鳴探索を行い、世界初となる直接観測に成功した (Fig. 1 (b))。さらに、将来の新物理探索実験に向けたいくつかの測定を行った。まず、精密分光において特に重要である魔法波長の探索を行い、797 nm, 834 nm 周辺に魔法波長を発見することに成功した。魔法波長とは、基底・励起状態に対して等しいライトシフトを与えるレーザー光の波長のことであり、魔法波長のレーザー光をトラップ光として用いることでトラップによる周波数シフトを抑制することができる。また励起状態の寿命測定も行い、その下限値を1.9(1) s と定めることに成功した。対応する自然幅の上限値は約80 mHz であり、将来の精密分光が可能であることを示す重要な結果である。最後に、これらの実験結果を踏まえ、具体的な新物理探索実験についても検討する。

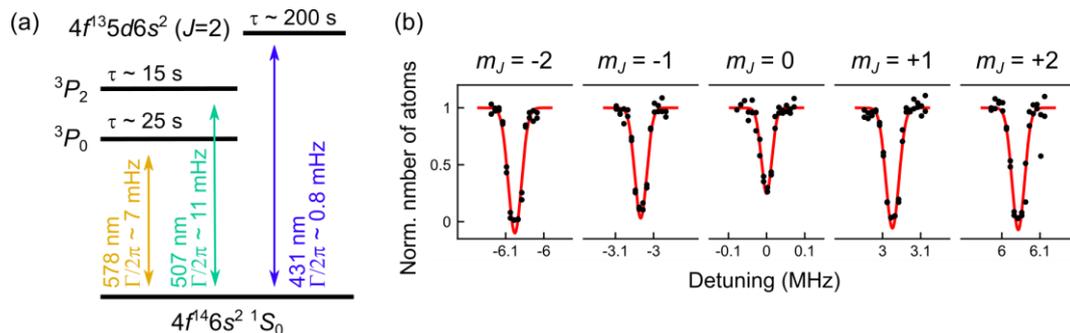


Fig.1 (a) Energy diagram of neutral Yb atoms including three clock transitions. (b) Excitation spectrum of  $^{174}\text{Yb}$ . 5 resonances correspond to 5 magnetic sublevels  $m_J$  in the excited state.

## References

- [1] P. A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), PTEP 083C01 (2020).  
 [2] M. S. Safronova *et al.*, Rev. Mod. Phys. **90**, 025008 (2018).  
 [3] A. D. Ludlow *et al.*, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015).  
 [4] K. Ono *et al.*, Phys. Rev. X **12**, 021033 (2022). [5] V. A. Dzuba *et al.*, Phys. Rev. A **98**, 022501 (2018).  
 [6] M. S. Safronova *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 173001 (2018).

# 自己駆動液滴クラスタの秩序と運動

時空間秩序・生命物理研究室 大元隆史

**Abstract** We observe a cluster of swimming water-in-oil droplets and measure inside flow of each droplet to determine respective swimming directions. In a cluster of two droplets, they swim in anti-parallel or towards each other. This relation is consistent with the result in a cluster of three approximately.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

油 (Squalane) に界面活性剤 (Monolein) を臨界ミセル濃度以上に溶かし、その中にマイクロスケールの純水滴を作成すると、水-油界面に生じた界面活性剤分子の濃度勾配によりマランゴニ流が生じ、水滴は自発的に並進運動する [1] [2]。このようなマランゴニ流に駆動される液滴が、重力などの影響で固体壁や気液界面付近に複数存在すると、数個～数十個からなるクラスタを形成することがある [3]。また、このクラスタの回転運動の有無がクラスタの規模とペクレ数によって決まるという報告もなされている [4]。一方で、クラスタ中の各液滴の振る舞いについては十分な理解が得られていない。これは液滴の相互作用が流体力学的なものだけでなく、界面活性剤等の濃度場を介しても起こるためである。そこで本研究では、主に3個からなる小規模クラスタを作成し、クラスタ中の液滴の内部対流、特に液滴の速度を決定する双極子流を観測することで、これを明らかにしようと試みた。

まず、2個の液滴からなるクラスタを作成し、その運動と各液滴内部の双極子流の向きを顕微鏡観察およびPIV解析を用いて同時観測した。その結果、この系でも運動について回転型と非回転型が存在し、また双極子流の向きは回転型では互い違いな反平行に揃い、非回転型では向きが振動するが平均的には互いに向き合う方向に揃うことが観測された。3体クラスタについて同様の実験を行うと、やはり回転/非回転の違いが見られ、双極子流の向きは回転型では各液滴の速度の向きとほぼ一致し、非回転型ではクラスタの重心に向かう方向を概ね中心として振動が見られた。

これらの結果から、液滴の相互作用は2体間においてはそれぞれの双極子流の向きを互い違いの反平行(回転型)、または互いに向き合う反平行(非回転型)に揃えるように働き、3体間においては各ペアについて同様の相互作用を重ね合わせたものとみても矛盾しないように思われる。実際の相互作用は流れ場と濃度場がカップリングした非線形相互作用であり重ね合わせは成り立たないが、クラスタ内液滴の双極子流の向きを議論する限りではこの単純なモデルが適用できる可能性がある。これを検証するため、3つの内1つの液滴の大きさを変えた非対称3体クラスタ (Fig. 1) を作成し、対称の場合と比較した。その結果、クラスタの形状を変えることで双極子流の揃い方がずれる傾向が見られ、そのずれ方はペア相互作用の重ね合わせによる予測と定性的に一致した。

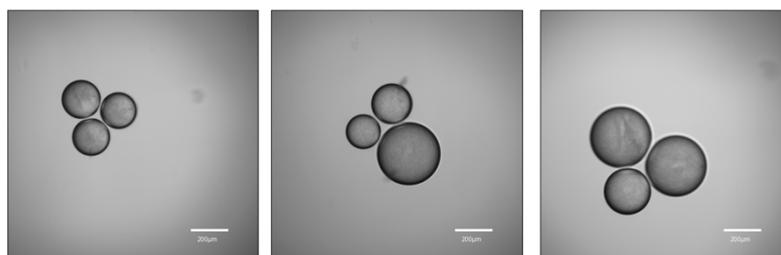


Fig. 1. Images of symmetrical (left) and asymmetrical (center, right) clusters. The scale bar indicates 200 $\mu$ m.

## References

- [1] Z. Izri *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 248302 (2014).
- [2] S. Suda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 088005 (2021).
- [3] C. Krüger *et al.*, Eur. Phys. J. E **39**, 642016(2016).
- [4] B. V. Hokmabad *et al.*, Soft Matter **18**, 2731-2741 (2022).

# 空間光変調器を用いた単一イッテルビウム原子の光ピンセットアレイトラップ

量子光学研究室 草野透志

**Abstract** We report on the trapping, cooling, and imaging of single Ytterbium atoms in optical tweezer arrays. Utilizing Spatial Light Modulator, we successfully generate  $> 100$  sites of optical tweezer arrays with various geometry. We demonstrate single-atom imaging with a fidelity of  $> 0.995$  and a survival probability of  $> 0.90$ .

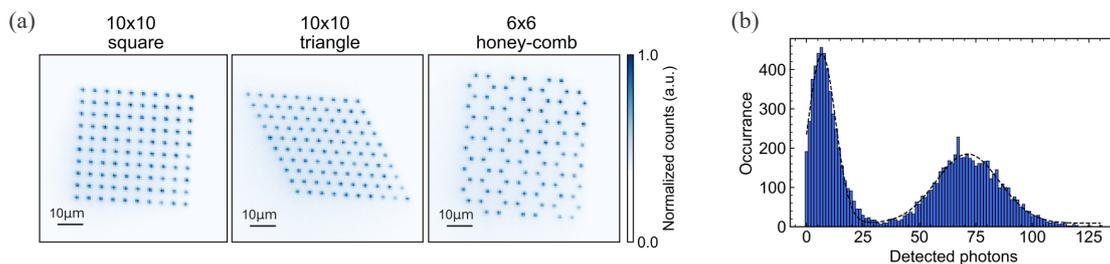
© 2023 Department of Physics, Kyoto University

光ピンセットアレイシステムは単一中性冷却原子の観測と制御が可能であり、また、この系で主量子数の大きい電子軌道状態であるリドベルグ状態間に働く相互作用を制御することで、量子もつれ状態の生成が可能となる。こうした利点から、この系は量子シミュレーションや量子計算、精密測定に対して有力なプラットフォームとして注目されている[1]。特に量子計算の分野では、この量子もつれ状態は2量子ビットゲート操作に利用される[2]。近年アルカリ原子を用いた系で、他の超伝導やイオントラップの系にはない、空間自由度の高さを活かした量子誤り訂正符号の生成が報告されている[3]。

我々はアルカリ土類様原子であるイッテルビウム (Yb) 原子を用いた量子計算機の開発を行っている。従来の中性原子型量子計算に用いられているアルカリ原子と違い、2電子原子である Yb 原子には準安定状態  $^3P_0$ ,  $^3P_2$  が存在し、リドベルグ状態のトラップが可能であるという利点がある。我々はこれらの特色を活かした高忠実度な量子計算の実現を目指し、音響光学偏向器 (AOD) を用いた単一原子トラップとリドベルグ状態の分光を行った[4]。しかし、AOD を用いた光ピンセットアレイには原子数を拡張することの難しさと空間自由度の少なさに課題があった。

本研究では、これらの課題を克服するために空間光変調器 (SLM) を用いて光ピンセットアレイの系を構築し、約 100 サイト以上からなる2次元アレイトラップを実現した。アレイの形状は正方格子だけではなく三角格子やハニカム格子など様々な幾何学的構造に構成可能であり、実際、我々はそれらのアレイ中における単一 Yb 原子のトラップおよび蛍光イメージングに成功した (Fig. 1)。また、イメージングの忠実度および生存率の評価を行い、忠実度は 0.995 以上、生存率は 0.90 以上であることを確認した。

各サイトに単一原子が捕捉される確率は 50 % 程であり、欠損のないアレイを作るためには再配列が必要である。我々は再配列のためのアルゴリズムとフィードバックシステムの構築を行い、再配列に必要な時間のシミュレーションを行った。さらに、SLM と AOD を組み合わせた欠損のない光ピンセットアレイトラップの実験も進めている。



**Fig.1 (a)** Averaged fluorescence images of single  $^{174}\text{Yb}$  atoms in various geometric arrays. **(b)** A histogram of fluorescence photons for a  $10\times 10$  square array. The right (left) peak represents single-atom fluorescence (background signal).

## 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] D. Bluvstein, *et. al.*, *Nature* **604**, 451-456 (2022).
- [4] D. Okuno, *et. al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 084301 (2022).

# 混合溶媒中の高分子電解質が形成する メゾスケールパターン

相転移動力学研究室 松原大

**Abstract** We study mesoscopic pattern formation of weakly charged polyelectrolytes in binary mixture solvents by means of field theoretic polymer simulations. Competition between long-ranged electrostatic repulsion and short-range molecular attraction leads to a variety of mesoscopic patterns. We discuss the dependences of composition, interaction parameters and ionic strength on the pattern.

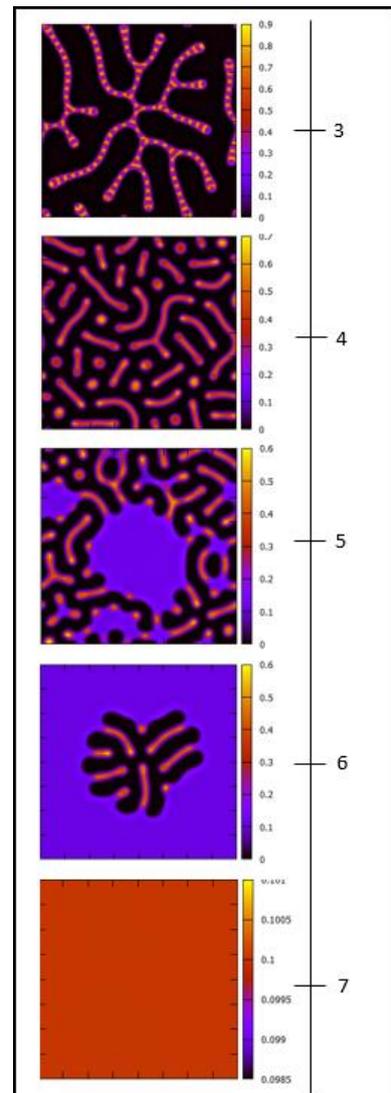
© 2023 Department of Physics, Kyoto University

高分子系はミクロからマクロまで多様な空間スケールを持つ相分離構造を示す。特にジブロックコポリマー-溶融体系[1, 2]や貧溶媒中の高分子弱電解質系[3]はナノ構造への応用が期待されている[4]。ナノ構造を調べるにあたり計算機シミュレーションは有効な手段であるが、高分子電解質系は鎖に沿って近距離の相互作用と遠距離の相互作用が同時に存在することに加え、空間的な遠距離相互作用であるクーロン力を考慮しなくてはならない。それゆえメゾスケールで密な高分子電解質系の性質を調べるには、通常の分子動力学シミュレーションでは計算コストが大きすぎる[5]。以上の理由から本研究では、高分子鎖を経路積分によって記述する Field theoretic polymer simulation[6]を用いて、混合溶媒中の高分子電解質系がつくるメゾスケールパターンを計算した。高分子電解質鎖のモデルは連続 Gauss 鎖として、溶媒-高分子相互作用は Flory Huggins 理論を用いて記述する。

混合溶媒中の高分子弱電解質が生成するメゾスケールのパターンに対する系の組成、相互作用パラメーター、加塩量の影響について、構造因子などを用いた解析を行った。Fig.1 は、混合溶媒中で高分子電解質とより高い親和性を持つ溶媒(o 溶媒)の割合を変化させた場合の高分子電解質密度の図である。このような主要なメゾ相の移り変わりについては自由エネルギー変化を計算し、相の移り変わりに関する各相互作用の寄与について考察を行う。

## References

- [1] F. S. Bates and G. H. Fredrickson, *Physics Today* 1999, **52**, 32-38.
- [2] N. A. Lynd, *et al.*, *Prog. Polym. Sci.* 2008, **33**, 875-893.
- [3] E. E. Dormidontova, *et al.*, *Macromol. Theory Simul.* 1994, **3**, 661-675.
- [4] I. Vukovic, *et al.*, *Polymer*. 2013, **54**, 2591-2605.
- [5] G. H. Fredrickson, *The Equilibrium Theory of Inhomogeneous Polymers*, *Oxford University Press*, 2013.
- [6] V. Ganesan and G. H. Fredrickson, *Europhys. Lett.*, 2001, **55**, 814-820.



**Fig.1** Change of the phase pattern against the composition of the o-solvent

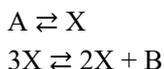
# 確率的反応拡散系が示す相共存状態

非線形動力学研究室 柳澤優介

**Abstract** For a stochastic reaction-diffusion system, we conjecture that the phase coexistence condition for the deterministic limit of the stationary state is different from that for the stationary solution of the equation in the deterministic limit. We numerically confirm this conjecture by analyzing a coupled Schlögl model.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

化学反応に起因する各物質の濃度ダイナミクスがもたらす豊かな時空間構造は物理学の立場から研究されてきた[1]。濃度ダイナミクスを取り扱う方法として、マスター方程式を用いた確率過程による記述がある。この方法においてシステムサイズが無限大の極限を考えることで、決定論的なレート方程式が得られる。ところで、濃度ダイナミクスの長時間極限での振る舞いをマスター方程式により解析するとき、二つの極限の順序に応じて異なる結果が導かれる化学反応モデルが知られている。そのような例として、双安定性を示す Schlögl モデルが挙げられる[2]：



ここで A, B の濃度 a, b は固定されており、X の濃度のダイナミクスを考える。このモデルの定常濃度をレート方程式の定常解として求めると、初期条件に依存した双安定性を示す解が得られる(Fig.1.青線)。一方でマスター方程式の定常分布から濃度の期待値を計算すると、システムサイズ  $\Omega$  に依存した結果が得られる(Fig.1)。ここで  $\Omega \rightarrow \infty$  の極限を考えると、定常濃度はある地点  $b^*$  において不連続な跳びを示すが、レート方程式の解析ではこの跳びを記述することはできない。

このように特異な振る舞いを示す Schlögl モデルに対して一次元空間に広がった反応拡散系を考える。決定論的な反応拡散方程式による記述では、レート方程式の右辺の積分から決まるポテンシャルの極小点が入れ替わるパラメータ値  $b_{\text{det}}$  において、空間内に高い濃度と低い濃度が共存する状態が実現する(Fig.2.橙線)。ここで  $b_{\text{det}} \neq b^*$  に注意したい。それに対して、確率的反応拡散系において  $\Omega \rightarrow \infty$  の極限で相共存が実現する条件は  $b = b^*$  と予想される(Fig.2.緑線)。

この予想を示すために本研究では、Schlögl モデルに従って反応が生じる反応槽を二つ並べて、それらに間に拡散的相互作用を導入したモデルを数値的に解析する。二つの反応槽の間で相共存が実現するための条件を具体的に求めると、 $b = b^*$  を支持していることがわかる。

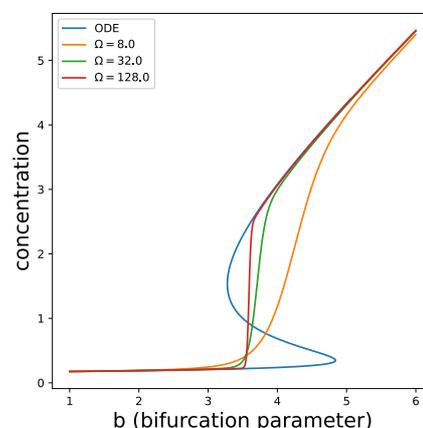


Fig. 1. Stationary concentration for a Schlögl model.

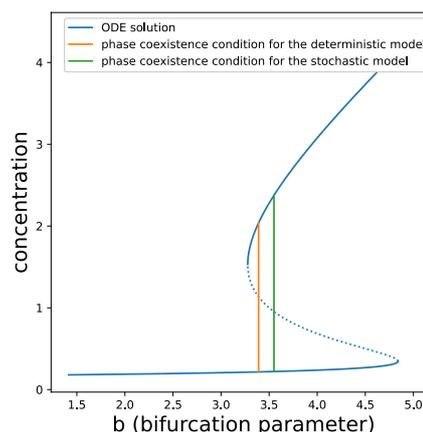


Fig. 2. Phase coexistence condition for a bistable reaction-diffusion system.

## References

- [1] G. Nicolis and I. Prigogine, “Self-Organization in Nonequilibrium Systems”, John Wiley & Sons (1977).
- [2] F. Schlögl, “Chemical Reaction Models for Non-Equilibrium Phase Transitions”, *Z. Physik.* **253**, 147-161 (1972).

# 気液相共存系における不純物効果と非平衡効果

非線形動力学研究室 横田和磨

**Abstract** We study gas-liquid phase coexistence systems by employing molecular dynamics simulations. In the first part, we quantitatively confirm that impurities modify the phase diagram following the thermodynamic consideration. In the second part, we observe emergence of a dynamical state under shear, which provides a problem in the hydrodynamic description.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

気液相共存系では体積が変化しても系の圧力が一定に保たれるなど相共存由来の特異な性質を示す。この特異性のために、系に対する摂動が大きな影響を及ぼす可能性がある。例えば、不純物を加えた系では沸点が変化することが知られている [1]。また、熱伝導下では気液界面の温度が平衡系の転移温度からずれることが示唆されている [2]。本研究では熱力学や流体方程式及び分子動力学シミュレーションを用いて気液相共存系の特異的な性質を議論し、不純物の混合やせん断による非平衡性が気液相共存系にどのような影響を与えるかを理解することを目標とする。

前半では、不純物混合平衡系に対して熱力学の変分原理と分子動力学を用いて不純物効果を議論する。まず不純物が各相で希薄という条件の下で不純物混合によって生じる圧力変化や不純物と溶媒の存在比で成り立つ関係式から、溶媒が van der Waals 状態方程式に従う系に対して具体的に相図を作成し、気液相共存状態での系の圧力が温度のみでは決まらないことを示す。次に定温定積環境下で様々な不純物濃度の系の分子動力学を行い、各相での溶媒、不純物濃度や圧力を測定し、熱力学から導かれる関係式と分子動力学の結果が一致することを示す。更に混合による自由エネルギー変化が van der Waals 状態方程式に対応していると仮定し、van der Waals パラメーターの推定を行う。

後半では、壁面に速度差を与えた分子動力学を用いてせん断流下気液相共存系を再現し、せん断流系での非平衡効果を議論する。まず定常状態での系の性質を調べる。様々な壁面速度での気液相共存定常系の応力や運動論的温度を測定し、系の運動論的温度が気相と液相で異なる値を取り、速度揺らぎの強度が異なることを示す。次に定常状態の気液相界面の配置の安定性についても調べる。せん断流下の流体方程式の定常解の一つである壁面速度方向に平行な界面配置を初期条件として与えて分子動力学を行う。このとき、壁面速度方向の長さが速度勾配方向の長さよりも大きい系ではFig. 1の様非定常状態が出現し、この状態が長時間維持される。この結果と流体方程式の関連について考察する。

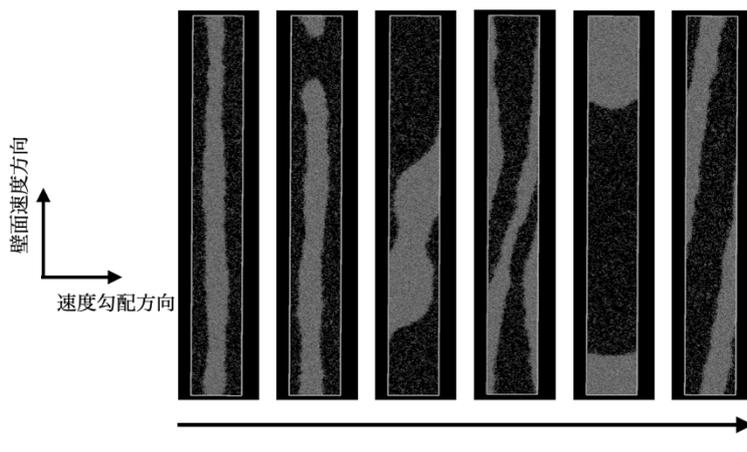


Fig. 1. Time evolution of particles in a gas-liquid phase coexistence system under shear. The system exhibits a dynamical state.

## References

- [1] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Statistical Physics*, (Pergamon Press Oxford, 1958).
- [2] N. Nakagawa and S. -i. Sasa, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 260602 (2017).

# 1次元構造体における組み立ての難しさ

非線形動力学研究室 小林郁海

**Abstract** Toward the fundamental law on the time required for material synthesis, we study the assembly process of one-dimensional structures. For each of three different setups, we derive a fundamental limit on the number of operations required for the assembly process.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

多数の部品からなる構造体を組み立てる作業を考える。例えば、高分子・超分子の合成や、コロイド粒子の自己組織化などがその例である。これらの系において、複雑な構造を持つ物質を高速かつ大量に組み立てることは困難である。より一般に、物質の組み立て操作に要する時間には、何らかの普遍的な限界があることが推測される。このような組み立て作業に要する時間についての法則を定式化することが目標である。

計算理論と物理学との関わりを探求する中で、物質をある状態から別の状態へと移行させるのに必要な操作の回数に基づいて物質の複雑さを特徴づけようとする試みが行われてきた [1, 2]。本研究も、これらの先行研究と類似の動機を持っている。すなわち、部品がバラバラに存在する状態から、組み立てが完了した状態へと系を移行させるために必要な操作の回数に着目する。一般の物質合成プロセスに要する時間についての基本法則を明らかにするために、まずは簡単な設定における組み立て作業の原理的限界を理解することが重要である。

本修士論文では、1次元構造体の組み立て作業を3つの異なる設定で考え、それぞれの系における原理的限界について述べる。第2章では、1次元ヘテロポリマーの合成を考察する。2種類の単量体の重合プロセスを質量作用則に従う決定論的なレート方程式でモデル化する。外部には操作者がいることを想定し、単量体の濃度は時間的に自由に制御することができる。このとき、単量体の濃度をどのように操作しても、一定量の分子を合成するのに要する時間にはそれよりも短くすることができない限界が存在することを示す [3]。

第3章では、組み立て作業における並列化について考察する。ここでいう並列化とは、部品を同時並行で組み立てた後に、それらを組み合わせて最終製品を完成させることを指す。並列化により、組み立て作業の効率化が図れる。ここでは、最小の手数で組み立てを行う場合と、ランダムな結合反応によって組み立てを行う場合の2つの設定を考える。並列化がどの程度達成されているかを特徴づける並列化効率  $\eta$  を導入すると、システムサイズ無限大の極限では系のパラメータを連続的に変化させたときに  $\eta$  が非解析的な変化を示す。このことから、この系において 並列化可能/不能 の相転移が起こることが分かる。この結果は、並列化によって効率的な組み立てができる状況とできない状況の違いを特徴づけている。

第4章はやや数理物理的な章である。第3章で扱った最小の手数で組み立てを行うモデルの解析を行い、この系に相転移が存在することを厳密に証明する。転移点の左側と右側それぞれにおいて異なる手法を用い、並列化効率  $\eta$  を不等式で評価する。そして、システムサイズ無限大の極限において、 $\eta$  がゼロになるパラメータ領域と  $\eta$  がゼロでない有限値を取るパラメータ領域がそれぞれ存在することを証明する。これらの3つの結果は、物質合成の難しさをいくつかの異なる側面から特徴づけており、より一般的な理論への足掛かりとなることが期待される。

## References

- [1] C. H. Bennett, “Logical depth and physical complexity”, in Herken, Rolf (ed.), *The Universal Turing Machine: a Half-Century Survey*, Oxford U. Press, (1988).
- [2] J. Machta, “The computational complexity of pattern formation”, *J Stat Phys* **70**, 3 (1993).
- [3] I. Kobayashi and S. -i. Sasa, “Characterizing the Asymmetry in Hardness between Synthesis and Destruction of Heteropolymers”, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 24 (2022).

# スカーリングで生じる渦と手部間の相互作用の数値解析

流体物理学研究室 明石大輝

**Abstract** To clarify the mechanism of generating the lift force by sculling in human swimming, we numerically study sculling motions with an immersed boundary method. Specifically, we examine effects of reattachment of a previously generated vortex onto the hand (so-called wake capture). We observe the pressure decrement where the wake capture occurs, resulting in the lift increase.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

様々な水泳競技で用いられるスカーリングという水中動作がある。これは手のひらを8の字を描くように動かすことで、揚力を得る動作である。競泳では、スカーリングがクロール泳におけるプル動作に関係があるとき、*「水を掴む」*練習に用いられてきた。シンクロナイズドスイミングにおいては、身体姿勢をコントロールし、揚力を作り、推進させる動作であり、必要不可欠な技術である [1, 2]。

水槽実験の結果として、スカーリングの非定常な推進機構の一つに wake capture 効果が提案されている [3]。これは、手を体から離すようにかく際に剥離した渦が、続けて起こる手を体に近づける動きによって手部に接近し、手と相互作用を行うことで推進力を得るという機構である。もともと wake capture 効果は昆虫のはばたきで見られるもので [4]、スカーリングは生物飛翔に類似した流体力学的な効果によって推進力を得ていると結論されている。

本研究では、スカーリング動作を模した数値計算を埋め込み境界法を用いて行い、非定常的な流体力学効果を定量的に評価した。特に、wake capture が生じるか否かを確認し、その際の流れの様相や流体から受ける力の変化について着目した。具体的には、2次元空間内の楕円軌道運動、3次元空間内での楕円軌道運動、8の字軌道運動、渦輪と物体の衝突シミュレーションを行った。

3次元での8の字軌道運動では、物体の後流に放出された渦層に再び衝突する様子を観測することができた (Fig.1)。ここでは、物体と渦層の衝突を wake capture と呼ぶことにする。wake capture が生じる際の表面圧力変化 (Fig.2) を見ると、渦層と直接衝突が起きている点付近の圧力 ( $p_{06}, p_{07}, t \sim 1.5$ ) が、衝突が起きていない時 ( $t \sim 0.5$ ) の圧力に比べて低下していた。同時に物体にかかる上向きの力 (揚力) の増加も生じていた。これは渦層と物体が相互作用し、物体上面の圧力が低下したためだと考えられる。したがって、wake capture 効果により、揚力の増加が生じたと考えられる。さらに、実際のスカーリング動作における圧力測定実験をプールで行い、数値計算と対応させ比較した。

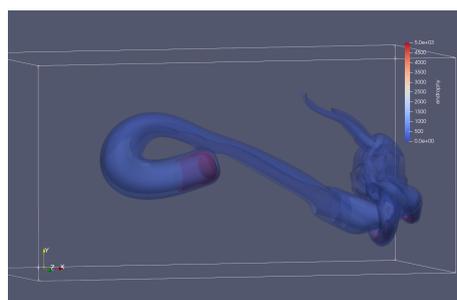


Fig.1 Iso-surfaces of the squared vorticity at the wake capture event

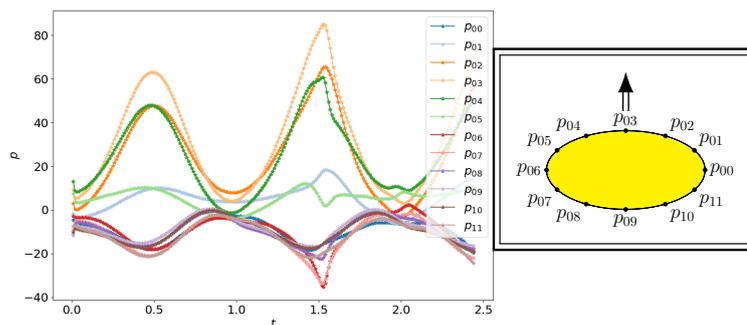


Fig.2 The pressure measurement positions (right) and time series of surface pressure (left). The wake capture occurs at  $t \sim 1.5$ . The arrow indicates the direction of travel.

## References

- [1] 三輪飛寛ほか. 可視化情報学会論文集, Vol. 31, No. 8, pp. 33–33, 2011.
- [2] 本間三和子. 体育科学系紀要, Vol. 29, pp. 1–14, 2006.
- [3] Hideki Takagi, et al. *Human movement science*, Vol. 38, pp. 133–142, 2014.
- [4] Michael H. Dickinson, et al. *Science*, Vol. 284, No. 5422, pp. 1954–1960, 1999.

# STM 測定によるKitaev 候補物質 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> 原子層膜の電子状態の研究

量子凝縮物性研究室 芥川 聖

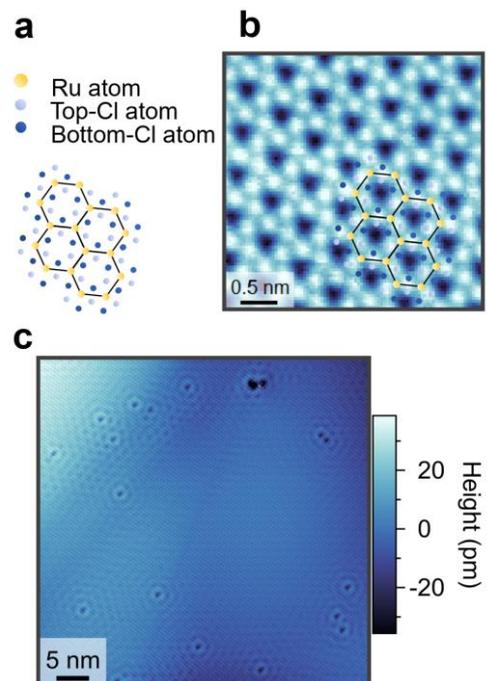
**Abstract** Here we report the results of STM/STS measurements on monolayer thin films of Kitaev material candidate  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>. Long-wavelength oscillations around Ru defects are clearly observed, but no dispersion relationship was found for long-wavelength oscillations. These results demonstrate long-wavelength oscillations are unprecedented in any insulating materials.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

2006年にKitaevによって提案されたスピン1/2の二次元ハニカム模型では、基底状態に厳密解を持つ量子スピン液体状態が実現する[1]。また、この系ではトポロジカル量子計算への応用が期待されるマヨラナ粒子や非可換エニオンが生じる。このようなKitaevスピン液体の候補物質の1つとして層状物質である $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>(Fig. 1a)の研究が活発に行われており、既に興味深い結果が報告されている。例えば、磁場中の $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>にて半整数量子ホール効果が観測され、これがKitaev模型からも予想されるカラルマヨラナエッジ流とバルクに非可換エニオンが存在することを示唆すると考えられる[2]。一方で、トポロジカル量子計算へと展開させるためには、非可換エニオンを直接検出することが必要不可欠である。そのようななか、微視的手法である走査型トンネル顕微鏡(STM)により、金属基板上に成長させた単原子層膜において微分コンダクタンス測定を行うことにより、非可換エニオンを直接検出可能であることが理論的に指摘されている[3]。

我々は非可換エニオンの直接検出を目的として、パルスレーザー堆積法によって作製した単原子層 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>薄膜を真空輸送し、STM測定を行った。その結果、Fig. 1bのようなSTM像が得られた。そしてSTM像における輝点は $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>の上面にあるCl原子におおよそ対応する。このように、我々は $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>の作製およびSTM測定に成功した。さらに作製した $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>の薄膜を調べていくと欠陥が存在し、各欠陥周りに長周期の構造が見られることが分かった(Fig. 1c)。この欠陥はSTM像で見られる対称性からRuサイトの欠陥である可能性が高く、理論的に予測されるマヨラナに関するスペクトルの比較において有効的な構造であると考えられる。また、この欠陥周りのみで生じている長周期構造について、微分コンダクタンスマップの測定を行うと、正バイアスと負バイアスで周期が変わるものの、分散関係はほとんど見られなかった。

観測された長周期構造は、電荷密度波(CDW)や準粒子干渉(QPI)などでは説明が困難なものであり、シンプルな電子状態を示したものではないと考えられる。Kitaevスピン液体における創発準粒子に由来する可能性も存在し、大変興味深いものである。



## References

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
- [2] T. Yokoi *et al.*, Science **373**, 568-572 (2021).
- [3] M. Udagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 127201 (2021).

Fig.1 a: The model of  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>. b: Topography of  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>. V=1V, I=300pA. c: Topography of  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> in large scale (50nm×50nm). V=1V, I= 500pA.

# 第二種超伝導体における渦ガラス転移への 渦格子融解転移の影響

凝縮系理論研究室 ムンチョット ナラティップ

**Abstract** We examine decreasing of the resistance due to the vortex glass transition in a clean type II superconductor based on the microscopic analysis for the Ginzburg-Landau model. The vertex correction reflecting the effects of the vortex lattice freezing to the random potential is evaluated using the parquet diagram resummation technique.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

十分高磁場に置かれた第二種超伝導体において、熱平衡状態では磁束の渦格子という秩序相がある。もし磁場に垂直な低電流を流せば、三次元系では渦格子融解転移が示せ、ゼロ直流抵抗も示す。ところが、この相では厳密には位相コヒーレンスが壊れている。また、渦糸格子に不純物や欠陥といった乱れがあれば、たとえそれが弱くとも、渦糸の位置の長距離秩序も壊れている。

以上述べたような従来の長距離秩序を持たない超伝導相を理解する処方の一つは渦ガラスという秩序の導入である[1]。渦ガラスはスピングラスのアナロジーで、Edward-Anderson (EA) パラメータあるいはその感受率いわゆる渦ガラス感受率で特徴付けられる。実験と繋がるように、渦ガラス感受率を反映できる渦ガラスゆらぎによる直流電気伝導度に着目する。乱れが含まれた Ginzburg-Landau (GL) 理論の範囲で、渦ガラスの感受率は梯子近似の下で評価できる。このとき、乱れ効果を過剰評価しないように、頂点関数を正しく評価する必要がある。そのため、非摂動的な方法が望ましい。そのひとつはパルクダイアグラムの総和 (Parquet diagram resummation) である。この方法は一般的に数値計算ですら難しいが、第二種超伝導体における静的な二次元渦液体相なら数値的に解ける[2]。

本研究では、詳しくは計算されていないが定式化された微視的GL理論[3]に[2]の計算方法を応用して、二次元と三次元での渦ガラスゆらぎによる電気伝導率の評価を試みた。得られた結果は、EAパラメータのゆらぎを本研究ではガウス近似でのみ扱っているため、図1(a)のように二次元系の場合でも有限温度において直流電気抵抗がゼロになる。しかし、図1(a)の実線から見て取れるように、電気抵抗率は外磁場を減らすにつれて緩やかに減少し、渦格子融解転移が抵抗率曲線に反映されない。この特徴は超伝導薄膜における電気抵抗率の測定結果に通常見られ、したがって我々の計算はこの特徴を掴めたことになる。一方、三次元系の場合は図1(b)の実線から見て取れるように、高温側の抵抗は渦格子融解の転移磁場付近でキックを伴って消失する。これもまた、高温超伝導体YBCOなどの電気抵抗の測定結果に通常見られる特徴と一致する。

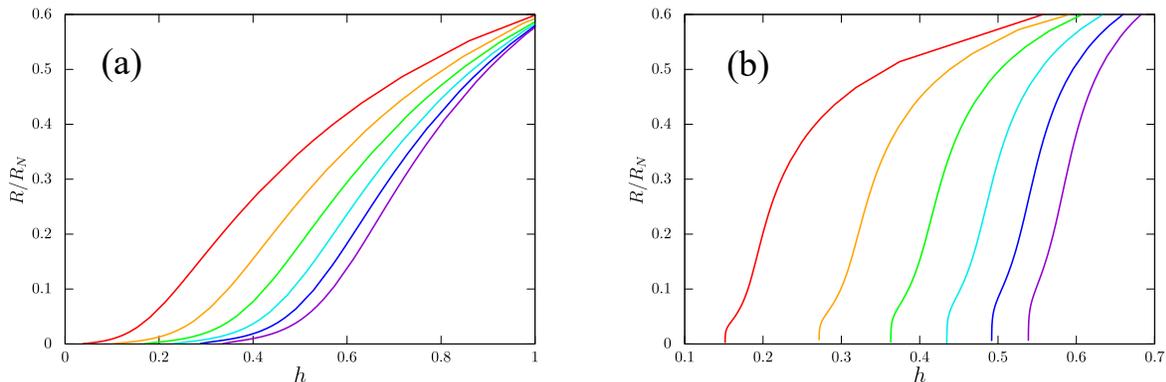


Fig. 1. Magnetic field  $h$  dependence of the resistivity  $R/R_N$  at each temperature for a given disorder strength. (a) and (b) show corresponding curves of 2D and 3D systems, respectively. Temperatures decrease from left to right.

## References

- [1] D. S. Fisher, M. P. A. Fisher, and D. A. Huse, Phys. Rev. B 43, 130 (1991).
- [2] J. Yeo and M. A. Moore, Phys. Rev. B 54, 4218 (1996).
- [3] R. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 3998 (1996).

# $d$ 波超伝導体 $\text{CeCoIn}_5$ の三色超格子における 非相反輸送測定

量子凝縮物性研究室 浅枝寛人

**Abstract** We measured nonreciprocal electrical transport on tricolor superlattices  $\text{YbCoIn}_5(3)/\text{CeCoIn}_5(8)/\text{YbRhIn}_5(3)$ , which are non-centrosymmetric superconductors with large Rashba spin-orbit coupling. Nonreciprocal component in resistance  $R_{2\omega}$  exhibits a distinct anomaly in high magnetic field and at low temperatures, indicating the emergence of helical superconductivity.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

空間反転対称性が破れた超伝導体では、従来の超伝導体とは異なりスピニングレットとスピントリプレットが混成したペアリング状態が生じるなど、非従来の超伝導特性を示すことが理論的にも実験的にも示されており、近年重要な研究の舞台となっている[1]。

そのような超伝導体では、磁場中において有限の重心運動量をもつ対形成が起こるヘリカル超伝導と呼ばれる新たな超伝導状態の発現が理論的に提案されている[2]。このヘリカル超伝導は低温高磁場領域で発現されると期待されているが、その検証は実験的に困難であった。この状況を打破する手段として、最近、非相反輸送と呼ばれる実験手法が提案されている[3]。これまで  $s$  波超伝導体を示す反転対称性が破れた超伝導体において非相反輸送測定の実験が行われているものの[4]、ヘリカル超伝導の発現を示す実験結果は未だ報告されていない。そこで我々は、強相関電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  を用いた三色超格子と呼ばれる物質に注目した。この三色超格子では  $d$  波超伝導を示す  $\text{CeCoIn}_5$  反転対称性の破れが人工導入されており、上部臨界磁場の依存性から低温高磁場領域にヘリカル超伝導相がある可能性が指摘されている[5]。しかしながら、通常の超伝導状態からヘリカル超伝導への相境界は明らかになっていない。

以上の背景を踏まえ、我々はヘリカル超伝導相を検出するために三色超格子  $\text{YbCoIn}_5(3)/\text{CeCoIn}_5(8)/\text{YbRhIn}_5(3)$  における非相反輸送測定を行った。その結果、電気抵抗の非相反成分  $R_{2\omega}$  の磁場依存性が、磁場方向によって異なる振る舞いを示すことを発見した。磁場を  $d$  波超伝導のノード方向とアンチノード方向にそれぞれ印加すると、磁場をアンチノード方向にかけたときのみ、非相反成分の磁場依存性に異常がみられた。通常、渦糸由来の非相反輸送測定では磁場方向に関する異方向性は小さく、磁場方向依存した  $R_{2\omega}$  は非従来の効果によるものだと考えられる。この観測結果をもとに、2つの磁場方向での非相反成分の差分  $\Delta R_{2\omega}$  に関する温度磁場相図を作成したものが Fig. 1 である。超伝導状態の低温高磁場付近においてのみ  $\Delta R_{2\omega}$  が大きく増大した。これらの結果は、磁場をアンチノード方向にかけたときのみヘリカル超伝導由来の非相反輸送が大きく増強されていることを示している。

## References

- [1] E. Bauer and M. Sigrist, *Non-Centrosymmetric Superconductors*, Lecture Notes in Physics, 2012.
- [2] D. F. Agterberg and R. P. Kaur, *Phys. Rev. B* **75**, 064511 (2007).
- [3] N. F. Q. Yuan, L. Fu, *PNAS* **119**, 15 (2022).
- [4] F. Ando *et al.*, *Nature* **584**, 373-376 (2020).
- [5] M. Naritsuka *et al.*, *Phys. Rev. B* **96**, 174512 (2017).

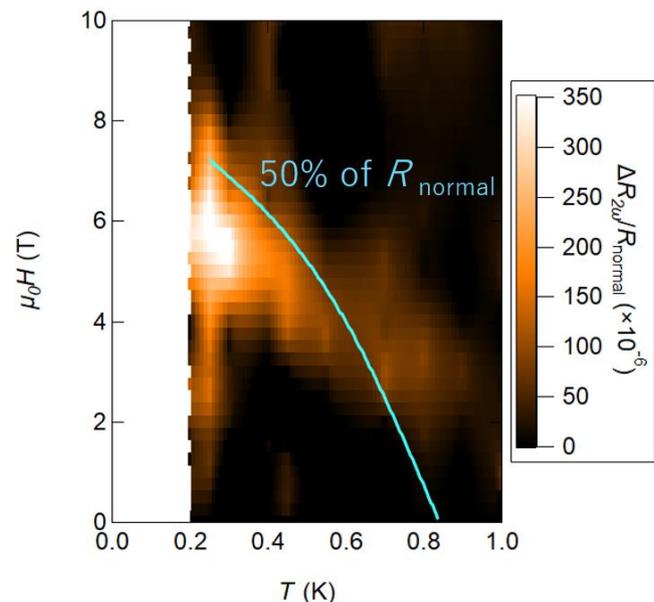


Fig.1:  $H$ - $T$  Phase diagram of the difference of nonreciprocal transport  $\Delta R_{2\omega}$  and superconducting transition line.

# 非エルミート系における、外因性トポロジーに関する研究

物性基礎論:凝縮系物理 田舎和也

**Abstract** We attach a one-dimensional non-Hermitian Hamiltonian with a point-gap topological number to the boundary of one side of a cylindrical 2D Chern insulator. We show that the chiral edge modes can be added and removed extrinsically. Hamiltonian then has a point-gap topological number, which is extrinsic higher-order corner skin modes.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

エルミート系では並進対称性を持った格子系において、Nielsen-Ninomiya の定理が知られている [1]。この定理は、異なるカイラリティを持ったギャップレスモードが必ずペアで現れ総和が0となることを保証する。また  $d$  次元系のバルクで特徴づけられるトポロジカル数が  $d - 1$  次元系において現れる、表面状態の個数に対応することをバルク-エッジ対応 [2] という。この二つの定理によって  $d - 1$  次元のカイラルなモードを実現できる単独の  $d - 1$  次元格子模型は存在せず、より次元が上の模型のエッジモードとしてしか実現できないことが保証されている。

しかし非エルミート系においては Hatano-Nelson 模型など周期的境界条件下でカイラルモードが存在し、Nielsen-Ninomiya の定理が破れる場合がある。この場合は、非エルミート系に適切に拡張された、拡張 Nielsen-Ninomiya の定理が知られている [3]。非エルミート系でも複素平面上全体で数えると、異なるカイラリティを持ったギャップレスモードは必ずペアで現れている。しかし、 $\text{Im}E < 0$  の部分はダイナミクスとして消失するので、 $\text{Im}E > 0$  の部分でフェルミ面を横切るようなモードのみがダイナミクスとして残り、カイラルモードを実現でき、そのモードが点ギャップトポロジカル数と結びつくというのが定理の主張である。つまり、非エルミート系では  $d - 1$  次元のカイラルなモードを実現できる単独の  $d - 1$  次元格子模型が存在する。

エルミート系では表面状態の操作によってエッジモードを消したり作ったりすることが出来ない (バルクの性質のみで表面状態が決まる) ことが知られているが、この非エルミート  $d - 1$  次元カイラルモードを、 $d$  次元系の表面に直接加えることで、外因的にエッジモードを消したり、追加したりできることが期待できる。

本研究では、二次元系において一方向にのみ周期的境界条件を課した絶縁体の片側の端に、点ギャップトポロジカル数を持つ一次元模型を直接貼り付けることで、外因的にエッジモードを足したり消したりできることを示した。この場合に、系は点ギャップトポロジカル数を持ち、それが外因的な高次コーナー表皮モードと呼ばれる、非エルミート系特有のモードが出現することを数値的に示した。更に、Chern 絶縁体の表面に貼り付ける一次元系が点ギャップトポロジカル数を持たない場合でも同様の現象が起こり得ることを示した。具体的には、片側の端に on-site の散逸  $iy$  のみを持つ一次元模型を貼り付けることにより、エッジモードの一部に負の虚部が現れる (Fig. 1-a)。これにより (一次元模型そのものは点ギャップトポロジカル数を持たないにも関わらず) 系全体が点ギャップトポロジカル数を持ち、前述の模型と同様に、高次コーナー表皮モードになっている (Fig. 1-b) ことを示した。

## References

- [1] H.B. Nielsen and M. Ninomiya, Nuclear Physics B, **185**, 20 (1981).
- [2] M.Z. Hasan and C.L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [3] Takumi Bessho and Masatoshi Sato, Phys. Rev. Lett. **127**, 196404 (2021).

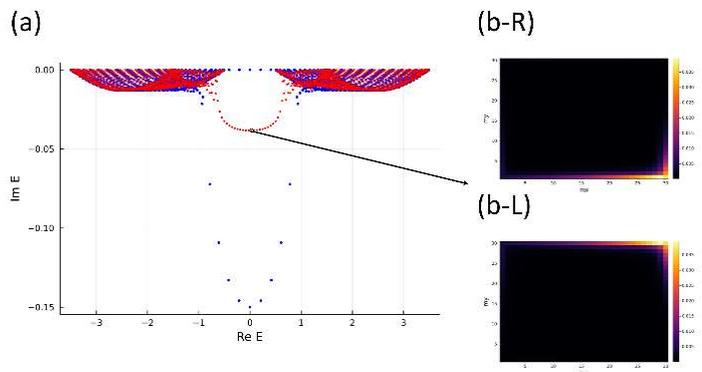


Fig. 1 (a) x-OBC y-PBC spectra are shown as blue. Full OBC spectra are shown as red. (b-R) Right eigenstate of a non-Hermitian skin mode. (b-L) Left eigenstate of a non-Hermitian skin mode.

# 強相関電子系における波数空間上の量子計量とチャーン数の関係

凝縮系理論研究室 柏原昂紘

**Abstract** Using Green's functions, we introduce a generalized quantum metric (GQM) on the Brillouin zone for correlated electron systems. We prove that the GQM is equivalent to the existing definition in free systems and positive semi-definite. We demonstrate that the GQM can detect topological phase transitions in the correlated Qi-Wu-Zhang model.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

現代の凝縮系理論においては、物理学の幾何学的側面が重要な役割を果たす。最も重要な幾何学的量の一つは、チャーン数に寄与するベリー曲率である。そのベリー曲率と対をなすのが量子計量であり、量子幾何テンソルの虚部がベリー曲率、実部が量子計量となっている。量子計量は数学的には「計量」と呼ばれる半正定値対称テンソルであり、パラメータ空間上に距離を定義する。相互作用の無い系においては、様々な物理量に量子計量が現れることが知られており、運動量空間上の量子計量とトポロジカル不変量との関係も指摘されている。特に、量子幾何テンソルの半正定値性を応用することで、量子計量とチャーン数の関係が詳しく調べられている[1]

ところで、電子系のトポロジーは、相互作用がある場合にも盛んに研究されている。その際に用いられる手法の一つは、チャーン数などのトポロジカル不変量をグリーン関数で記述するというものである。相互作用の効果はグリーン関数の自己エネルギーとして取り入れることができる。

一方で、波数空間上の量子計量については、相互作用がある系への拡張が文献[2]において提案されているものの、その定義はブロッホ波動関数を用いており、相互作用の効果をも十分に反映したものとは言えない。ひねり境界条件に基づく量子計量は相互作用がある場合にも基底状態の波動関数を用いて定義できるが[3]、一般の系で基底状態を求めるのは困難である。しかし、強相関系においても一粒子状態は物理量に寄与するはずであるから、この状態を用いた量子計量を定義すれば、強相関系を調べる一つの道具として役立つと期待できる。

そこで、本研究では、すでに知られている光学伝導度と量子計量の関係[3]を用いて、運動量空間上の量子計量を相互作用がある場合に拡張する (Generalized Quantum Metric、以下 GQM) [4]。この GQM は一粒子グリーン関数で記述される光学伝導度に基づいている。GQM は一般にブロッホ波動関数ではなくスペクトル関数の固有状態を用いて表されるから、系の一粒子状態の情報をよく表している。我々は、自由な系において GQM が既存の量子計量に一致することと、GQM が半正定値性を持つことを解析的に示した。したがって、GQM は既存の量子計量の拡張になっており、数学的にも計量としての性質を満たしている。さらに、チャーン絶縁体のモデルとして知られる Qi-Wu-Zhang (QWZ) モデル[5]に局所的な斥力相互作用を加えたモデルに対して GQM を数値的に計算し、GQM が相互作用のある場合にもトポロジカル不変量と関係があることを示した。相互作用がある場合の自己エネルギーを得る際には動的平均場理論 (DMFT) と数値繰り込み群 (NRG) を用いた。この結果から、GQM は一般の系でトポロジーを判定するのに役立つと期待される。

## References

- [1] T. Ozawa and B. Mera, Phys. Rev. B 104, 045103 (2021)
- [2] W. Chen and G. von Gersdorff, SciPost Phys. Core 5,040 (2022)
- [3] I. Souza, T. Wilkens, and R. M. Martin, Phys. Rev. B 62, 1666 (2000)
- [4] T. Kashihara, Y. Michishita, and R. Peters, arXiv e-prints, arXiv:2211.07924 (2022)
- [5] X.-L. Qi, Y.-S. Wu, and S.-C. Zhang, Phys. Rev. B 74,085308 (2006)

# 超伝導体における非線形光学応答

凝縮系理論研究室 田中大登

**Abstract** The unique nonreciprocal responses of superconductors, which stem from the Cooper pairs' quantum condensation, have been attracting attention. In this paper, we study the mechanism and condition for second-order optical responses of time-reversal symmetric superconductors. The coexistence of intraband and interband pairing is necessary for the second-order superconducting optical responses.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

量子物質の複雑な秩序状態を調べるうえで様々な種類の光学的な測定がされてきた。特に非線形光学は物理学における主要な分野の一つであり、その応用性の高さから基礎科学から応用技術までの広範な分野で多くの注目を集めている。一方で超伝導体はクーパー対の量子力学的な凝縮によって引き起こされる独特な電磁気学的特徴を一般に持ち、またその中には複雑な秩序状態を示すものも多く存在することが知られている。従って、超伝導体の非線形光学応答が新たな光電変換素子の基本原理や超伝導体の対称性を調べるための有益なプローブとなることが期待される。

空間反転対称性がない系では2次の非線形光学応答が起こるが、その代表的なものとして光ガルバニック効果と第二次高調波発生が知られている。光ガルバニック効果は光誘起の直流電流が発生する現象であり、超伝導体では散逸ゼロの光電変換素子の基本原理として期待される。第二次高調波発生は周波数 $\omega$ の光を物質に入射するとその倍の周波数 $2\omega$ の光が発生するという現象で、複雑な秩序状態をもつ超伝導体の微視的なパリティの破れに対する有益なプローブとして利用されている[1]。

最近、超伝導体における2次の非線形光学応答の理論が定式化された。しかしながら、具体的な計算は副格子自由度を持つ複雑なBdGハミルトニアンにおいて数値的に行われた[2]のみである。そのため、超伝導という現象がどのように非線形光学応答に影響するのか、という基本的な問題すら明らかとなっていない。そこで、標準的なモデルにおける超伝導非線形光学応答の包括的な解析を行うことにした。

本研究では、単バンドの標準的なモデルを用いて、超伝導体における2次の非線形応答について調べた[3]。反対称スピン軌道相互作用の存在を仮定し、系統的に超伝導非線形光学応答を解析する。ここでは超伝導によって誘起される非線形光学応答が確認されるが、ペアポテンシャルの条件によりその効果は消失する場合がある。数値的及び解析的な計算により、超伝導体により誘起される2次の非線形光学応答に対して intraband pairing と interband pairing の共存が必要であることを示す。本研究は超伝導非線形光学の基本要素を同定するものであり、この結果は重い電子系や2次元電子系などの様々な空間反転対称性がない超伝導体に対して広く成り立つと考えられる[4]。

## References

- [1] J. Orenstein *et al.*, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **12**, 247 (2021).
- [2] H. Watanabe *et al.*, *Phys. Rev. B* **105**, 024308 (2022).
- [3] H. Tanaka *et al.*, arXiv: 2205.14445.
- [4] *Non-Centrosymmetric Superconductors: Introduction and Overview*, edited by E. Bauer and M. Sigrest, *Lecture Notes in Physics* Vol. **847** (Springer, Berlin, 2012); Y. Saito *et al.*, *Nat. Phys.* **12**, 144 (2016).

# 運動学的ダイナモのラグランジュ記述による最適化

流体物理学研究室 松村智己

**Abstract** We numerically study a kinematic dynamo problem of the ideal magnetohydrodynamics using the Cauchy integral. This formulation leads to optimizations of the initial magnetic field that maximizes its growth rate. We solve the optimization problems for the Arnol'd-Beltrami-Childress flow and identify the structure behind the largest growth rate.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

ダイナモ問題とは、導電性流体が回転や対流を通じて、磁場を増幅させ維持する過程を説明するものである。現象としては主に惑星や恒星の巨大磁場の存在を説明するのに用いられ、磁気流体力学 (MHD) 方程式に基づく研究が行われてきた [1]。

通常のダイナモでは磁場と速度場を力学変数として扱い、流れから磁場への作用と Lorentz 力による磁場から流れへの作用の両方を考慮する。他方で、本研究で扱う運動学的ダイナモでは流れを所与のものとし、流れから磁場への作用のみを考える。こうした速度場の典型的な設定が Arnol'd-Beltrami-Childress(ABC) 流であり、これは Euler 方程式の定常解の 1 つである。特に、磁気 Reynolds 数  $R_m \rightarrow \infty$  での漸近挙動を明らかにすることは、運動学的ダイナモの古典的な重要問題の一つである [2, 3]。

本研究では、 $R_m = \infty$  である理想 MHD に対して、ABC 流ダイナモの磁気成長率をある積分時間  $t$  秒後に最大化する初期磁場はどのようなものか? という問を立て、2 種類の最適化を行った。

(i)Lagrange 流体力学の基礎定理である Cauchy 積分を用いた反復法を開発し、ソレノイダル条件を満たし、局所的な磁気強度の増幅率を各格子点で最大化する初期磁場を数値的に構成した。構成された初期磁場には ABC 流の淀み点を節にもつ骨格構造が見られた (Fig.1)。

(ii) 空間積分量である磁気エネルギーを最大化する初期磁場を構成するため、(i) の反復法の改良を試みた。この場合、構成された初期磁場は磁気強度が最大の増幅率をもつ流体素片の初期位置に局在する。

磁場の誘導方程式の線形性から、磁気エネルギーは  $e^{2\gamma t}$  に比例すると考えられる。この指数  $\gamma$  が磁気エネルギー発展の指標であり、最適化 (i) では  $\gamma = 0.4$ 、最適化 (ii) では  $\gamma = 1.4$  であった (Fig.2)。

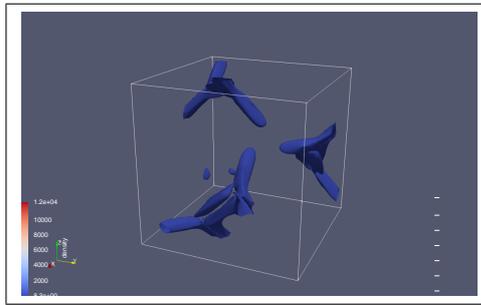


Fig.1 Iso-surfaces of the squared magnetic field obtained in the pointwise optimization

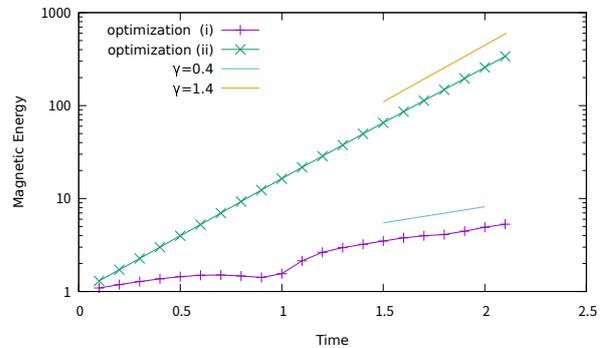


Fig.2 Time evolution of the magnetic energy

## References

- [1] K.Moffatt and E. Dormy, Self-exciting fluid dynamos(Cambridge University Press,2019).
- [2] D. Galloway and U. Frisch, Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 36, 53–83 (1986).
- [3] I. Bouya and E. Dormy, Phys. Fluids 25, 037103 (2013).

# 磁気トルク測定による CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> の 奇パリティネマティック状態の観測

量子凝縮物性研究室 清末俊紀

**Abstract** To investigate the intertwined relation between charge density wave (CDW), nematicity, and time-reversal symmetry breaking in kagomé metal CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub>, we performed magnetic torque measurements. We found nematic transition occurs and time-reversal symmetry is broken below  $T^*=130$  K above CDW transition temperature  $T_{CDW}$ , suggesting the emergent odd-parity nematic phase below  $T^*$ .

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

フラストレート格子の一つであるカゴメ格子は、量子スピン液体や超伝導に加え、トポロジカルに非自明な電子状態といった興味深く多彩な現象を探る舞台として強い関心を集めてきた。そのような中で近年、V原子がカゴメ格子を形成するカゴメ格子金属 AV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> (A = K, Cs, Rb) が発見され、その特異な電子状態が非常に注目されている。AV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub>は電荷密度波 (CDW) 秩序や超伝導を示すことに加え、回転対称性の破れや時間反転対称性の破れた相の存在が報告されている[1,2]。これらの対称性の破れは  $T_{CDW}$  以下で生じることが様々な実験で示されてきたが、実験方法によって転移温度は異なり、特に対称性の破れと CDW との関連性については注目されているもののいまだ解明されていない。理論的研究では、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ状態で議論されているものと類似した、ループカレント秩序によって回転対称性や時間反転対称性を破る可能性が示唆されている[3]。AV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub>の特殊な電子状態に関して包括的な理解を得るためには、熱力学量を用いて対称性が破れる温度を正確に決定する必要がある。

そこで本研究では、面内の回転対称性の破れを高感度で測定できる磁気トルクの精密測定を、カゴメ格子金属 CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> に対して行った。磁気トルクは磁化率の異方性と密接に関係する熱力学量であり、電子系の回転対称性の変化や、相転移の有無を調べるのに有効である[4]。本手法ではピエゾ抵抗式微小カンチレバーを用いることにより、一般的な SQUID 磁束計と比べて数千倍の高感度で磁気異方性を測定できる。面内回転磁場で測定を行ったところ、トルクの2回対称成分が  $T^*=130$  K から低温に向かって増大し、 $T_{CDW}$  で抑制されることを観測した(Fig. 1)。 $T^*$ での2回対称成分の増大は、回転対称性が結晶の  $C_6$  対称性から  $C_2$  対称性に落ちた、電子ネマティック相の出現を示している。また、円錐状に磁場回転させて測定を行った結果、 $T^*$ 以下で時間反転対称性の破れを伴う一次転移を観測し、この信号は  $T_{CDW}$  で抑制されることが明らかになった。以上の結果から、回転対称性と時間反転対称性は  $T_{CDW}$  より高温の  $T^*$ から破れていることが確かめられた。また  $T_{CDW} < T < T^*$ では、ネマティシティ発達の線形な温度依存性およびネマティック感受率が異常を示さないことから、秩序変数が奇パリティであることが示唆され、従来の電荷秩序相とは異なるエキゾチックなネマティック相であると考えられる。

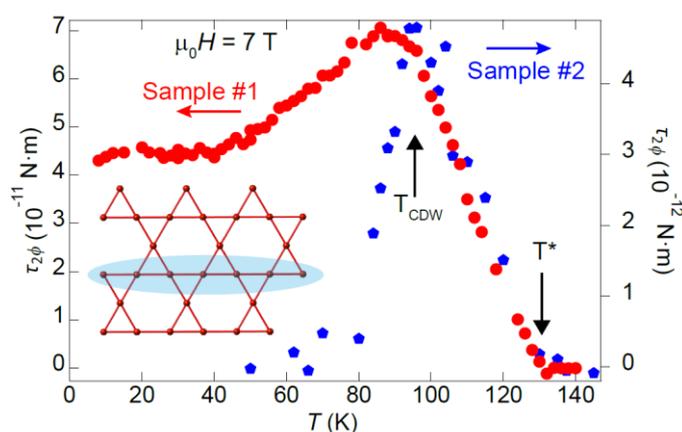


Fig. 1: Temperature dependence of the two-fold sinusoidal component of the magnetic torque.

## References

- [1] L. Nie *et al.*, Nature **604**, 59-64 (2022).
- [2] C. Mielke III *et al.*, Nature **602**, 245-250 (2022).
- [3] R. Tazai *et al.*, Sci. Adv. **8**, eab14108 (2022).
- [4] R. Okazaki *et al.*, Science **331**, 439-442 (2011).

# 脈流に対する繊毛虫の 非線形応答測定と解析手法の開発

時空間秩序・生命物理研究室 小林琢実

**Abstract** We invented dynamics and frequency response of microbial motion under shear flow. Ciliates exhibiting orientation and rheotaxis were measured in a microfluidic device and analyzed their responses in frequency regime. We construct a simple model to explain the characteristic responses of *T. pyriformis* and *P. caudatum* under the flow.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

水中を泳ぐ微生物は低レイノルズ数条件下で効率的に推進する為に様々な方法を編み出している。テトラヒメナやゾウリムシが属する繊毛虫という微生物は、細胞の周りに多数生えた繊毛をそれぞれ高速に殴打させることによって遊泳する。繊毛虫は境界や壁付近に集積することが知られていたが、代表的な繊毛虫の遊泳は Squirmer モデルで Neutral Swimmer に分類されることから、壁付近では流体力学的相互作用により壁から離れる向きにトルクがかかり滞在できないと計算されていた[1]。近年の研究により壁付近で繊毛打を停止させることで逆向きのトルクが生じ、滞在が可能となることが発見され[2]、更に壁付近で流れに反対向きに泳ぐ性質（走流性）もこのトルクバランスによって実現していることが判明した[3]。しかし、これらの研究は定常流れでの走流性であり、時間的にも空間的にも非一様な流れが一般的な自然環境での振る舞いを説明するにはダイナミクス理解が不十分であった。

そこで、本研究は、時間的に向きと強さが  $\sin$  波形で変化する流れを印可し、流れの変化に対する繊毛虫の応答のダイナミクスを計測した。テトラヒメナ (*T. pyriformis*) に  $\sin$  流れを印可したところ、半周期ごとの流れが弱まり向きが変わるタイミングで回転し、常に流れに逆らうように転向することが確認された (Fig. 1)。細胞の画像を元に細胞の頭の位置を特定する画像解析技術を開発し、配向分極を測定することで、そのフーリエ変換から周波数応答を得た (Fig. 2)。基本周波数応答と、三倍周波数応答に含まれる非線形応答の比較からデバイ緩和に近い応答が見られ、共鳴周波数の推定を行った。また、 $\sin$  波の流れの大きさの増大時と減少時との間で走流性を示す細胞の個数に差、つまり、界面とバルクの行き来の差に由来するヒステリシスが存在することが判明した (Fig.3)。また、形状の異なる繊毛虫であるゾウリムシ(*P. caudatum*)との結果と併せて、低レイノルズ数での回転楕円体のせん断応答の理論モデルを用いた数値計算と比較した。

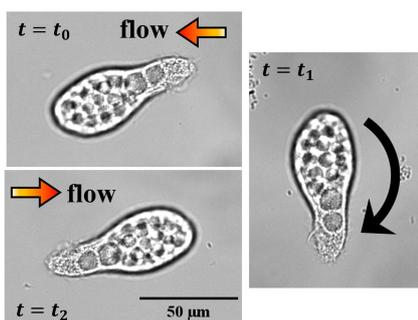


Fig. 1 : Rotation of *T. pyriformis*.

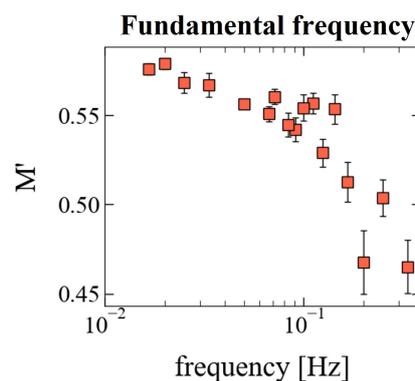


Fig. 2 : Relaxation spectra of *T. pyriformis*.

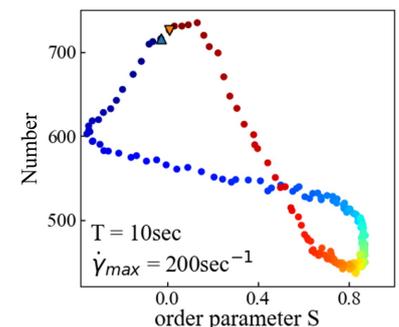


Fig. 3 : Rheotaxis number of cell under sinusoidal flow.

## References

- [1] Gao-Jin Li and Arezoo M. Ardekani. Phys. Rev. E **90**, 013010 (2014).
- [2] T. Ohmura *et al.*, PNAS, **115** (13) 3231-3236 (2018).
- [3] T. Ohmura *et al.*, Sci. Adv. **7**, eabi5878 (2021).

# スピン三重項超伝導体 $\text{UTe}_2$ の 超伝導ギャップ構造

量子凝縮物性研究室 下邨真輝

**Abstract**  $\text{UTe}_2$  is a promising candidate for spin-triplet superconductors. However, the superconducting gap symmetry and the corresponding order parameter remain elusive. Here we perform thermal conductivity measurements using ultra-clean  $\text{UTe}_2$  single crystals. The present results suggest that  $\text{UTe}_2$  is a fully gapped spin-triplet superconductor with helical Majorana surface states.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

スピン三重項超伝導体はマヨラナフェルミオンを創発するトポロジカル超伝導の実現やその量子計算への応用などから大きな注目を集めている。その有望な候補物質が、2018年に発見された重い電子系超伝導体  $\text{UTe}_2$  である。 $\text{UTe}_2$  は磁気秩序を示さないものの、発見当初から U 系強磁性超伝導体である  $\text{URhGe}$  や  $\text{UCoGe}$  などとの類似性から、強磁性揺らぎによる超伝導の可能性が指摘されてきた[1]。実際、リエントラント超伝導やパウリ極限を大きく超える上部臨界磁場などのスピン三重項状態を支持する結果が観測されている。さらに、時間反転対称性の破れを示す実験結果が複数報告されたこと[2,3]から、カイラル超伝導の可能性が指摘されており、エキゾチックな超伝導状態を研究する格好の舞台となっている。

超伝導発現機構や超伝導状態のトポロジカルな性質の解明において超伝導ギャップ対称性が重要であるが、その同定にはいまだ至っていない。ポイントノードの存在を示す実験結果がいくつか報告されているものの、そのノード位置は報告によって様々であり結論が出ていないのが現状である。熱伝導率[4]をはじめ、複数の実験結果から  $B_{3u}$  対称性を持つ超伝導状態の可能性が主に議論されてきたが、非従来型超伝導では不純物効果による影響が大きいため、それによってギャップ構造の決定が妨げられていた可能性がある。実際、 $\text{UTe}_2$  においては試料純度によって、超伝導状態の残留比熱や 2 段階転移の有無が劇的に変化している[5]ため、 $\text{UTe}_2$  の超伝導ギャップ構造を決定する上で、試料純度が極めて重要である。

最近、残留抵抗比が 200 を超え、量子振動が観測された極めて高純度の結晶が作製され[6]、 $\text{UTe}_2$  の本質的な性質が明らかになると期待されている。我々はこのような高純度の結晶を用い、バルクプローブである熱伝導率測定を行うことで、超伝導ギャップ構造を調べた。その結果、熱流を  $a$  軸方向、磁場を  $a$  軸方向及び  $c$  軸方向にかけた際の残留値は低磁場領域で常伝導状態の 1/100 以下と非常に小さいことがわかった (Fig. 1)。この結果は  $a$  軸方向とその周辺にノードが存在していないことを示しており、これまで議論されてきた  $B_{3u}$  対称性を排除する結果である。ナイトシフトの結果と合わせるとフルギャップの  $A_u$  対称性であるという結論に達し、これは超流動ヘリウム 3 の B 相に相当するようなこれまでに前例のない超伝導状態である。フェルミ面が 3 次元の場合、3 次元巻き付き数で特徴づけられる強いトポロジカル超伝導体となり、あらゆる面においてヘリカルなマヨラナ表面状態が現れる[7]ことが示唆される。

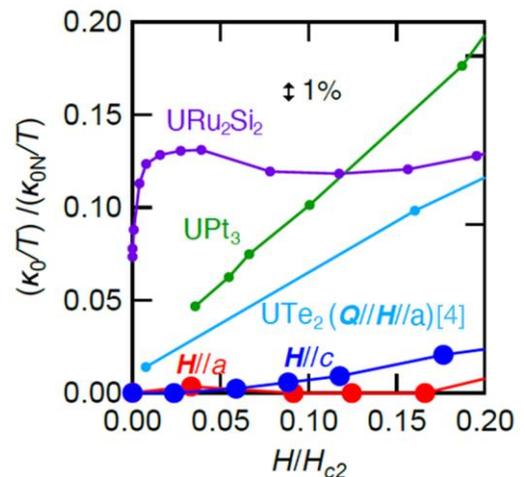


Fig. 1. Field dependence of residual thermal conductivity.

## References

- [1] S. Ran *et al.*, Science **365**, 684 (2019). [2] I. M. Hayes *et al.*, Science **373**, 797 (2021).
- [3] L. Jiao *et al.*, Nature **579**, 523 (2020). [4] T. Metz *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 220504 (2019).
- [5] P. F. S. Rosa *et al.*, Commun. Mater. **3**, 33 (2022). [6] H. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, 073401 (2022).
- [7] J. Ishizuka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 217001 (2019).

# RuCl<sub>3</sub> 原子層膜の成長とナノ構造

量子凝縮物性研究室 田中伊蒨

**Abstract** We have established fabrication method of  $\alpha$  and  $\beta$ -RuCl<sub>3</sub> thin films by pulsed laser deposition. Based on this fabrication method, we succeeded in fabricating  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> monolayer on HOPG substrate and  $\beta$ -RuCl<sub>3</sub> nanowires on graphene substrate.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

2006年、A. Kitaev は 2次元ハニカム格子上の量子スピン系モデル (Kitaev モデル) を提案した。[1] Kitaev モデルの大きな特徴は厳密可解であることである。さらに基底状態は量子スピン液体の性質を示し、励起状態では非可換エニオンと呼ばれる特異な粒子が現れることが示されている。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、Kitaev モデルを実現する物質の探索が精力的に行われている。

層状ルテニウム化合物  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> は 2次元ハニカム構造を持ち、八面体の結晶場下で強いスピン軌道相互作用によって  $j_{\text{eff}}=1/2$  を持つ Mott 絶縁体であり、Kitaev スピン液体の有力な候補物質として知られている。我々の研究グループでは  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> の量子スピン液体状態において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を観測した。[2,3]

非可換エニオンを用いた応用展開において重要な課題となるのは、非可換エニオンを直接的に検出することである。これを実現する手法として、走査型トンネル顕微鏡 (STM)/トンネル分光法 (STS) が提案されている。[4] トンネル電流を測定原理とする STM/STS 測定では試料が原子層膜である必要があるが、純良な原子層膜作製の報告例は殆どなかった。そのようななか、我々の研究グループではパルスレーザー堆積法によるアルミナ基板ホルダーと高配向性熱分解グラファイト (HOPG) 基板上に  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> とその構造異性体である  $\beta$ -RuCl<sub>3</sub> の薄膜作製手法を確立した。

本研究では、確立した作製条件をもとにして原子層膜を作製し、STM 測定を行った。 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> においては  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  以上の範囲にわたり HOPG との高度差が  $0.7 \sim 0.8 \text{ nm}$  ほどの原子レベルで平坦な表面の薄膜成長が確認され (Fig.1 (a)(b))、表面のハニカム構造を観察することができた (Fig.1 (c))。

一方、我々の先行研究で HOPG 基板上の  $\beta$ -RuCl<sub>3</sub> ナノワイヤーの成長を確かめたが、本研究では 6H-SiC 基板上に成長したエピタキシャルグラフェン上にも成長することを確認した (Fig.2)。グラフェンは曲がった SiC 表面にも成長することが知られているが、ナノワイヤーはこの曲面上でも滑らかに成長していることを確認した。

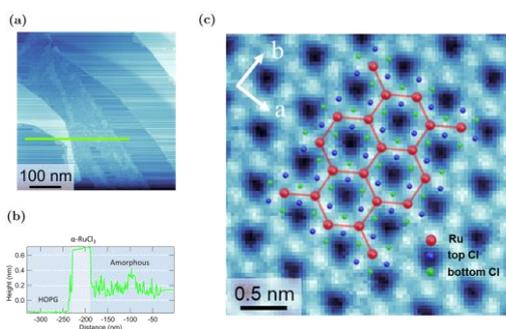


Fig.1 STM topographic images of  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> monolayer film. (a,c)  $500 \times 500 \text{ nm}^2$ ,  $3 \times 3 \text{ nm}^2$ . (b) Line profile on the green line.

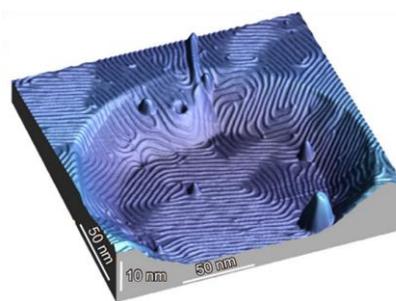


Fig.2 3D STM topographic image of  $\beta$ -RuCl<sub>3</sub> nanowires on the 6H-SiC/graphene substrate.

## 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).
- [4] M. Udagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 127201 (2021).

# 跳水の大域的な流れ構造と動力学の粒子法による解析

流体物理学研究室

戸田 朔

**Abstract** We study two-dimensional hydraulic jumps using the incompressible moving-particle semi-implicit (MPS) method. We have numerically obtained hydraulic jumps whose toe position becomes statistically stationary. These results are consistent with laboratory experiments. We have then constructed the Eulerian velocity fields from the MPS data. Using these detailed velocity profiles, we have analyzed internal structures of the flow.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

跳水 (hydraulic jump) は、上流の高速で浅い流れから下流の低速で比較的深い流れへの急激な遷移現象であり、河川や水路で観察できることもあって古くから研究されている [1, 2, 3, 4]。上流の水深を  $d_1$ 、流速を  $V_1$  とすると、跳水の定性的な振る舞いは流入 Froude 数  $Fr_1 = V_1/\sqrt{gd_1}$  によって分類できることが知られている [3]。しかし、多くのパラメータを持つ複雑な非定常現象であるため、現在でも十分な理解が得られているとはいえない [5]。

本研究では、跳躍位置が時間平均的に静止するような跳水の数値シミュレーションを行なった。このような跳水は既存の室内実験のデータが複数あり、数値計算の結果を実験と比較することができる。2次元気液二層流の時間発展の計算には、粒子法的一种である非圧縮 Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法 [6] を用いた。境界条件として、自由表面、水平な底面、下流での垂直堰、速度を固定した流入、自由流出を用い、跳躍位置が平均的に静止するように初期状態と流入速度を調節した。垂直堰の高さを変更することで、複数の流入 Froude 数について静止跳水を実現することができた。

数値計算の結果の一例を図 1 に示す。解析では、仮想粒子のラグランジュ的な速度場から正方格子点での速度を求めオイラー的な速度場や渦度場に変換した。ある瞬間の速度場を線積分畳込み (LIC) でプロットした結果の例を図 2 に、速度場の時間平均の LIC プロット例を図 3 に示す。このように MPS 法を用いて、比較的低い計算コストで跳水の前後を含む大域的な内部流れ構造が詳細に観察できる。

これらの計算結果を既存の実験結果や古典的な理論と比較すると、上流と下流の水深比などの振る舞いが定量的に一致した。さらに、表面波動の伝播や速度プロファイルを調べて相似則を明らかにすることを試みたので、この結果についても発表会で報告する。

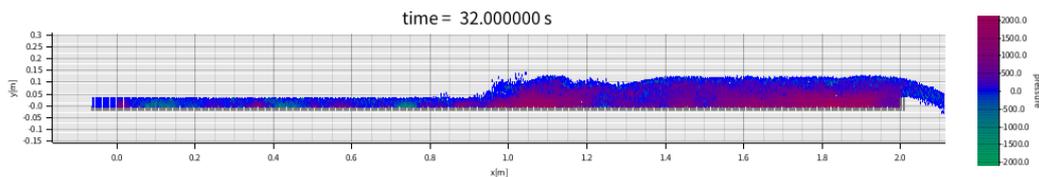


Fig.1 Instantaneous pressure of the virtual particles

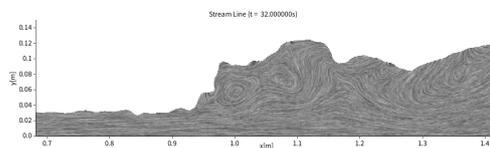


Fig.2 Instantaneous stream lines

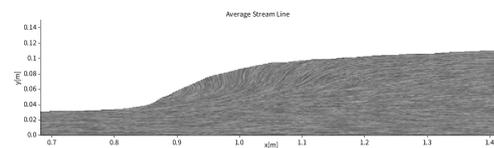


Fig.3 Time-averaged stream lines

## References

- [1] H.Darcy and H.Bazin. *Recherches hydrauliques*. Imprimerie Impériales, Paris, France, Parties 1ère et 2ème, 1865.
- [2] A. M.Binnie, J. C.Orkney, and E. F.Relf. *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 230, No. 1181, pp. 237–246, 1955.
- [3] W. H.HAGER. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [4] G. L.Richard and S. L.Gavrilyuk. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 725, p. 492–521, 2013.
- [5] H.Chanson. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 28, No. 2, pp. 191–210, 2009.
- [6] 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平. 「粒子法入門」. 丸善出版, 2014.

# 空間的に不均一な弾性を有する液晶セルの電気光学応答とサイズ効果

ソフトマター物理学研究室 中山瑛葵

**Abstract:** We generated spatially non-uniform stripe-like flank elastic modulus distributions and studied the electric field response characteristics. It was found that at wavelengths below  $10\ \mu\text{m}$  of the non-uniform elasticity distribution, the response characteristics of the high and low elastic modulus regions were affected by each other, and the dynamics changed. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

【序】ディスプレイに用いられている液晶セルは、電場誘起のフレデリクス転移により光を調光し、駆動電圧と緩和時間は液晶のフランク弾性に依存する。液晶にアゾ化合物を混合した系に励起光を照射すると、アゾ化合物の trans-cis 光異性化により照射領域の配向秩序度が低下しフランク弾性も低下する。本研究では、アゾ混合液晶系に縞状のパターン励起光を照射し、空間不均一な 1 次元の縞状のフランク弾性分布を生成し、液晶セルの電場応答特性に与える効果と、その縞間隔依存性を研究した。

【装置・試料】液晶分子 7CB にアゾ色素 Disperse red 1 を混合し、Twisted Nematic (TN) セルに封入して、偏光顕微鏡で電場印加応答を観察した。その際、任意パターン照射装置を用いて、照射縞状パターンの間隔は  $68.1\ \mu\text{m}$  から  $1.36\ \mu\text{m}$  で変化させ、縞状のパターン励起光を同時に落射照明する。撮影した画像から励起光照射領域と非照射領域における透過光強度の電場依存性と、電場 on-off 時における透過光時間変化の照射縞間隔依存性を、それぞれ照射領域と非照射領域で解析した。

【実験結果】まず、しきい電圧  $V_c$  の縞間隔依存性を Fig. 2 に示す。励起光照射領域における  $V_c^{\text{cis}}$  は非照射領域における  $V_c^{\text{trans}}$  に比べて低下し、縞間隔によらずほぼ一定の値を示す。一方、 $V_c^{\text{trans}}$  は、縞間隔が広い場合は電圧が高いが、照射している縞間隔を狭くしていくと  $V_c^{\text{trans}}$  は低下して  $V_c^{\text{cis}}$  に近づき、縞パターン幅  $2.72\ \mu\text{m}$  では  $V_c^{\text{cis}}$  に漸近する。次に、電場 off 時の緩和時間  $\tau_{\text{off}}$  について縞間隔依存性を、同様にそれぞれ照射領域と非照射領域で解析した (Fig.3)。照射領域における緩和時間  $\tau_{\text{off}}^{\text{cis}}$  は、非照射領域における緩和時間  $\tau_{\text{off}}^{\text{trans}}$  に比べて長い。照射領域の  $\tau_{\text{off}}^{\text{cis}}$  は、縞間隔の減少とともに非照射領域の  $\tau_{\text{off}}^{\text{trans}}$  に漸近して加速されることがわかった。

【結論】縞間隔が十分に広い場合、励起光照射によって異性化した cis 体による配向秩序低下に起因したフランク弾性の低下が  $V_c$  の減少と、復元力の低下による  $\tau_{\text{off}}$  の増大を引き起こすと理解できる。一方、不均一弾性分布の波長が  $10\ \mu\text{m}$  程度以下では、照射領域と非照射領域の応答特性が互いに影響してダイナミクスが変化する。すなわち、電場 on 時は低電圧駆動が可能となった照射領域に助長されて非照射領域でも低電圧で変化が起こり、電場 off 時は非照射領域の強いフランク弾性の助けにより、高速な光の透過が可能となったと考えられる。

## References

[1] Sadaki Samitsu *et al.*, "Molecular manipulator driven by spatial variation of liquid-crystalline order", Nature Materials, 9, 816(2010)

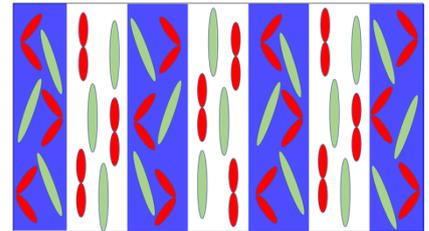


Fig. 1. Non-uniform elasticity distribution is generated by pattern irradiation device. In the blue light irradiated region, the order parameter is lowered due to excited cis-azobenzene.

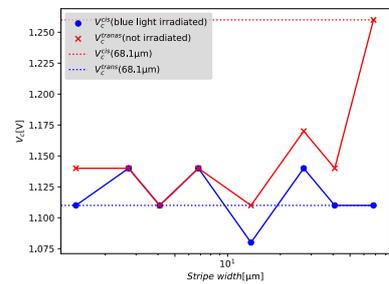


Fig. 2. Stripe width dependence of critical voltage  $V_c$ .

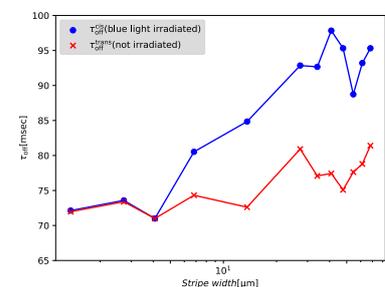


Fig. 3. Stripe width dependence of relaxation time  $\tau_{\text{off}}$ .

# 冷却原子を用いた量子少数系の研究

量子光学研究室 春名 裕貴

**Abstract** Toward the deeper understanding of quantum few-body systems, especially the three-body force, we studied three-body forces for  $^{174}\text{Yb}$  atoms in an optical lattice and find a good agreement between theory and experiments. In addition, we found some  $^{167}\text{Er}$ - $^6\text{Li}$  Feshbach resonances which are expected to reveal novel Efimov states.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

我々は冷却原子系という非常に操作性の高い実験プラットフォームにおいて量子少数系を実現することでその普遍性にアプローチすることを目指しており、特に3体力に着目している。3体力の重要性は、最近、原子核物理において注目を集めている。例えば陽子1つと中性子2つからなる三重水素の束縛エネルギーの実験値は2体力のみを仮定するのでは説明がつかず、3体力を考慮に入れる必要があることが示されている[1]。また、全く別の背景から、ヘリウム4原子核の3体束縛状態がエフィモフ状態として議論されている[2]。エフィモフ状態とは、3つの粒子でつくられる束縛状態であり、離散的なスケール不変性が存在している。本研究では、冷却原子系という、制御性の高い物理系において3体力を統一的に理解することを試みた。

まず、光格子中の原子の3体力に関して実験と理論両面から研究を行った。光格子とは光の定在波によってつくられる格子状のポテンシャルである。文献 [3] の実験で、この光格子にイッテルビウム ( $^{174}\text{Yb}$ ) の基底状態 $^1\text{S}_0$ の原子を導入し、励起状態 $^3\text{P}_2$ に励起させるのに必要なエネルギーを測定した結果、原子が3個入ったサイトの励起エネルギーは単純な2体力の合計を考えただけでは説明がつかなかった。そこで、我々は変分法を用いてトラップ中の相互作用する3原子のエネルギーの計算を行った。図1にその結果を示す。その結果、実験結果のふるまいを定量的に説明することができた。また、この計算は、“原子的な”束縛状態と“エフィモフ”的な束縛状態が同じ光格子系で統一的に理解できることを明らかにしている。

さらに、特に質量比の大きい3粒子のエフィモフ状態の特異性に着目した実験を行った。構成する粒子の質量比が大きいと、そのスケールは小さくなり、より多くの連続したエフィモフ状態を観測しやすくなる[2]。そこで、我々は $^{167}\text{Er}$ と $^6\text{Li}$ という質量比の非常に大きな2種類の原子に着目した。 $^{167}\text{Er}$ と $^6\text{Li}$ に対して $^{174}\text{Yb}$ との協同冷却を行った結果、超低温の混合体を生成することに成功した。そして、磁場を広く掃引することで $^{167}\text{Er}$ と $^6\text{Li}$ のフェッシュバッハ共鳴を観測することに成功した(図2)。観測された共鳴がエフィモフ状態の生成を示している可能性を現在検討している。

本研究は冷却原子系という制御性の高い物理系において3体力の研究を行ったものであり、冷却原子系における量子シミュレーションの研究が、今後原子核物理に適用されることが期待される。

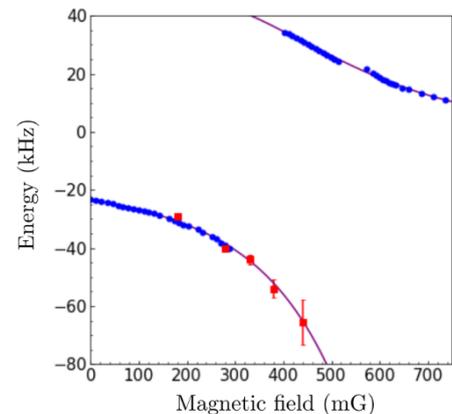


Fig. 1. Three-body bound states for atoms in an optical lattice (purple and blue : theory calculation, red : experiment.)

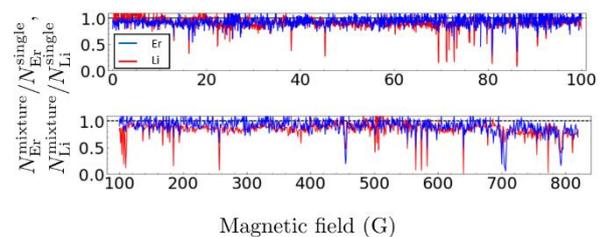


Fig. 2.  $^{167}\text{Er}$ - $^6\text{Li}$  Feshbach resonances.

## References

- [1] A. Nogga *et al.*, Phys. Rev. C. **65**, 054003 (2002) [2] P. Naidon *et al.*, Rep. Prog. Phys. **80**, 56001 (2017)  
[3] S. Kato *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 173201 (2013).

# アゾ混合リオトロピック液晶の光誘起相転移ダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 板東涼

**Abstract** We study photo-induced nematic-isotropic phase transition of azo-doped lyotropic liquid crystal. The objective is to understand the dynamics of photo-induced phase transitions through dynamic light scattering relaxation time measurements. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

【序】アニオン性界面活性剤:SDS とカチオン性界面活性剤:DTAB の混合溶液は低濃度 ( $\phi \sim 8\text{wt}\%$ ) においてもネマチック相 (N 相) を発現する。この系では温度、濃度、会合体の混合比など多くの状態変数によって会合体形状が変化し相転移を起こす。先行研究で、trans-cis 光異性を起こすアゾ化合物を混合 ( $\sim 0.03\text{wt}\%$ ) し、励起光 (UV 光) を照射することで、二次転移の N-I 相転移を起こすことが示されていた。しかしながら、この光誘起相転移は①アゾ化合物が光異性化する応答過程と②cis 体の生成によって会合体が変形する過程の二つの過程で生じると考えられるが、どちらの過程が光誘起相転移の律速か不明瞭であった。本研究の目的は①、②どちらが律速になっているかを明らかにし、光誘起相転移のダイナミクスを調べることでそのメカニズムに迫ることである。

【試料・実験手法】ホスト試料として SDS と DTAB のモル比を  $\alpha=2.7$  (SDS/DTAB) で、精製水に対して濃度  $\phi = 9.0\text{wt}\%$  で作成した。ここに異なるアゾ化合物濃度と種類 (SunsetYellow:0.03wt% (SSY003)、0.06wt% (SSY006)、DisperseRed1:0.03wt% (DR003)) を混合し、①の速度を変化させ律速段階を調べる比較実験を行った。測定は動的光散乱法 (DLS) でブラウン運動に対する緩和時間変化測定 (VV 測定) を温度  $38.5^\circ\text{C}$  で行った。DLS:VV 測定で得られる緩和時間は会合体の流体力学半径と比例関係にあり、会合体の形状を定量的に測定することができる。その後、SSY003 試料を中心に励起光照射時の温度、照射光強度を変化させて DLS:VV 測定を行い、光誘起相転移ダイナミクスの特性を調べた。

【実験結果・考察】準備した三つのアゾ混合試料に対して DLS:VV 測定で得た緩和時間の励起光照射時間依存性  $\tau(t)$  の結果を示す (Fig. 1)。 $\tau(t)$  は、アゾ化合物の濃度、種類に依存しないことが確認できる。つまり観測されている緩和時間の変化は、「アゾ化合物の光異性化応答時間:①」ではなく、「会合体変形:②」に由来するものであると結論され、光を用いて、会合体の変化と N-I 相転移のダイナミクスを観測・議論可能となった。一方、Fig. 2 に SSY003 の DLS:VV 測定で得られた緩和時間の温度依存性を示す。励起光照射時間に対する緩和時間変化 (Fig. 1) と温度に対する緩和時間変化 (Fig. 2) が同様の変化を示すことから、励起光照射により、系に温度変化と同等の変化を誘起できる。さらに SSY003 試料を用い、温度  $38.5^\circ\text{C}$  で測定した  $\tau(t)$  の照射光強度依存性を Fig. 3 に示す。結果から、会合体の変形速度は一定であるのに対し、60 秒程度の照射時間では、照射光強度に依存した異なる会合体形状で安定となることが示された。

詳細は発表会で議論する。

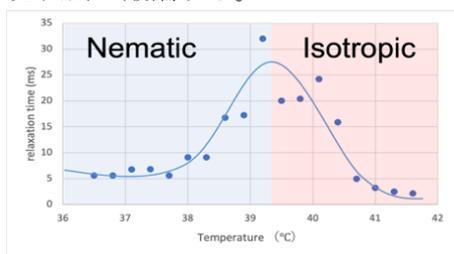


Fig.2 SSY003:Temperature dependence of relaxation time.

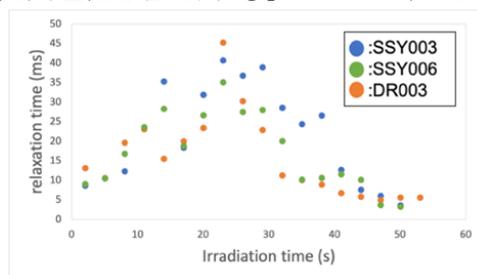


Fig.1 Time dependence of relaxation time under excitation light irradiation at  $38.5^\circ\text{C}$ .

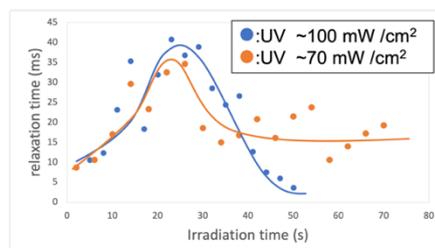


Fig.3 SSY003:Time dependence of relaxation time under two different excitation light intensities at  $38.5^\circ\text{C}$ .

# 励起偏光操作による GaAs からの高次高調波発生制御

ナノ構造光物性研究室 坂本実

**Abstract** We observed that, under a particular excitation strength of mid-infrared laser pulse, the high-order harmonic (HH) generation from GaAs can be enhanced by tuning the ellipticity of excitation pulses. This enhancement is accompanied by the nonlinear optical activity, i.e., HH yields and polarizations depend on the helicity of excitation pulses.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

高次高調波発生(HHG)は、励起光の整数倍の周波数の光を発生する非線形光学現象である。固体からの HHG は固体の周期性や対称性を反映した振る舞いをするため、新たな光源や分光法としての応用が期待されている[1]。近年、絶縁体や半金属において、楕円偏光励起によって HHG 効率が增大することが報告された[2,3]。その起源は、電場によって駆動する電子が隣接する原子を通ることによる再結合率の増加[2]や光電場によるバンド変調[3]など、様々なモデルが提案されているが、未だ統一的な理解には至っていない。本研究では、楕円偏光励起による固体 HHG 増強の詳細な条件と理解を目的として、典型的な直接バンドギャップ半導体である GaAs に対して HHG 測定実験を行った。

実験では中赤外励起光の楕円率  $\epsilon_{\text{exc}}$  に依存した HHG の強度変化や偏光特性を測定した。その典型的な HHG スペクトルを Fig.1 に示す。赤外から近紫外までの幅広い波長領域の高調波が観測された。楕円偏光励起することで、直線偏光励起した時と比べて HHG 効率が增大し、13 次高調波では最大で 2.5 倍の増大が観測された。高次ほど増大率は大きく、また次数ごとに異なる励起強度領域で増大が生じることが分かった。HHG を偏光分解することで、増強が起きる高い励起強度領域では、偏光方向や次数の異なる複数の高調波発生過程が存在していることが確認できるが[4]、励起光の楕円率操作によってこれらの発生過程から生じた高調波成分の比率を制御できることが判明した。こうした高強度領域では、結晶角度依存性の測定から、GaAs が非磁性・非複屈折性であるにも関わらず、円二色性を示すことも明らかにした。高強度励起かつ高次の高調波で現れるこれらの特徴は、バンド端から離れた非調和かつ異方的なバンド領域での電子運動に由来すると考えられる。

## References

- [1] S. Ghimire, and D. A. Reis, *Nat. Phys.* **15**, 10 (2019).
- [2] Y. S. You, D. A. Reis, and S. Ghimire, *Nat. Phys.* **13**, 345 (2016).
- [3] N. Yoshikawa, T. Tamaya, and K. Tanaka, *Science* **356**, 736 (2017).
- [4] F. Sekiguchi, G. Yumoto, H. Hirori, and Y. Kanemitsu, *Phys. Rev. B* **106**, L241201 (2022).

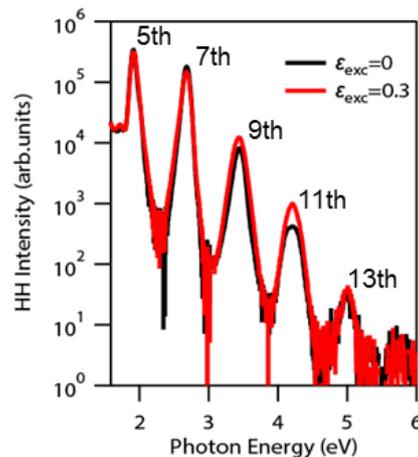


Fig.1. High harmonics spectra of GaAs under 0.36-eV and 8-MV/cm excitation. The black and red curves correspond to the linearly polarized excitation ( $\epsilon_{\text{exc}}=0$ ) and elliptically polarized excitation ( $\epsilon_{\text{exc}}=0.3$ ), respectively.

# 二系統 4f 光学系を用いた $\text{Cu}_2\text{O}$ の和周波分光

光物性研究室 田原圭

**Abstract** We have constructed two-color 4f-systems for a supercontinuum light source to perform sum-frequency generation (SFG) spectroscopy. Using the output beam of an arbitrarily controlled center wavelength and bandwidth, we observe SFG signal resonant to the 1S level of the yellow-exciton series in  $\text{Cu}_2\text{O}$ , and discuss how the signal is generated.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

近年、高強度光源の実現を契機に、非線形光学応答を利用した分光研究が数多く行われてきた。固体表面の状態や電子バンドだけでなく、半導体における励起子(伝導帯へ励起された電子と価電子帯に生まれる実効的な正電荷が束縛された状態にある準粒子)のような共鳴準位に対しても、非線形分光は有用なツールとして活用されている[1]。そのような中、広帯域光源からの光を入射光とし、和周波発生と呼ばれる非線形現象を用いる、新たな分光法が提案された[2]。従来は狭帯域光の波長掃引によって取得していた非線形スペクトルを、広帯域光源によって一度に測定でき、高い信号強度比も期待される分光法である。しかし、この広帯域和周波分光法は考案されたばかりで、励起に用いられる光子エネルギーの組み合わせが一意に定まらないこと、チャープによって波長ごとに異なる時間遅延が付いていて和周波を取ることができるエネルギー差が制限されることなどが課題として存在している。そこで本研究では、広帯域和周波分光法におけるこれらの課題点を解決できると期待される二系統の 4f 光学系を構築し、古くから励起子研究がなされ、新しい分光法の適用に向いていると考えられる  $\text{Cu}_2\text{O}$  を対象物質として、和周波の発生を実証した。

図 1 に、構築した二系統 4f 光学系の概念図を示す。広帯域なスーパーコンティニューム光を短波長域(950 nm 以下, 可視光学系)と長波長域(1100 nm 以上, 赤外光学系)に分け、各波長域に対応した 4f 光学系と呼ばれる光学配置によって、中心波長と線幅を選択したのちに、2 ビームを合わせて出射するという光学系になっている。これによって和周波発生のための特定の二波長を選択し、遅延ステージで光路長差を与えることによって波長依存する時間遅延を補償することができる。可視光学系、赤外光学系のそれぞれから出射される光のスペクトルを評価し、回折格子の回転によって出射光の中心波長を、スリット幅の変調によって出射光の線幅を任意に選べることを確認された。

さらに、この光学系のうち赤外光学系からの光を用い、半導体  $\text{Cu}_2\text{O}$  の黄色 1S 励起子に二光子共鳴する条件下で和周波分光を行った。得られた信号の入射光強度依存性から、広帯域かつ高強度な光によって励起することで二光子過程よりも四光子過程が支配的になることが示唆された。また、従来の広帯域和周波分光法においては励起光の線幅を変調することはできず、異なるエネルギー同士の(非縮退な)和周波が信号に寄与しているか分からなかったが、本光学系によって、励起光線幅の増大に伴い信号強度が増強することが確認され、非縮退な和周波過程が確かに起きていることが分かった。線幅増大に伴う強度増加の計算値[3]との比較から、先行研究での予測よりも広い、線幅 70 nm(約 60 meV)までのエネルギー差の光子の組み合わせが和周波発生に寄与することが示唆された。

## References

- [1] J. Mund *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 045203 (2020).
- [2] 片桐佳来, 修士論文 “ $\text{Cu}_2\text{O}$  における励起子の和周波分光” (京都大学大学院理学研究科, 2021).
- [3] S. Kusaba *et al.*, Opt. Express **29**, 24629 (2021).

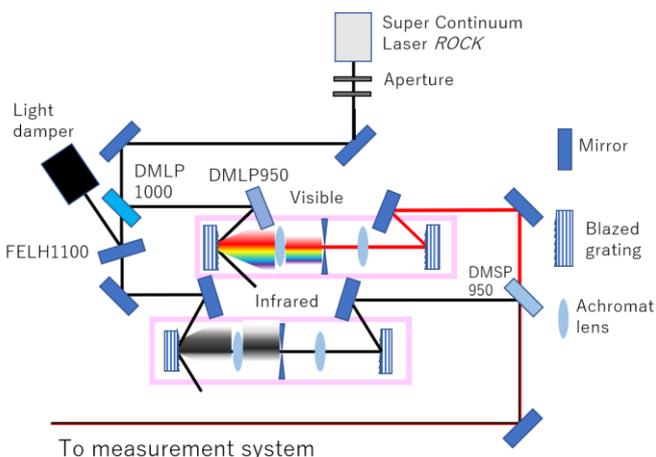


Fig.1. Schematic of the two-color 4f-systems, consisting of a 4f system for visible light and that for infrared light.

# 液晶ゲルのポリドメインモノドメイン転移と力学・光学応答挙動

ソフトマター物理学研究室 藤森 大渡

**Abstract:** Cross-linked liquid crystalline polymers swollen with liquid crystal molecules are called liquid crystal gels. Creep measurements show that elastic modulus reduction occurs, and time variation of strain rate and polarized transmitted light shows that the reorientation of liquid crystal polydomain exhibits slower dynamics than the gel network. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

液晶中に光重合性モノマーを混合し、UV 光重合を行うと液晶分子で膨潤した液晶ゲル(LCG)となる。特に、ゲルを等方(I)相で重合した後、ネマティック(N)相に冷却すると、数 $\mu\text{m}$ 以下の領域でランダムな方向を向いたポリドメイン構造の LCG となる。この液晶ゲルは、力学場下でのポリドメイン-モノドメイン転移(以下 PM 転移)だけでなく、ゲルネットワークと液晶配向秩序の間の弾性的結合効果により、力学応答や配向ダイナミクスに特徴を示す[1]。本研究では、等方相重合の液晶ゲルにせん断応力を加えたときの、PM 転移と力学・光学応答挙動を研究し、ゲルネットワークと液晶配向秩序の弾性的結合を理解することを目的とする。

力学測定を行うにあたり、レオメーター (DiscoveryHR-2 TA Instruments)を用いた。また、偏光顕微鏡ユニットと光センサーモジュールにより可視化型に改造、光学応答挙動を同時に測定することを可能にした。試料として、5CB(液晶溶媒)を 89.7wt%、A6OCB(ポリマー鎖)を 5.8wt%、RM257(架橋剤)を 1.9wt%、BDDB(架橋剤)2.4wt%、DMPAP(重合開始剤)を 0.2wt%の混合物を作成した。この混合物をレオメーター(厚み  $100\mu\text{m}$ )にセットし、 $60^\circ\text{C}$ (I 相)で、 $365\text{nm}$  の紫外線を 90 分間照射して重合を行い、LCG を作成した。

LCG に対し、 $100\sim 800\text{Pa}$  の一定のせん断応力を印加し、1000 秒間クリープ測定を行った。 $60^\circ\text{C}$ (以下 I 相)と $30^\circ\text{C}$ (N 相)で得られたデータをもとに応力歪み曲線を Fig.2 に示す。ここで I 相の測定結果は緩和時間が 10 秒以下だったので 1000 秒後の値のみを示す。これに対し、N 相では一定応力印加状態で時間経過とともに歪みが増加した。また、最も印加応力の小さい  $100\text{Pa}$  を除いて、N 相での伸び歪は I 相での伸び歪より大きくなり、N 相の弾性率は I 相の弾性率より小さいことが確認された。Fig.3 に、N 相で一定応力印加クリープ測定時の歪みと透過光強度の時間変化を示す。2 つのグラフの比較から透過光強度の変化が遅れていることがわかった。

一定応力印加によるクリープ測定から、I 相重合のポリドメイン LCG では、PM 転移が起こり、N 相においては弾性率低下が起こることを確認した。偏光透過光の時間変化から、歪率の時間変化よりも遅い緩和時間が観測され、ポリドメイン内の液晶の再配向は、LCG のゲルネットワークより遅いダイナミクスを示した。他方 I 相では N 相で見られた遅い過程存在せず、十分短い時間で伸び歪は最大値に到達する。これらの事実は、LCG のネットワークと液晶配向秩序間の弾性的結合に起因していると理解できる。

## References

[1] Asaka Takebe and Kenji Urayama, Phys. Rev. E **102**, 012701 (2020)

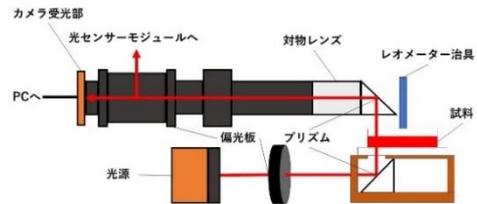


Fig. 1. Schematic image of measurement system.

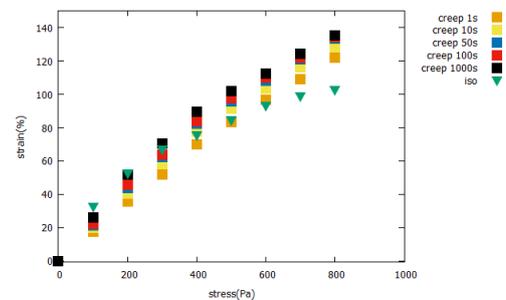


Fig. 2. Stress-Strain curve of LCG from creep tests.

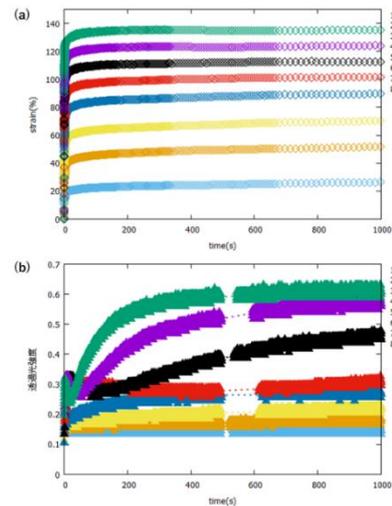


Fig. 3. (a) Strain and (b) The transmittance light intensity in Creep tests at  $30^\circ\text{C}$ .

# 延伸下液晶ゲルの粘弾性ダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 森 翔太

**Abstract.** We have studied the coupling effects between polymer elasticity and distortion elasticity of director in liquid crystal gels under uniaxial stretching strain using polarized light microscopy DIC measurements, viscoelastic measurement apparatus and dynamic light scattering (DLS). Stripe domain formation and strain dependent changes in orientation relaxation time were observed.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

【序】液晶エラストマーの配向方向に対して垂直に延伸すると、セミソフト弾性と呼ばれる弾性率低下が起こることが知られている[1]。そこで、液晶分子で液晶エラストマーを膨潤させた液晶ゲルフィルムを作製し、一軸延伸応力下での高分子網目と液晶配向場の弾性的結合に着目して研究した。本研究では、延伸応力下での偏光顕微鏡による偏光状態(DIC)計測および動的散乱測定(DLS)による配向弾性測定を行った。

【試料】液晶膨潤溶媒の 5CB (80.31wt%)、液晶アクリレートモノマー A6OCB (12.85wt%)、架橋剤の RM257 (2.14wt%)、高分子鎖の柔軟性を高めるための butyl acrylate (4.71wt%)、光重合開始剤の DMPAP (少量)を混合した溶液を用いた。混合溶液はフィルム作製用セル(125 $\mu$ m)に封入し、17 $^{\circ}$ Cで2時間紫外線(365nm)を当て重合した。

【結果】Fig. 1 に DIC 計測により得られた初期配向方向に対して垂直または平行に延伸した場合のダイレクタ分布の歪率依存性を示す。垂直延伸では、しきい値歪率(約 25%)以上で、配向回転方向がジグザグに反転変化するドメイン幅 5 $\mu$ m 程度のストライプドメインが生成され、歪率を増加するとドメイン幅が広がった(Fig. 2)。一方、平行延伸では破断点までダイレクタ分布は常に一様であった。Fig. 3 に延伸下 DLS 測定で得られた配向緩和時間の歪率依存性を示す。印加歪 0%では純粋な 5CB の配向緩和時間と同程度だが、印加歪の増加に伴って配向緩和時間は単調減少する。

【考察】まず延伸歪印加によりゲルネットワークが伸張し、しきい値歪率以上では液晶溶媒の配向主軸が回転することがわかった。また、ゲルネットワークと液晶配向秩序の弾性的結合により、みかけのフランク配向弾性が増大し、緩和時間が減少したと考えられる。これより、一軸延伸下ではゲルネットワークと液晶配向秩序に強い弾性結合が存在することが示唆される。

【参考文献】

[1] Warner, M.; Terentjev, E. M. *Liquid Crystal Elastomers*, Oxford University Press: Oxford, 2003.

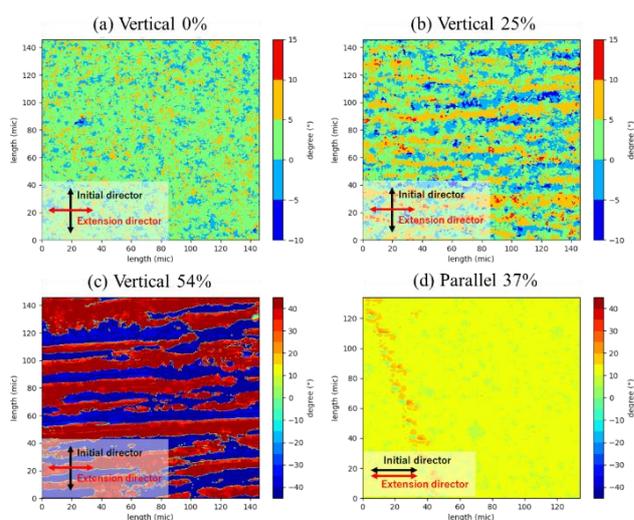


Fig. 1. Director distribution when stretched at vertical strain (a) 0%, (b) 25% and (c) 54% and at parallel strain (d) 37% to initial director.

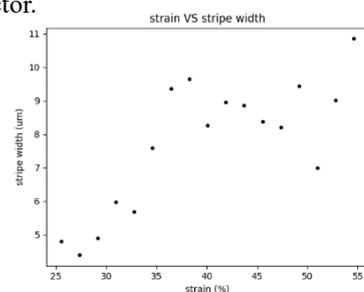


Fig. 2. Strain dependence of stripe domain width.

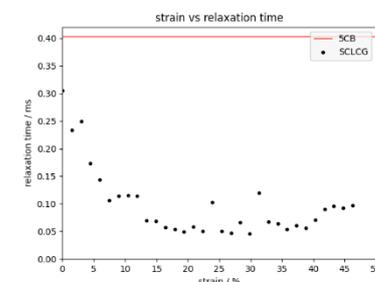


Fig. 3. Strain dependence of orientation relaxation time.