

令和7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

2026年1月26日(月)、1月27日(火)

物理学第一分野

# 物理学第一分野修士論文発表会

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

---

2026年1月26日（月）9:00～17:10

---

## 目 次

1. 金融市場における価格変動の非線形応答の応答係数に関する統計理論 藤原 俊太 ( 9:00 )	1
2. 傾角反強磁性体における非線形スピンドイナミクス 梅谷 洋人 ( 9:20 )	2
3. 重い電子系強磁性体 CeAgSb <sub>2</sub> における強磁性量子臨界点近傍の磁場方向依存性に関する研究 大口 峻平 ( 9:40 )	3
4. 空間非一様に作用する対称性を持つ1次元トポロジカル相の分類 齊藤 巧磨 ( 10:00 )	4
5. 核磁気共鳴を用いた奇パリティ反強磁性体における電子状態の研究および電流誘起歪みの探索 酒井 佑輔 ( 10:20 )	5

---

10:40～10:55 休憩

---

6. 二次元電子系における Liouvillian 表皮効果 重富 友汰 ( 10:55 )	6
7. 非従来型超伝導体における量子幾何的超流動密度の理論研究 廣部 佑真 ( 11:15 )	7
8. 円筒容器内の超流動 <sup>3</sup> He A 相・B 相テクスチャの研究 上野 純弥 ( 11:35 )	8
9. スピン三重項超伝導体 UTe <sub>2</sub> の磁化容易軸におけるスピンドル率の温度・磁場依存性の解明 松林 陸 ( 11:55 )	9
10. 液晶ナノエマルションの磁場印加時におけるダイナミクス 山田 祐希 ( 12:15 )	10

---

12:35～13:35 昼休み

---

11. 公開鍵暗号からの効率的に検証可能な一方向性パズルの構成 正木 敏梧 ( 13:35 )	11
--	----

1 2 . 分子時計構築に向けたテラヘルツ微分変調分光システム	田中 東樹 (1 3 : 5 5) · · · · 1 2
1 3 . 超流動 $^4\text{He}$ 中における微粒子の回転運動の光駆動	荒木 大希 (1 4 : 1 5) · · · · 1 3
1 4 . 極低温ダイヤモンドにおける真性移動度の抽出	寺本 創 (1 4 : 3 5) · · · · 1 4
1 5 . 例外点に対する強相関効果	加藤 武藏 (1 4 : 5 5) · · · · 1 5

---

1 5 : 1 5 ~ 1 5 : 0 0 休憩

---

1 6 . 走査型トンネル分光測定を用いたミスフィット化合物 $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$ の研究	北野 優 (1 5 : 3 0) · · · · 1 6
1 7 . 量子幾何による奇パリティ磁性	工藤 幹太 (1 5 : 5 0) · · · · 1 7
1 8 . フィードバック冷却における情報熱力学的解析及び機械学習応用	小林 秀太 (1 6 : 1 0) · · · · 1 8
1 9 . $^{173}\text{Yb}$ 原子アレイの 1 量子ビット操作の実現と 2 量子ビットゲートに向けたリドベルグ分光	齊藤 啓都 (1 6 : 3 0) · · · · 1 9
2 0 . ハニカム構造を持つ層状 5d 電子系超伝導体 $\text{La}_2\text{IO}_3$ における構造相転移と非従来型超伝導	酒井 葵生 (1 6 : 5 0) · · · · 2 0

---

2 0 2 6 年 1 月 2 7 日 (火) 9 : 0 0 ~ 1 5 : 1 0

---

2 1 . 非平衡相転移におけるエントロピーゆらぎ発散機構と普遍性	玉野 恭多 ( 9 : 0 0) · · · · 2 1
2 2 . ネマチック液晶中におけるコロイド粒子のブラウン運動の 異常拡散・並進運動と回転運動の相互相関	鈴木 佳大 ( 9 : 2 0) · · · · 2 2
2 3 . トポロジカル秩序相におけるトポロジカルな励起について	高間 俊至 ( 9 : 4 0) · · · · 2 3
2 4 . ファイバー生成により自己駆動する酢酸菌の波打ち運動に対する力学的評価	雀部 太陽 (1 0 : 0 0) · · · · 2 4
2 5 . Neural network quantum states study for toric code under isotropic and antiferromagnetic Heisenberg interactions	JANG WON (1 0 : 2 0) · · · · 2 5

---

1 0 : 4 0 ~ 1 0 : 5 5 休憩

---

2 6. ソレー効果における分子のねじれの影響	朝倉 佑都 (10 : 55) ····· 26
2 7. 微小管集団運動の光刺激による速度方向制御	大瀬良勘太 (11 : 15) ····· 27
2 8. 走査トンネル分光の新規解析に基づく Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>8+δ</sub> のナノスケール不均一性とエネルギーースケールの再評価	中里 英史 (11 : 35) ····· 28
2 9. 超純良単結晶を用いたスピニ三重項超伝導体 UTe <sub>2</sub> の走査トンネル分光	中西 宏介 (11 : 55) ····· 29
3 0. アゾ混合リオトロピック液晶のミセル変形ダイナミクス	成相 和希 (12 : 15) ····· 30
<hr/> 1 2 : 3 5 ~ 1 3 : 3 5 昼休み <hr/>	
3 1. 非従来型超伝導体における電流誘起スピニ・スピニ流の理論研究	原 慧人 (13 : 35) ····· 31
3 2. ツリウム原子のレーザー冷却	東 宏一郎 (13 : 55) ····· 32
3 3. 生物対流現象における下降流揺らぎの機構解明と境界設計による対流パターン安定化	松井 健安 (14 : 15) ····· 33
3 4. 量子計算古典通信モデルにおけるコインフリッピングと一方向性パズルの関係について	水原 朔 (14 : 35) ····· 34
3 5. 磁性メタマテリアルにおける光駆動スピニ流に関する研究	渡邊 優一 (14 : 55) ····· 35

# 金融市場における価格変動の非線形応答の 応答係数に関する統計理論

統計物理・動力学研究室 藤原俊太

**Abstract** In financial markets, price impact, defined as order-induced price change, empirically follows the square-root law. While appropriate nondimensionalization is crucial for its statistical analysis, guiding principles to select such characteristic constants are lacking. This study establishes its theoretical foundation and analyzes the statistics of the coefficient of the square-root law.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

近年、金融市場において取引の電子化が進んだことにより、高品質なデータが膨大に利用出来るようになった。そして、これらのデータを解析することによって、金融市場に関する数多くの経験則が確立してきた[1]。このデータ解析は、世界中の市場や銘柄、時期、アセットを対象に行われているため、ここで確立した経験則は金融市場の本質的な性質を理解する上で重要と考えられる。

本研究では、その経験則の中でも、価格応答の非線形応答に焦点を当てた。価格応答とは、トレーダーの注文に対して価格がどれだけ変化するかを表す量である。例えば、価格応答が大きい場合、注文に対して価格が大きく変化することを意味するため、機関投資家のような大口取引をするトレーダーにとっては不利な市場であると考えられる。このように、価格応答を調べることは、学術的な面のみならず、実務的な面においても重要である。この価格応答の定量的な関係として、注文量 $Q$ に対して価格の変化を $I(Q)$ とした時、次のようなべき乗型の非線形応答を示すことが分かっている[1, 2]。

$$I(Q) = cQ^\delta, \delta \approx 0.5. \quad (1)$$

特に、多くの研究でべき指数 $\delta$ が0.5に近い値を取ることから、この関係は平方根則と呼ばれている。

この平方根則に関する実証研究では、十分に誤差の小さい精密な測定を行うために、非常に多くのデータ点が必要となる。そこで多くの研究では、複数の日にちや銘柄をまたいだ統計解析が行われてきた。その際、価格や注文量の違いを統制するために、関係式(1)に対して次のような無次元化と呼ばれる操作が行われる[1, 2]。

$$I(Q) = YQ^\delta, I := \frac{I}{\sigma_D}, Q := \frac{Q}{V_D}. \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_D$ は一日のボラティリティ、 $V_D$ は一日の出来高である。ボラティリティとは価格変動の激しさを表す指標として用いられる量で、価格の次元を持つ。出来高とはその銘柄の総取引量を表す量で、注文量の次元を持つ。したがって、この関係式は価格・注文量ともに無次元化されており、 $Y$ は無次元の比例係数となる。

しかし、 $\sigma_D$ と $V_D$ を用いた無次元化は経験的に用いられているだけであり、価格や量の次元を持つパラメータが他にある中で、この2つを探る妥当性は十分に研究されてこなかった。すなわち、経験則としては有効であっても、理論的な根拠には不明瞭な面があった。また、べき指数 $\delta$ についてはその値を含めて十分に研究がなされてきた一方で、比例係数 $Y$ についてはあまり着目されてこなかった。しかし、比例係数は価格応答が引き起こす取引コストと直接関係するため、重要な量である。

そこで本研究では、近年新しく提唱された数理モデル[3]を元に、無次元化の妥当性を明らかにした。この数理モデルは、市場の様々な経験則と整合的であることから、市場のミクロモデルとして有望と考えられる。そこで、このモデルを確率過程の問題として落とし込むことで理論的に解いた。その結果、従来の無次元化式(2)に対して理論的な基盤を与えることが出来た。また、比例係数についても、式(1)の $c$ と式(2)の $Y$ の関係を調べ、それらの値や分布を統計的に検証する枠組みを立てた。

## References

- [1] J.-P. Bouchaud, J. Bonart, J. Donier, and M. Gould, “Trades, Quotes and Prices” (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2018).
- [2] Y. Sato and K. Kanazawa, Phys. Rev. Lett. **135**, 257401 (2025).
- [3] Y. Sato and K. Kanazawa, arXiv:2502.17906v4 (2025).

# 傾角反強磁性体における非線形スピンダイナミクス

光駆動固体物性研究室 梅谷洸人

**Abstract** We studied terahertz magnetic-field-driven spin dynamics in an antiferromagnetic  $\text{NdFeO}_3$  single crystal using micro-scale metallic resonators for magnetic-field enhancement. Strong terahertz magnetic pulses resonantly excited the  $q$ -AFM mode near 0.49 THz, and higher-order harmonics were observed, indicating nonlinear spin responses around the spin reorientation transition.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

レーザーなどの周期的外場によって誘起される多体スピン系の非平衡現象は、物性物理における重要な研究テーマの一つである。特に、テラヘルツ (THz) 周波数帯にスピン歳差運動を有する反強磁性体は、超高速なスピンデバイスへの応用が期待されており、近年注目を集めている。希土類オルソフェライトは、希土類電子系の状態に応じて磁気異方性が変化し、温度変化に伴って磁化の方向が回転するスピン再配列転移を示す反強磁性体である。特定の温度領域においては、磁化のポテンシャルエネルギーが複数の安定点を持つため、これまで可視光や中赤外の光パルスによるスピン状態間の超高速制御について研究が行われてきた。しかし、これらの手法では電子励起や加熱効果の影響を完全に排除することが難しいという課題がある。本研究では、電子励起を伴わず磁化を直接駆動できる THz 磁場パルスを用いて、約 170 K に転移点を持つ  $\text{NdFeO}_3$  単結晶におけるスピン励起機構の解明を目的として研究を行った。

高強度な THz パルスは、近赤外光パルス (中心波長 800 nm、時間幅 80 fs) を光源として、 $\text{LiNbO}_3$  結晶を用いたパルス面傾斜法により発生させた。Fig. 1 に示すような  $\text{NdFeO}_3$  試料上に作製したアンテナ付きらせん型共振器 (SAR) に、THz パルスを照射することにより、らせん構造内に電流が発生し高強度な THz 磁場パルスを試料内部に発生できる [1,2]。THz 磁場パルスが  $\text{NdFeO}_3$  の磁化ベクトルに平行であるとき、約 0.49 THz に共鳴周波数を持つ  $q$ -AFM モードの励起が期待される [3]。測定した屈折率を用いて電磁場シミュレーション解析を行い、THz 磁場増強度の高い金属共振器構造を設計した。Fig. 2 に本研究で測定した電場波形をフーリエ変換した結果を示す。この結果から、周波数スペクトルにおいて 0.49 THz 付近に明瞭なピークが観測できる。このピークは、 $\text{NdFeO}_3$  における  $q$ -AFM モードの共鳴周波数と一致しており、SAR によって生成された THz 磁場パルスが  $q$ -AFM モードを効率的に駆動していることを示している。さらに、基本周波数成分に加えて、その整数倍に対応する高次高調波成分が観測され、THz パルス照射下においてスピンダイナミクスが非線形領域に到達していることが分かる。

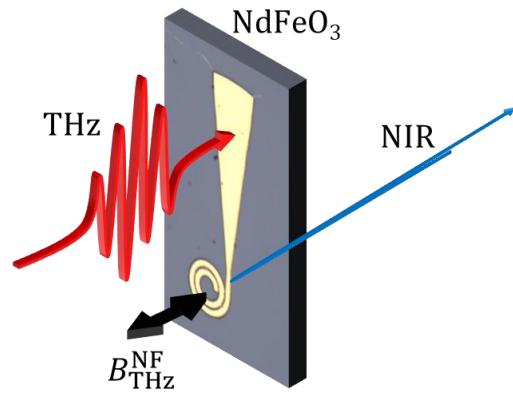


Fig. 1. SAR fabricated on a  $\text{NdFeO}_3$  substrate.

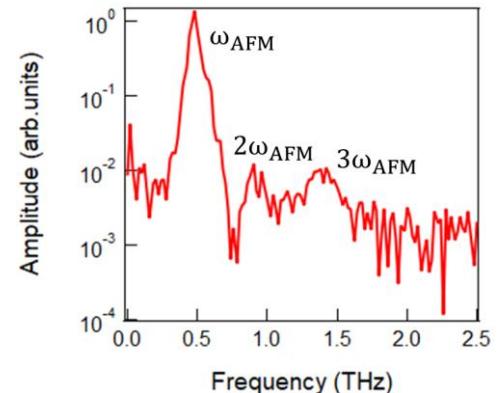


Fig. 2. Fourier spectrum of the temporal waveform.

## References

- [1] Z. Zhang *et al.*, Nat. Commun. **14**, 1795 (2023).
- [2] K. Maruyama *et al.*, Appl. Phys. Express **17**, 022004 (2024).
- [3] J. Jiang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 062403 (2013).

# 重い電子系強磁性体 $\text{CeAgSb}_2$ における強磁性量子臨界点近傍の磁場方向依存性に関する研究

固体量子物性研究室 大口峻平

**Abstract** We investigated the field-angle dependence of the ferromagnetic critical point in  $\text{CeAgSb}_2$  using resistivity, AC magnetic susceptibility, and magnetization measurements. We found that although fields along the  $ab$  plane suppress the Curie temperature, tilting the field toward the  $c$  axis relieves this suppression and broadens the transition into a crossover.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

量子臨界点(Quantum Critical Point; QCP)とは2次の磁気相転移点が磁場や圧力などの外部パラメータにより絶対零度まで抑制された相転移点のことである。QCP近傍では従来の熱ゆらぎに代わり量子臨界揺らぎが支配的になり、非従来型超伝導や非フェルミ液体などの新奇な量子現象の舞台として知られる。その中で強磁性が抑制されたQCPは低温で1次転移となりやすいため実例が極めて少なく、その性質は未解明な点が多い。  
 $\text{CeAgSb}_2$ は正方晶に属しCe原子が周期的に並ぶ近藤格子系であり、Ceの4f電子が磁性を担うCurie温度 $T_C = 9.6$  Kの強磁性体である。特筆すべき点は、Ceの結晶場効果により $ab$ 面が磁化容易面であるものの、異方的な交換相互作用によって自発磁化が $c$ 軸にそろうという珍しい磁気異方性である(Fig. 1)[1]。また、 $T_C$ が $c$ 軸磁場によって上昇する一方、 $ab$ 面内磁場では抑制され、稀有な強磁性QCPの存在が示唆される(Fig. 2)[2,3]。我々はこのような異方的な系では、量子臨界性が磁場方向に対しどのように変化するのかに興味を持った。

本研究では $\text{CeAgSb}_2$ 単結晶試料を用いて、電気抵抗・交流磁化率・磁化の磁場方向依存性を測定することで、 $\text{CeAgSb}_2$ の $ab$ 面内磁場下の強磁性QCPが磁場方向に対してどのように変化するのかを詳細に調べた。まず1 Tでの $T_C$ の磁場方向依存性を電気抵抗および交流磁化率の温度依存性から見積もった。 $ab$ 面内方向から $c$ 軸方向へ磁場角度を20度以上傾けていくと抑制されていた $T_C$ が急激に大きくなり、抑制されなくなることが明らかになった。また磁化測定の結果から、 $ab$ 面内磁場下で確認できていた常磁性への転移に対応する明瞭な折れ曲がりが、磁場角度を $c$ 軸方向へ傾けるにつれて緩やかになり、この転移がクロスオーバー的になっていることを明らかにした。

この振る舞いは一見予想されるものであるが、これまで報告のある数少ない磁場誘起の強磁性臨界現象を示す物質とは磁気異方性や遍歴性が異なり、異方的な強磁性QCPの性質を解明する上で重要な知見を与えるものである。

## References

- [1] K. D. Myers *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **205**, 27 (1999).
- [2] E. Jobilong *et al.*, Phys. Rev. B **72**, 104428 (2003).
- [3] P. Logg *et al.*, Phys. Status Solidi B **250**, 515 (2013).

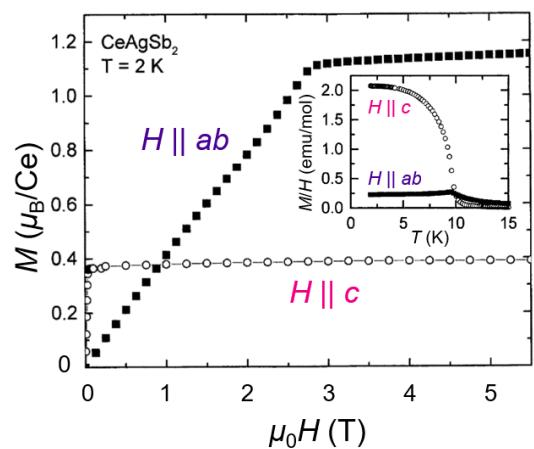


Fig. 1.  $M$ - $H$  curves in  $H \parallel c$  and  $H \parallel ab$  at 2 K [1]. Inset shows magnetic susceptibility as a function of temperature.

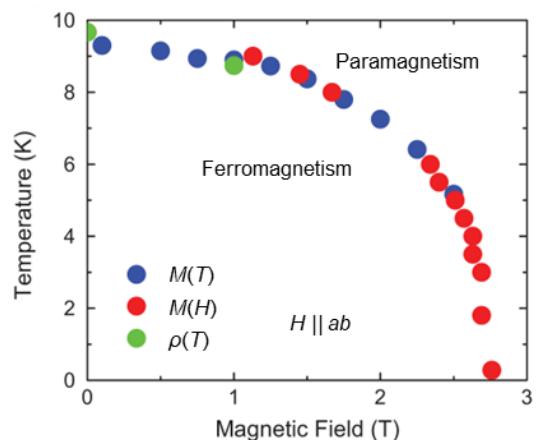


Fig. 2. In plane field-temperature phase diagram of  $\text{CeAgSb}_2$ [3].

# 空間非一様に作用する対称性を持つ1次元トポロジカル相の分類

基礎物理学研究所 凝縮系物理 齊藤 巧磨

**Abstract** We study topological phases in a (1+1)-dimension lattice under a modulated symmetry, whose action is position dependent. Particularly we classify SPT phases of multipole symmetries, which preserves multipole moment of the system. We give explicit models which shows SPT phases under multipole symmetry.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

物質の相分類は対称性の自発的破れをもとに Landau パラダイムをもとに発展してきたが、Landau パラダイムを超えた物理としてトポロジカル相の存在が注目され、研究が進んでいる。近年、一般化対称性と呼ばれる対称性の再定義によって分類が進展している。しかし分類にあたって念頭に置かれているのは、基底状態の縮退が有限であり、さらに励起によって現れるエニオンが追加のエネルギーなしに時空全体を自由に運動できるような、一般化対称性との親和性が高いケースがほとんどである。

このような理想的なトポロジカル物質の反例となる模型としてフラクトン系が知られている。励起によりエニオン統計性をもつ粒子（フラクトン）を生じるが、追加のエネルギーなしに運動できなかったり、運動方向が制限されたり、さらに基底状態の縮退度がシステムサイズに応じて発散するなどの特性がある。粒子の運動制限を生じるメカニズムとして空間位置に依存する作用を与える非一様な対称性の存在が鍵を握っている。空間 1 次元系を例にとると、電荷を保存する  $U(1)$  対称性に加えて電気双極子を保存する双極子対称性も Hamiltonian に要請することで、電荷がペアとなって運動することを要請し、孤立電荷を固定できる。一般に  $n$  次の多極子を保存する対称性（多極子対称性）は  $n$  次多項式を用いた群作用を与えるため、多極子対称性下でのトポロジカル相を分類することで空間非一様に作用する対称性を持つトポロジカル相が分類できる。

空間 1 次元系ではエニオンは発生しないが、励起ギャップのある系の基底状態が行列積状態で記述できたり、基底状態の縮退を伴うトポロジカル相の存在が否定されているなど、トポロジカル相の分類が比較的容易になる。

本研究では 1 次元スピン系にて、非一様な対称性を生成する多極子対称性を課して SPT 相を分類した [1]。基底状態を表現する行列積状態に対して多極子対称性の対称性操作を施すことで、テンソルの両端にゲージが発生する。基底状態の非縮退性を保ちつつ発生しうるゲージを列挙することで群コホモロジーを用いた SPT 相の分類の表式が得られる。また分類した相の代表模型として、多極子対称性のもとで不变な SPT 相を与える模型を文献 [2] にしたがって具体的に構成し、端状態を与えた。本研究を発展させることで非一様な対称性による 1 次元および 2 次元におけるトポロジカル相の分類が与えられており [3]、より高次元でのトポロジカル相の分類へも応用できると期待される。

## References

- [1] Takuma Saito *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 195113 (2025).
- [2] Jung Hoon Han, *et al.*, Phys. Rev. B **109**, 125121 (2024)
- [3] Ching-Yu Yao arXiv: 2510.03889 [cond-mat.str-el]

# 核磁気共鳴を用いた奇parity反強磁性体における電子状態の研究および電流誘起歪みの探索

固体量子物性研究室 酒井佑輔

**Abstract** Odd-parity antiferromagnets host cross-correlation responses arising from broken inversion and time-reversal symmetries. We attempted to detect current-induced strain in  $\text{BaMn}_2\text{As}_2$  using  $^{55}\text{Mn}$  zero-field NMR. By performing direct-current and pulsed-current measurements, we evaluated and suppressed Joule heating effect and discussed whether such strain caused detectable changes in the NMR spectrum.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

反強磁性体のうち、空間反転対称性と時間反転対称性の両方が破れるものの、その複合対称性である $\mathcal{PT}$ 対称性を保つものは、拡張多極子の観点から奇parityの磁気的な多極子秩序とみなせる。このような「奇parity反強磁性体」は、対称性の破れに起因する非自明な物性応答である交差相関応答の舞台として近年注目を集めている。その一例である電流誘起歪みは、2017年に理論提案され[1]、交流電流に対する応答が報告されている[2]ものの、実験的な検出例は依然として極めて限られている。

電流誘起歪みの発現が期待されている物質の一つが、反強磁性体 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ である。 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ は結晶構造としては空間反転対称性を有しており、空間反転操作によって互いに入れ替わるMn副格子を持つ。625 K以下では、Mn副格子間で $c$ 軸方向に共線的な反強磁性秩序が形成され[3] (Fig.1)、その結果として空間反転対称性と時間反転対称性の両方が破れた奇parity反強磁性体となる。また、同様な結晶構造の特徴を持つ $\text{LaMnSi}$ も295 Kで $c$ 軸方向に共線的な反強磁性秩序を示す奇parity反強磁性体であり[4]、電流誘起歪みの発現を許す対称性を有する。

本研究では、奇parity反強磁性体である $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ および $\text{LaMnSi}$ [4]を対象として核磁気共鳴(NMR)測定を行った。特に $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ については、ゼロ磁場下 $^{55}\text{Mn}$ -NMR ( $^{55}\text{Mn}$ -ZFNMR)を用いて電流誘起歪みの観測を試みた。NMRは核スピンと電場勾配との相互作用を通じて格子歪みを微視的に検出可能な手法である。電流については、直流印加測定に加えて、NMR測定と同期した電流印加により発熱を抑制したパルス電流印加測定も行った。 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ 単結晶試料を用いた $^{55}\text{Mn}$ -ZFNMR測定により得られたスペクトルをFig.2に示す。センターピークの位置 $f_{\text{cen}}$ は磁気秩序に由来する内部磁場の大きさ、各ピーク間隔 $\nu_Q$ はMn周りの格子に関係した電場勾配の大きさを反映しており、格子歪みは $\nu_Q$ の変化として捉えられる。直流電流下では、スペクトルの変化から電流印加に伴う試料温度の上昇を評価し、発熱の寄与を取り除いた上で $\nu_Q$ がわずかに減少する振る舞いを示した。一方、パルス電流下では、期待通り発熱が大幅に抑制されていることをスペクトルから確認できたものの、 $\nu_Q$ に系統的な変化が見られなかった。本研究によって、 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ では電流誘起歪みの応答が小さい可能性が高いことに加え、電流印加NMRは試料内の電子系の温度を評価しながら電流誘起歪みを探索する有効な手法であることを明らかにした。

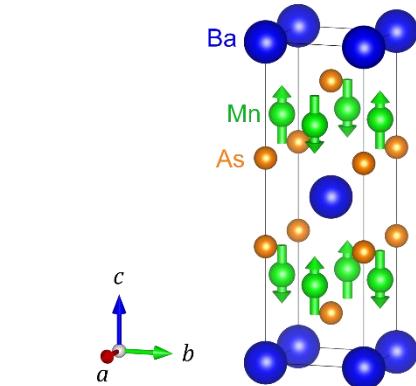


Fig.1. Magnetic structure of  $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ .

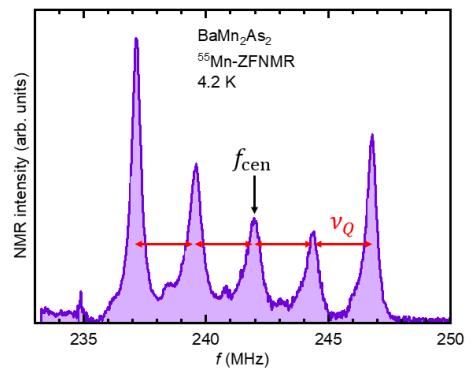


Fig.2.  $^{55}\text{Mn}$ -ZFNMR spectrum at 4.2 K.

## References

- [1] H. Watanabe *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 064432 (2017).  
[2] Y. Shiomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 127207 (2019).  
[3] Y. Singh *et al.*, Phys. Rev. B **80**, 100403(R) (2009).  
[4] Y. Sakai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **95**, 024702 (2026).

# 二次元電子系における Liouvillian 表皮効果

凝縮系理論グループ 重富友汰

**Abstract** We study non-Hermitian localization phenomena unique to open quantum systems in two-dimensional electron systems. We show that the interplay of spin-orbit coupling, magnetic fields, and energy dissipation gives rise to  $Z$  and  $Z_2$  Liouvillian skin effects and demonstrate that Fermi-surfaces and finite-temperature effects play essential roles in their emergence.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

近年、開放量子系における非エルミート性が注目を集めている。開放量子系は、非エルミートな演算子である Liouvillian を生成子とする量子マスター方程式によって記述される。この非エルミート性により、エルミート系には存在しないトポロジカル現象が生じることが知られている[1, 2]。その代表例として、Liouvillian のスペクトルトロジーに応じて固有モードが系の境界に局在する Liouvillian 表皮効果が挙げられる[3-5]。この効果は、系のダイナミクスの緩和時間に、局在長やシステムサイズに対する特異な依存性をもたらすため、近年活発に研究されている[5]。

固体電子系において、緩和ダイナミクスは系の性質を決定するのに用いられるなど重要な役割を果たす。したがって、固体電子系において Liouvillian 表皮効果の発現可能性及びその影響を調べることは喫緊の課題となっている。しかしながら、従来の Liouvillian 表皮効果の研究は、主に冷却原子系などの人工量子系を対象として行われており[5]、固体電子系における Liouvillian 表皮効果の発現可能性は未開拓であった。

そこで、本研究では基板上の二次元電子系に対して現象論的量子マスター方程式を構築し(Fig.1)、エネルギー散逸、スピン軌道相互作用、および横磁場の組み合わせによって、 $Z$  および  $Z_2$  の Liouvillian 表皮効果が発現することを示した(Fig.2) [6]。また、固体電子系に普遍的な要素であるフェルミ面構造や有限温度効果が、これらの表皮効果の発現に本質的な役割を果たすことを明らかにした[6]。さらに、系に横磁場を挿入した際のクエンチダイナミクスを調べることで、Liouvillian 表皮効果が緩和ダイナミクスに及ぼす影響を明らかにした[6]。

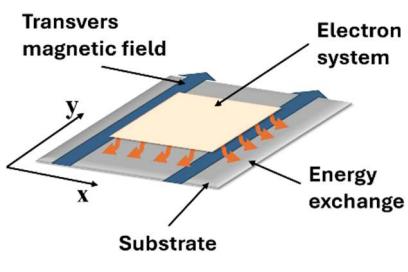


Fig. 1 Schematic illustration of the system.

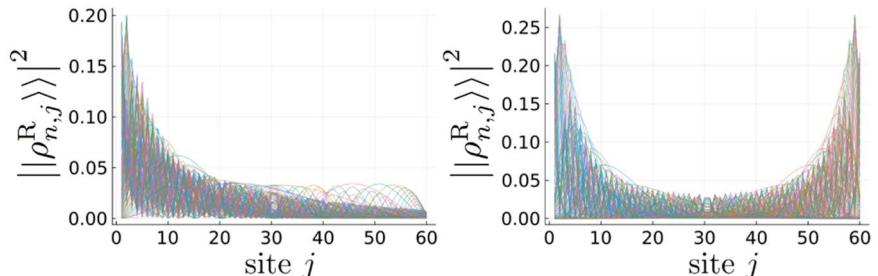


Fig. 2 Localization of right Liouvillian eigenstates.  
(Left)  $Z$  Liouvillian skin effect. (Right)  $Z_2$  Liouvillian skin effect.

## References

- [1] Z. Gong *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).
- [2] K. Kawabata *et al.*, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).
- [3] S. Yao and Z. Wang, Phys. Rev. Lett. **121**, 086803 (2018).
- [4] N. Okuma *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).
- [5] T. Haga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 070402 (2021).
- [6] Y. Shigedomi and T. Yoshida, Phys. Rev. B **113**, 035121 (2026).

# 非従来型超伝導体における 量子幾何的超流動密度の理論研究

凝縮系理論グループ 廣部佑真

**Abstract** We establish a theory connecting the temperature dependence of quantum geometric superfluid stiffness to superconducting gap symmetry. Revealing unique scaling laws dependent on band crossings, we apply this framework to twisted graphene experiments to constrain their nodal structures. This work provides a crucial diagnostic tool for flat-band superconductors.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

超伝導状態における秩序変数の位相剛性を特徴づける超流動密度は、マイスナー効果やゼロ抵抗状態の起源となる、超伝導体の基本的な物理量である。さらに、低温におけるその温度依存性は、凝縮体からの熱的な準粒子励起を反映し、フェルミ液体論に基づいて超伝導ギャップのノード構造と結び付けられてきた。例えば、線形スケーリングは線ノード、二次スケーリングは点ノードに対応することが知られている[1]。超流動密度の温度依存性は磁場侵入長や慣性インダクタンスを通じて実験的に観測することができるため、この対応関係は様々な超伝導体における秩序変数の対称性の同定に広く活用されてきた[2]。

しかし、近年注目を集めている捻り二層・三層グラフェンといった平坦バンド超伝導体においては、従来の解釈が破綻する。フェルミ液体論によると、超流動密度は電子の有効質量によって支配され、有効質量が小さいほど超流動密度が大きくなる。したがって、電子の有効質量が非常に大きい平坦バンド系では、超流動密度は著しく小さくなると予測される。それにもかかわらず、捻り積層グラフェンでは有意な超流動密度が実験的に観測されており[3, 4]、既存の理論的枠組みのみでは説明が困難である。この矛盾は、ブロッホ波動関数の幾何学的構造に起因する量子幾何的超流動密度を考慮することで解消される[5]。

本研究では、この量子幾何的超流動密度に着目し、その低温における温度依存性が超伝導ギャップのノード構造および正常状態のバンド構造とどのように対応するかを理論的に解明する[6]。具体的には、多バンド系のボゴリューボフ・ド・ジエンヌ(BdG)ハミルトニアンに基づく超流動密度の表式において、エネルギー分散に由来する従来の寄与と、量子計量に由来する量子幾何的寄与を明確に分離し、後者の低温極限における温度依存性を解析的に導出・分類する。その結果、量子幾何的寄与のスケーリング則は従来の対応関係と異なるものになること、さらに、超伝導ギャップのノードの種類に加えて、正常状態におけるバンド交差の有無によっても量子幾何的寄与のスケーリング指数が変化することを示す。

また、この分類を、平坦バンドを有するリーブ格子において数値的に検証し、解析的な結果と一致することを確認する。さらに本理論を、実験で報告されている捻り三層グラフェンにおける線形スケーリング[3]および捻り二層グラフェンにおける二次スケーリング[4]と照合することで、両者のノード構造を特定し、許容される秩序変数の対称性に制限を与える。

以上により本研究は、量子幾何効果に支配された超伝導体において、超流動密度の温度依存性を超伝導対称性のプローブとして活用するための新たな理論的基盤を与え、平坦バンド系における超伝導機構の理解に寄与するものである。

## References

- [1] F. Gross *et al.*, Z. Physik B **64**, 175-188 (1986).
- [2] R. Prozorov and R. W. Giannetta, Supercond. Sci. Technol. **19**, R41 (2006).
- [3] A. Banerjee *et al.*, Nature **638**, 93-98 (2025).
- [4] M. Tanaka *et al.*, Nature **638**, 99-105 (2025).
- [5] S. Peotta and P. Törmä, Nat. Commun. **6**, 8944 (2015).
- [6] Y. Hirobe, T. Kitamura, and Y. Yanase, arXiv:2505.13065 (2025).

# 円筒容器内の超流動 $^3\text{He}$ A 相・B 相テクスチャの研究

低温物理学研究室 上野純弥

**Abstract** Superfluid  $^3\text{He}$  A and B phases in a 1mm cylindrical container were studied by numerical simulations of textures. 2D textures and 3D domain wall and corresponding NMR spectra were obtained. The experimentally achieved texture was examined by comparing it with the simulated textures.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

$^3\text{He}$  はフェルミ粒子でありクーパー対を形成して超流動に転移する。超流動  $^3\text{He}$  のクーパー対はスピン三重項 p 波状態であるためオーダーパラメータは多数の内部自由度をもつ。その自由度は A 相では軌道角運動量の方向を表すベクトルやスピン異方軸を表すベクトル、B 相ではクーパー対の軌道角運動量の方向とスピン方向の相対的な関係を表す回転軸  $\hat{n}$  と回転角  $\theta$  で記述される。このベクトル等は外場や境界条件などにより空間変化し、その空間配置をテクスチャと呼ぶ。当研究室ではこれまで平行平板間のテクスチャについての研究が多く行われてきたが、より多様なテクスチャが形成される、軸に直交する方向に磁場をかけた直径 1mm の円筒容器内の超流動  $^3\text{He}$  について実験を行い、その結果を考察するために数値計算によるシミュレーションを行った。本研究では円筒容器内の超流動  $^3\text{He}$  A 相・B 相の 2 次元・3 次元テクスチャをシミュレーションによって計算した。シミュレーションでは、空間を格子状に分割してベクトルの初期状態を設定し、モンテカルロ法によって準安定なテクスチャを求めた。

このシミュレーションによって Fig. 1, 2 のような A 相・B 相における円筒断面でのテクスチャやドメインウォールがあるときのテクスチャの候補を得ることができた。A 相の円筒断面のハイパボリック型、サーフェス型テクスチャのエネルギーを円筒の半径を変えて比較し、任意の半径の円筒容器でハイパボリックテクスチャが安定なテクスチャであるという結果を得た。また 2 つのテクスチャの磁場勾配下でのスペクトルは実験結果との一致を得たが、二つのテクスチャを区別することはできなかった。

B 相の円筒断面内のテクスチャについて円筒壁における特異点の場所の不定性があったが、磁場勾配下でのスペクトルの実験結果との比較から一意に決めることができた。また実験結果とローカルフィールド近似での計算結果とで一致しない低温領域でのスペクトルについて、スピン波の計算を行ったがよい一致を得ることはできなかった。ドメインウォールがあるときのテクスチャについては B 相でのベクトルの空間変化の仕方は twist 型が安定であるとの結果を得ることができ、また磁場勾配下でのスペクトルを計算すると実験結果との定性的な一致を得られ、B 相でのドメインウォール構造の理解を深めることができた。

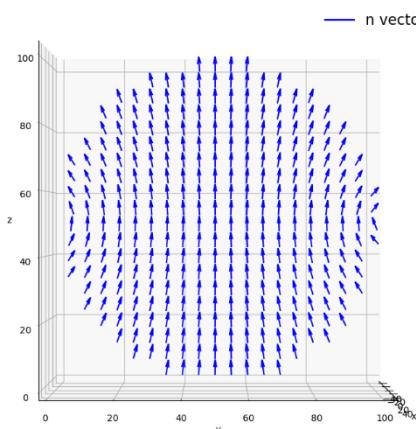


Fig.1 B phase 2D texture in cylinder

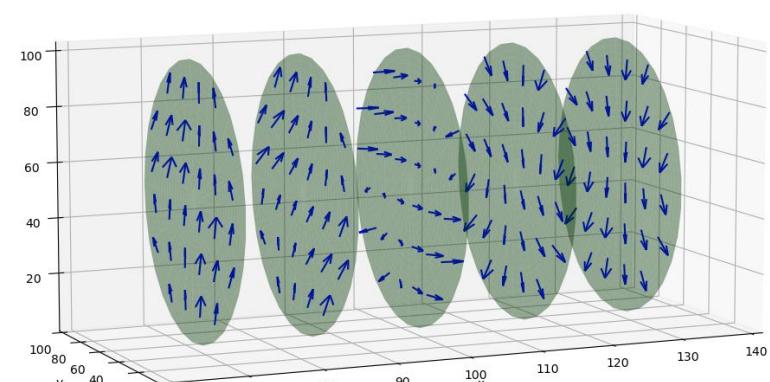


Fig.2 B phase domain wall

# スピン三重項超伝導体 $\text{UTe}_2$ の磁化容易軸における スピン磁化率の温度・磁場依存性の解明

固体量子物性研究室 松林陸

**Abstract**  $\text{UTe}_2$  is a promising candidate of a spin-triplet superconductor. We have performed  $^{125}\text{Te}$  nuclear magnetic resonance measurements and revealed a large reduction in Knight shift along the  $a$  axis. Furthermore, such a large reduction was suppressed by applying  $H \parallel a$ , suggesting a field-induced rotation of superconducting spins along the  $a$  axis.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

超伝導は、2つの電子がクーパー対を形成することにより生じるコヒーレントな量子現象である。多くの超伝導体はクーパー対がスピン自由度を持たない「スピン一重項超伝導体」に分類されるが、対がスピンや軌道の自由度を持つ「スピン三重項超伝導体」に該当する物質は極めて稀である。スピン三重項超伝導体では内部自由度に起因して多様な超伝導相が現れることが知られており、スピンと軌道の自由度に由来する新奇現象の発見と解明に期待がかかっている。

2018年に超伝導が発見された  $\text{UTe}_2$ [1]は、高磁場や圧力下で新たな超伝導相が誘起されることから[2]、スピン三重項超伝導体であることが示唆された。2022年には U 原子の欠損が抑えられた超伝導転移温度  $T_c$  が 2.1 K の純良な試料が報告され[3]、近年ではこの試料を用いた研究が精力的に行われている。

核磁気共鳴測定は、超伝導状態でのスピン磁化率を微視的に測定できる数少ない有用な手法である。これまでに 1.5 K までの各結晶軸でのナイトシフト(スピン磁化率)測定が行われており、低磁場では磁化容易軸である  $a$  軸方向において、ナイトシフトが他の結晶軸に比べて一桁以上大きく減少することが示された[4]。そのため、 $\text{UTe}_2$ の超伝導スピン状態を理解する上で、磁化容易軸である  $a$  軸方向のナイトシフト( $K_a$ )の極低温までの振る舞いや減少量の大きさを知ることは非常に重要である。また  $T_c$  が 1.6 K の  $\text{UTe}_2$ では、外部磁場方向に対して超伝導スピンが回転するという、スピン三重項超伝導に特有の現象も観測されており、 $K_a$ の磁場応答にも興味が持たれる[5]。しかし、 $a$  軸方向の磁場下では NMR 共鳴線幅の増大などにより信号強度が大きく減少するため、特に超伝導状態での測定が困難であった。

今回我々は、 $ab$  面内で測定が比較的容易な  $b$  軸方向から  $a$  軸方向に向けて磁場方向を回転しながら測定を行った。そしてナイトシフトの面内角度依存性[6]と共に結果を解析することで  $K_a$  を求めた。その結果、 $K_a$  は極低温に至るまで減少を続け、その減少量( $\Delta K_a$ )は他の結晶軸と比べて約 20 倍大きいことが明らかになった(Fig. 1)。また、複数の磁場下で測定を行うことにより  $K_a$  の磁場依存性を決定し、超伝導状態において  $\Delta K_a$  が磁場により一部抑制される挙動を観測した。この結果は、本研究で測定を行った  $a$  軸方向の磁場領域において、超伝導スピンの回転が誘起されている可能性を示唆している。今後はさらなる高磁場領域で  $\Delta K_a$  の磁場依存性を測定し、 $\Delta K_a$  が完全に抑制されるまでの磁場に対する振舞いや、上部臨界磁場  $H_{c2}$  までの  $\Delta K_a$  の振舞いを明らかにする予定である。

## 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.*, Phys. Rev. Materials **6**, 073401 (2022).
- [4] H. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 063701 (2023).
- [5] S. Kitagawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 123701 (2024).
- [6] H. Matsumura, S. Kitagawa, S. Ogata, R. Matsubayashi et al., Phys. Rev. B **111**, 094507 (2025).

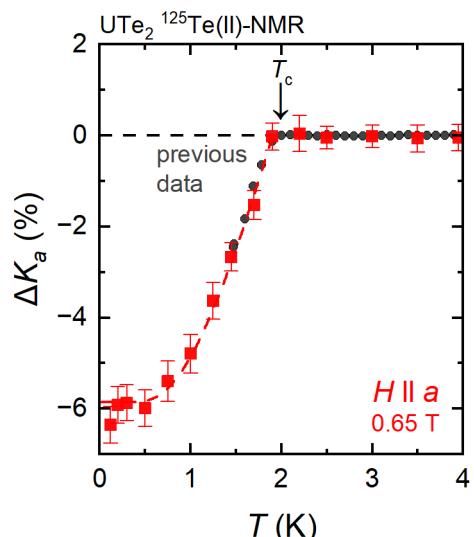


Fig. 1 Estimated temperature dependence of the reduction of Knight shift from the normal state for  $H \parallel a$ . The gray points stand for the previous data with applying  $H \parallel a$  [4].

# 液晶ナノエマルションの磁場印加時におけるダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 山田 祐希

**Abstract** We clarified the dynamics of magnetic-field-induced birefringence in liquid crystal nanoemulsions. The relaxation time depends on the radius of emulsion and magnetic field, but solely on the field in the strong-field regime. The phenomenon can be understood as a balance between thermal rotational diffusion of the emulsions and magnetic-field-induced orientation.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

液晶ナノエマルション (LCNE) とは、界面活性剤によって水-液晶界面を安定化させ、低分子液晶を粒径が小さく均一な液滴として水中に安定に分散させた系である[1]。コア部の液晶は LCNE 内でネマチック相を形成し、配向秩序に起因する異方性を有するが、LCNE はブラウン運動によってランダムに回転するため、一つ一つは光学的な異方性を持ちながら巨視的には等方性を示す。一方ネマチック液晶は磁化率の異方性を有するので、磁場を印加すると個々の LCNE の異方軸が磁場方向に配向し、系全体で磁気誘起複屈折が現れることが分かっている (Fig. 1)。さらに、磁気誘起複屈折の大きさは磁場に大きく依存することから、LCNE の配向分布が磁場と熱揺らぎの拮抗によって決まっていることが示されている[2]。本研究では、磁場 ON 時に誘起される磁気誘起複屈折の緩和時間を計測し、その磁場依存性や LCNE 半径依存性を解析することで、LCNE の磁気誘起配向現象のダイナミクスを明らかにすることを目的とした。

界面活性剤である両親媒性ジブロックポリマーPEO-PCNBPHMA と低分子液晶 7CB からなる LCNE 水分散系に 50wt%のグリセロールを添加した。30°C、クロスニコルで単色光を当て、磁場を ON にした時の透過光強度の変化から緩和時間を解析した。

Fig. 2 に示す通り、磁場強度の増大とともに緩和時間が小さくなつた。また、磁場強度が小さい領域では、LCNE 半径によって緩和時間に大きな違いが見られ、半径が大きくなるほど緩和時間が大きくなる傾向が見られた。一方、磁場強度が大きい領域では半径の大きさに依らず緩和時間は一定となつた。LCNE 配向分布に関して、熱揺らぎのランダム力と磁場配向効果の両方を考慮した運動方程式は以下のようにあらわされる。

$$\frac{\partial P(\theta, t)}{\partial t} = \frac{k_B T}{8\pi\eta r^3} \nabla_\Omega \cdot \left[ \nabla_\Omega P + \frac{P}{k_B T} \nabla_\Omega \left( -\frac{2\pi}{3\mu_0} \Delta\chi r^3 B^2 \cos^2 \theta \right) \right]$$

これは磁場強度が弱いとき、緩和時間が半径の増大に伴つて大きくなる傾向、および磁場強度の増大に伴つて緩和時間が小さくなる傾向をよくあらわす。一方磁場強度が強いときは、熱によるランダム力を無視して以下の方程式で近似でき、液滴の体積に比例する磁気トルク項と、回転粘性の  $r^3$  依存性がキャンセルすることで半径依存性が消え、磁場依存性のみが残ると理解できる。

$$8\pi r^3 \frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi \Delta\chi B^2 r^3}{3\mu_0} \sin 2\theta$$

## References

- [1] S. Bono, Y. Takanishi, J. Yamamoto, 2015, *Europhysics Letters*, 109, 26004
- [2] 松村大毅, 2023, 修士論文, 液晶ナノエマルションの磁気誘起複屈折

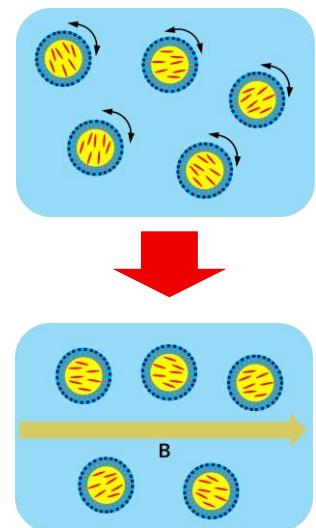


Fig.1. Magnetic field response of liquid crystal nanoemulsions

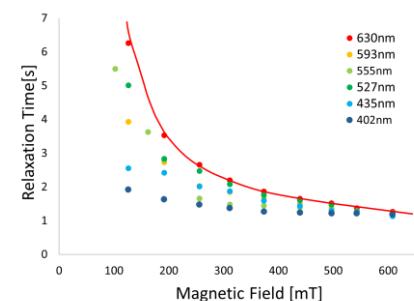


Fig.2. Magnetic field dependence of the relaxation time  $\tau$

# 公開鍵暗号からの 効率的に検証可能な一方向性パズルの構成

物性基礎論：量子情報研究室 正木敬悟

**Abstract** Efficiently-verifiable one-way puzzles (EV-OWPuzz) are assumed to be the most important primitives in the realm of quantum cryptography. If many QCCC primitives exist, then EV-OWPuzzs also exist. To strengthen that EV-OWPuzzs are important in QCCC settings, we construct EV-OWPuzzs from QCCC public-key encryptions.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

古典暗号の分野においては一方向性関数が重要な役割を果たしていると考えられている。それはほとんど全ての暗号プリミティブから一方向性関数を構成できるからである。しかし中には一方向性関数だけではなく、トラップドア関数を構成することができるものもある。つまり古典暗号プリミティブはトラップドア関数も構成できるグループと、一方向性関数しか構成できないようなグループに分類することができる。

同じような分類が量子暗号でも考えられている。量子暗号の分野においては、暗号プリミティブは以下の3つに分類されるであろうと考えられている[1]。

1.  $BQP = QCMA$  で存在できなくなる
2.  $BQP = QCMA$  でも存在するかもしれないが、 $BQP = PP$  で存在できなくなる
3.  $BQP = PP$  でも存在するかもしれないが、 $\#P$  オラクルで存在できなくなる

これらのそれぞれのグループにおいて、最も基本的な暗号プリミティブと考えられているのがそれ以下のである。

1. 効率的に検証可能な一方向性パズル (EV-OWPuzz)
2. 一方向性パズル (OWPuzz)
3. EFI ペア

これらの暗号プリミティブが基本的であると考えられているのは、それぞれがグループに属するほぼ全ての暗号プリミティブから構成できることが知られているからである。このような場合少なくとも基本的な暗号プリミティブが実現可能でなければ、それらを構成できる全ての暗号プリミティブは実現できないと言える。したがって、それぞれのグループに関する解析は、対応する基本的な暗号プリミティブのみを解析することによってある程度進むということになる。

ここで我々は EV-OWPuzz [2] が最も基本的な暗号プリミティブであると考えられている、1のグループについて考察した。このグループに属するのは、手元では量子計算が可能だが通信は古典的にしか行えない状況 (QCCC) における非対話型の暗号プリミティブである。このグループには QCCC という状況において重要な暗号プリミティブの1つである QCCC 公開鍵暗号が含まれる。しかし QCCC 公開鍵暗号から EV-OWPuzz を構成できることは、明示的には示されていなかった。そこで本研究で我々は QCCC 公開鍵暗号から EV-OWPuzz を構成できることを明示的に示し、1のグループの基本的な暗号プリミティブが EV-OWPuzz であるという論拠を補強した。

## References

- [1] E. Goldin *et al.*, “Countcypt: Quantum Cryptography between QCMA and PP”, arXiv: 2410.14792 (2024).
- [2] K. Chung *et al.*, “On central primitives for quantum cryptography with classical communication”, CRYPTO 2024.

# 分子時計構築に向けたテラヘルツ微分変調分光システム

光物性研究室 田中東樹

**Abstract** High-signal-to-noise-ratio (SNR) terahertz spectroscopy system is critical for molecular clocks. By tailoring the intensity modulation scheme within a superheterodyne detection system, we demonstrate the acquisition of high-SNR derivative spectra of acetonitrile rotational transitions. We also discuss terahertz frequency stabilization utilizing this technique.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

近年、テラヘルツ(THz)周波数標準の開発に向けて、気体分子の回転遷移を利用した THz 光源の周波数安定化が盛んに研究されている[1]。回転遷移は THz 光により気体分子の回転準位が変化する過程である。回転遷移の絶対遷移周波数は安定しているため、THz 周波数リファレンスとして用いることができる。そのために、気体分子の回転遷移を利用した THz 領域の周波数標準を分子時計と呼ぶ。

分子時計では回転遷移に起因する吸収スペクトルを利用して周波数安定化を行う。これには位相変調器を用いた微分変調分光によって得られる微分型吸収スペクトルが用いられる。微分型吸収スペクトルは光源の周波数と遷移周波数の差に比例した大きさを持つため、それを 0 にするフィードバック制御を行うことで周波数安定化が実現される。このとき、高い周波数安定性を得るためにには、微分型吸収スペクトルを高い S/N 比で取得する必要がある。これまでの分子時計の研究では、光源やガスセルに対する工夫を行うことで S/N 比を高くする試みが行われてきた。一方で、微分型吸収スペクトルと THz 検出器には S/N 比を最大化する変調周波数にミスマッチが存在し、この問題の解決に取り組んだ例は無かった。

そこで本研究では、強度変調器を用いた 2 種類の変調による、スーパーへテロダイン方式の検出方法を考案し実証した。この手法では、強度変調器の伝達関数から計算した特別な RF バイアスを利用することで、THz 検出器に最適な中間周波数( $f_{\text{if}} = 12 \text{ MHz}$ )での振幅変調と、微分型吸収スペクトルに最適な変調周波数( $f_m = 500 \text{ kHz}$ )での微分変調を行う。この変調を受けた THz 光の検出信号を  $f_{\text{if}}$  で位相敏感検出すると、高い S/N 比で信号を供給できる。よって、中間周波数信号を  $f_m$  で位相敏感検出することで、ミスマッチが解消された高い S/N 比の微分型吸収スペクトルが得られる(スーパーへテロダイン方式)。通常のスーパーへテロダイン方式では周波数変換のために光源を追加する必要があるが、本研究では位相変調器を強度変調器に変更し、印加電圧波形を任意に設計することで、歪みが小さいスーパーへテロダイン方式を実現した。

Fig. 1 は中心周波数  $312.6877450(4) \text{ GHz}$ [2] に観測されるアセトニトリル( $\text{CH}_3\text{CN}$ )の  $(J, K) = (17, 0) \leftarrow (16, 0)$  回転遷移に対して微分変調分光を行った結果である。スーパーへテロダイン方式(右図)によって得られた微分型吸収スペクトルを非スーパーへテロダイン方式によるもの(左図)と比べると、S/N 比で 5.9 倍の向上が得られた。スーパーへテロダイン方式による微分型吸収スペクトルを積分すると吸収スペクトルを再現することができたことから、我々が考案した手法を用いると歪みが小さい微分型吸収スペクトルを得ることが可能であることが確認できた。また、S/N 比からフィードバック制御可能な周波数安定性を求める、今回提案した手法による分子時計の将来性について議論する。

## References

- [1] J. Greenberg, B. M. Heffernan, and A. Rolland, “Terahertz microcomb oscillator stabilized by molecular rotation”, *APL Photonics* **9**, 010802 (2024).
- [2] Müller, H. S. P., Drouin, B. J., and Pearson, J. C., “Rotational spectra of isotopic species of methyl cyanide,  $\text{CH}_3\text{CN}$ , in their ground vibrational states up to terahertz frequencies”, *A&A* **506**, 1487–1499 (2009).

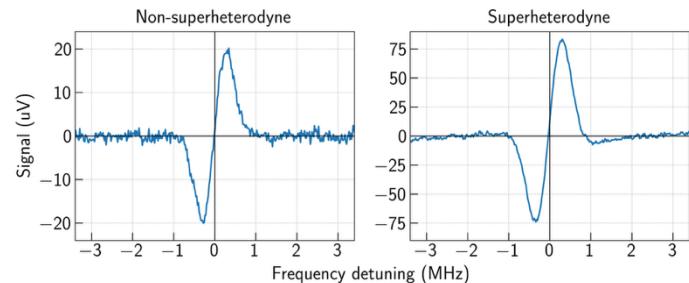


Fig. 1 Derivative spectra obtained by non-superheterodyne (left) and superheterodyne (right) detection scheme. The offsets in the data were removed.

# 超流動 $^4\text{He}$ 中における微粒子の回転運動の光駆動

光物性研究室 荒木大希

**Abstract** We demonstrated optically driven rotation of optically trapped nanoparticles immersed in superfluid helium using circularly polarized light. This approach allows us to study particle-superfluid interactions using light, enabling investigations of the superfluid dynamics in a highly localized region.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

超流動ヘリウム ( $\text{He II}$ ) は、代表的な量子流体であり、その乱流状態は、量子渦と呼ばれる安定かつ同種な渦の集合として記述される。この単純な構造により、量子乱流は乱流現象を要素還元的に理解するための理想的な研究対象であり、古典・量子を問わず乱流の普遍的性質を調べるために有用な系だと考えられている[1]。これまで量子乱流は、 $\text{He II}$ を構成する 2 種類の流体成分（超流動成分、常流動成分）の流れをヒーターで駆動する熱対向流の研究や、振動物体によって量子乱流を生成・検出する研究によって調べられてきた。例えば Jäger (1995) らは、 $\text{He II}$ 中で半径  $100 \mu\text{m}$  の固体球を振動させ、その駆動力がある臨界値を超えると、球近傍での渦線密度が増加することで、球の応答が大きく変化することを観測した[2]。このような駆動体を用いた手法は、量子乱流が力学的にどのように生成され、どのように臨界的に立ち上がるのか、ということを調べるために有効である。しかしながら、従来の研究で用いられてきた駆動体は  $\text{mm}$  あるいはサブ  $\text{mm}$  スケールのものがほとんどであった。量子乱流・量子渦の微視的振る舞いにアクセスするためには、より小さなサイズの駆動体を用いた実験が必要である。また、振動運動による流れの生成では、駆動体のサイズと振動の振幅という 2 つの空間スケールが混在するため、流れの様相の解釈が複雑化する。したがって、より単純な駆動機構によって流れを生成し、そのダイナミクスを見通しよく理解する手法の確立が求められる。

そこで本研究では、光学的操作によってナノ微粒子の自転運動を駆動し、 $\text{He II}$ 中の流れの生成を行うことで、その性質の探索を行なった。具体的には、光トラップした微粒子を回転させることで、その角運動量を  $\text{He II}$ に転写し、その運動を駆動した。強く集光したレーザー光の焦点付近に存在する微粒子は、光強度勾配に比例した力を受け、最も強度の高い焦点近傍に捕捉される。すなわち、対象となる微粒子を非接触で三次元空間中に固定することができる。これが光トラップである。本研究では、波長  $1550 \text{ nm}$ 、 $500 \text{ mW}$  の円偏光 CW レーザーを開口数が 0.5 の非球面レンズで集光することで光トラップを行い、半径数十  $\text{nm}$  程度の微粒子を捕捉した。トラップする微粒子は、Si 基板に波長  $355 \text{ nm}$  のパルスレーザー（繰り返し周波数  $50 \text{ Hz}$ 、パルスあたりのエネルギー  $1 \text{ mJ}$ ）を照射し、レーザーアブレーションを施すことで物質を固体試料から放出させ、それらが再凝固する過程を通じて生成した。さらに、角運動量転写のためには、波長  $532 \text{ nm}$  の円偏光 CW レーザー ( $20 \sim 200 \text{ mW}$ ) を用いた。微粒子の回転周波数は、光から受け取るトルクと常流動成分からの抵抗トルクの釣り合いによって決定される。また、非対称な形状の微粒子の回転に伴い散乱光の偏光状態が周期的に変化するため、これをバランス検出を用いた偏光解析で測定することで、微粒子の回転周波数を評価できる。

上記の実験の結果、 $\text{He II}$ 中において、半径おおよそ  $50 \text{ nm}$  の Si 微粒子の数  $\text{kHz} \sim$  数十  $\text{kHz}$  の回転を駆動することに成功した。このようにバルク  $\text{He II}$ 中で微粒子の回転運動を駆動したのは、本研究が初めてであり、 $\text{He II}$ におけるナノスケールの流体応答を駆動・計測する新たな実験手法を提示するものである。また、 $5 \sim 10 \text{ kHz}$  の回転周波数を境に、微粒子の運動が閾値的に不安定化することも確認された。この背景には、量子乱流の生成をはじめとした  $\text{He II}$ の流れの臨界的なダイナミクスがある可能性が示唆された。

## References

- [1] 坪田誠, 笠松健一, 小林未知数, 竹内宏光, 『量子流体力学』, 丸善出版 (2018).
- [2] J. Jäger *et al.*, *Physica B: Condensed Matter*, 210(3-4):201–208 (1995).

# 極低温ダイヤモンドにおける真性移動度の抽出

光物性研究室 寺本創

**Abstract** We have analyzed the cyclotron resonance spectra of holes in diamond to extract the intrinsic mobility at cryogenic temperatures. By considering the skin effect enhanced by high mobility, we successfully obtained the ever-highest hole mobility of  $(1.1 \pm 0.2) \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  in diamond, which demonstrates bipolar carrier transport.  
© 2026 Department of Physics, Kyoto University

移動度は、半導体中のキャリア（電子と正孔の総称）の動きやすさを表す指標であり、デバイス性能を決める重要な物性値である。これまで、バルク半導体中最高の電子移動度  $3.6 \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  [1] が極低温（3 K）の真性ダイヤモンド結晶で報告されており、この移動度はマイクロ波を用いたサイクロトロン共鳴スペクトルの線幅から抽出したものである。一方、正孔移動度の報告値は 13 K における  $1 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  [2] にとどまっており、キャリア加熱[3]が抑えられる極低温かつ弱マイクロ波の条件下で共鳴スペクトルが対称形から大きくゆがむことが移動度抽出を阻んできた。これにより、極低温ダイヤモンドでの両極性キャリア輸送は未だ実証されていない。そこで本研究では、正孔のサイクロトロン共鳴スペクトルがゆがむ原因を究明し、弱マイクロ波での移動度抽出を可能にすることを目指した。

実験では、温度 2.4 K に冷却したダイヤモンド結晶中に光励起キャリアを生成し、磁場掃引下でのマイクロ波吸収を局部発振器に位相同期して検出し、図 1(a)に示す正孔の微分スペクトルを取得した。弱マイクロ波において特にスペクトルのゆがみが大きくなることが分かった。このゆがみの原因を究明するにあたり、移動度はキャリア温度の低下とともに高くなり試料の伝導性が増すことと、伝導性物質における電子スピニ共鳴スペクトルが表皮効果によってゆがみ、吸収成分（図 1(b)の破線）と分散成分（図 1(b)の点破線）の線形和（図 1(b)の実線）で表される[4-6]ことに着目した。本研究では、この理論をサイクロトロン共鳴に初めて適用し、高い移動度によってスペクトルがゆがむことを示した。図 1(a)の破線は吸収成分と分散成分の線形和であり、弱マイクロ波下のサイクロトロン共鳴スペクトルをよく再現している。この結果、正孔移動度の最高値  $(1.1 \pm 0.2) \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  を抽出できた（図 1(c））。これは、ダイヤモンド内の両極性キャリア輸送を実証する重要な結果である。

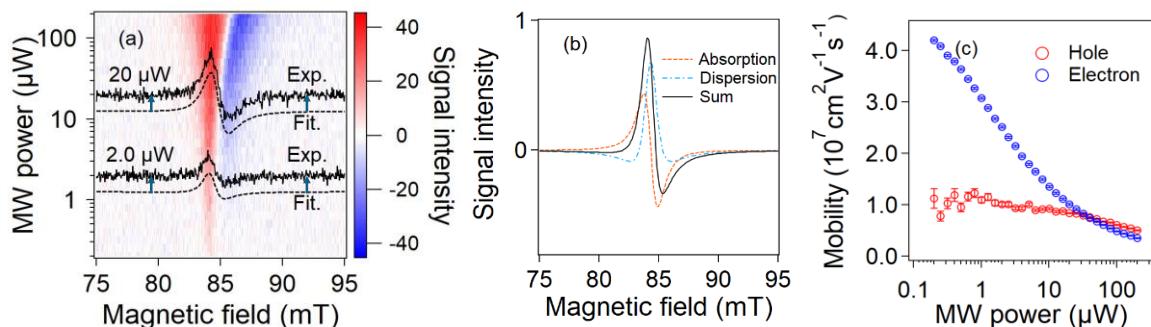


Fig. 1. (a) Differential CR spectra of holes (color map and full lines) and their fitting functions (dashed lines shown with vertical offsets) in intrinsic diamond at 2.4 K, measured at different microwave powers. (b) Theoretical spectra of absorption (dashed line), dispersion (dashed-dotted line), and their sum (full line). (c) Carrier mobilities extracted from the distorted CR spectra.

## References

- [1] K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, J. Isberg, and N. Naka, Phys. Rev. Appl. **17**, L031001 (2022).
- [2] A. Portier, *et al.*, Phys. Rev. Appl. **20**, 024037 (2023).
- [3] H. Malissa, Z. Wilamowski and W. Jantsch, AIP Conf. Proc. **772**, 1218 (2005).
- [4] N. Bloembergen, J. Appl. Phys. **23**, 1383 (1952).
- [5] A. C. Chapman, P. Rhodes, and E. F. W. Seymour, Proc. Phys. Soc. 4-B **70**, 345 (1957).
- [6] G. G. Lesseux, *et al.*, J. Phys. Cond. Matter **28**, 125601 (2016).

# 例外点に対する強相関効果

凝縮系理論研究室 加藤武藏

**Abstract** We analyze the impact of many-body interactions on exceptional points in terms of symmetry and topology. In particular, we reveal that symmetry-preserving interactions can induce two-fold exceptional lines and three-fold exceptional points in a two-dimensional parameter space of a non-Hermitian quantum dot with charge-U(1), spin-parity, and parity-time symmetry.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

エルミート系において、相互作用が物質のトポロジカル相にどのような影響を及ぼすかについては、これまでに多くの研究が行われてきた。相互作用によって、許されるトポロジカル状態の種類が減少する「トポロジカル分類のリダクション」と呼ばれる現象が示されている[1]だけでなく、自由粒子系では自明相しか存在しない場合でも、相互作用の導入によってのみ実現される interaction-enabled なトポロジカル相が現れることも知られている[2]。さらに、トポロジカル相における強相関効果は、トポロジカルポンプに代表されるようにパラメータ空間のトポロジーへと拡張され、パラメータ空間においてもトポロジカル分類のリダクションが生じることが指摘されている[3]。

一方で、トポロジーの概念は非エルミート系にも拡張され、エルミート系には存在しない新しいトポロジカル構造が明らかにされてきた[4]。非エルミートトポロジーに対する強相関効果についても近年研究が進み、離散対称性をもつフェルミオン系では、パラメータ空間における非エルミートトポロジーの分類学的リダクションに伴い、例外点が消失し得ることが議論されている[5]。しかし、この問題は依然として十分に理解されておらず、ボソン系の振る舞いは未解明のままである。さらに、interaction-enabled な非エルミートトポロジーや、多重例外点に対する強相関効果については、ほとんど研究が行われていない。

このような背景のもと、本研究では、charge-U(1)、擬 spin-parity 対称性、および  $PT$  対称性をもち、二つのパラメータ自由度を有するゼロ次元のボソン系およびフェルミオン系を解析した。その結果、特定の条件を満たす部分空間においては、対称性を破らない相互作用の導入によって初めてゼロ次元トポロジーが非自明になることを示し、これにより二次元パラメータ空間において interaction-enabled two-fold exceptional lines (EL2) の発現をトイモデルにおいて明らかにした。この interaction-enabled EL2 の存在は、適切な初期状態に対するロスレートの振る舞いと結び付いている。さらに、この議論をポイントギャップ/ラインギャップの枠組みを越えたトポロジーを有する三重例外点 (EP3) へ拡張し、interaction-enabled EP3 の発現も提案する。

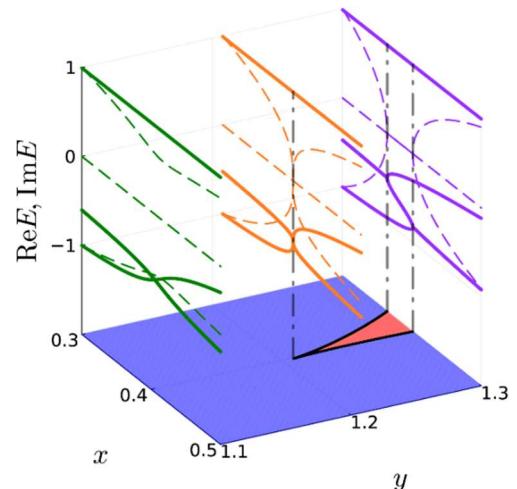


Fig. 1. Emergence of interaction-enabled EL2 and EP3 in a two-dimensional parameter space described by  $x$  and  $y$ .

The red (blue) region on the base indicates the parameter region with a  $\mathbb{Z}_2$  index of +1 (-1), while the black line represents the interaction-enabled EL2. The color plot on the top shows the  $x$ -dependence of the complex eigenvalues at specific values of  $y$ .

## References

- [1] L. Fidkowski and A. Kitaev, Phys. Rev. B **83**, 075103 (2011).
- [2] M. F. Lapa, J. C. Y. Teo, and T. L. Hughes, Phys. Rev. B **93**, 115131 (2016).
- [3] C.-M. Jian and C. Xu, Phys. Rev. X **8**, 041030 (2018).
- [4] Z. Gong *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).
- [5] T. Yoshida and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B **107**, 075118 (2023).

# 走査型トンネル分光測定を用いた ミスフィット化合物 $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$ の研究

量子凝縮物性研究室 北野優

**Abstract** We studied the misfit van der Waals superlattice  $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$  using scanning tunneling microscopy. Cleavage exposes a monolayer  $\text{NbSe}_2$  surface showing a  $3\times 3$  CDW and spectra similar to isolated monolayer  $\text{NbSe}_2$ , indicating minimal charge transfer from the  $\text{PbSe}$  layer and preserved two-dimensional electronic states of  $\text{NbSe}_2$ .

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

代表的な二次元物質群である遷移金属ダイカルコゲナイトは、超伝導や電荷密度波(CDW)など多彩な電子状態を示す。近年では積層することでヘテロ構造を作製し、電子状態を設計・制御しようとする研究が広く行われている[1,2]。このような研究の流れの中で、人工的なヘテロ構造をバルク物質として実現したバルクファンデルワールス(vdW)超格子が新たな研究対象として注目されている。バルク vdW 超格子は、変調された二次元電子状態を調べる有効な研究基盤として位置づけられている。実際に、新たな電子状態が次々と報告されている[3-5]。

ミスフィット層状化合物は、バルク vdW 超格子の一種であり、三角格子層と四角格子層が積層した特徴的な層状構造を有する。これまでの研究から、電気伝導などの基本的な輸送特性は主として三角格子層が担うことが知られている[6]。一方で、四角格子層から三角格子層への電荷移動が生じることや、三角格子層における CDW が抑制されることが報告されている[7]。これらの結果は、ミスフィット化合物においては三角格子層の電子物性が対応する単結晶とは異なり、隣接層との相互作用によって変調を受けている可能性を示唆している。

本研究の対象物質である $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$  は、 $\text{NbSe}_2$ 層(三方晶構造)2枚と  $\text{PbSe}$  層(NaCl 構造)1枚が交互に積層したミスフィット層状化合物である(図)。最近、高磁場下での輸送測定により、層選択性のフルデフェレル-ラーキン-オフチニコフ状態という特異な超伝導状態が報告された[8]。この結果は、本物質における層構造の重要性を示唆しているが、その背後にある基本的な電子状態には不明のままである。

そこで、本研究では、走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いて、この物質の電子状態を調べた。STM 像の測定から、最表面は常に  $\text{NbSe}_2$ 層であることが明らかになった。このことは、へき開は 2 枚の  $\text{NbSe}_2$ 層間で起こり、結果として、 $\text{PbSe}$  層を基板とする単層  $\text{NbSe}_2$ が最表面に形成されることを示している。また、STM 像には、バルクあるいは単層  $\text{NbSe}_2$ と同じ、格子間隔の 3 倍周期の CDW が明瞭に観測された。さらに、微分コンダクタンス測定から得られたスペクトルは、二層グラフェン基板上の単層  $\text{NbSe}_2$ についての既報の結果と類似している。これらの測定結果は、 $\text{PbSe}$  層から顕著な電荷移動が生じていないこと、および単層  $\text{NbSe}_2$ の電子状態がよく保存されていることを意味する。すなわち、本物質は、 $\text{PbSe}$  層のインターラーチングによって二次元性が強められた  $\text{NbSe}_2$ 系と捉えることができる。

## References

- [1] K. S. Novoselov *et al.*, Science 353, aac9439 (2016).
- [2] A. K. Geim and I. V. Grigorieva, Nature 499, 419 (2013).
- [3] C. Hu *et al.*, Nat Commun 11, 97 (2020).
- [4] E. Persky *et al.*, Nature 607, 692 (2022).
- [5] A. Devarakonda *et al.*, Nature 631, 526 (2024).
- [6] G. A. Wiegers, Prog. Solid State Chem. 24, 1 (1996).
- [7] L. Zullo *et al.*, Nano. Lett. 23, 6658-6663 (2023)
- [8] Y. M. Itahashi *et al.*, Nat. Commun. 16, 7022 (2025).

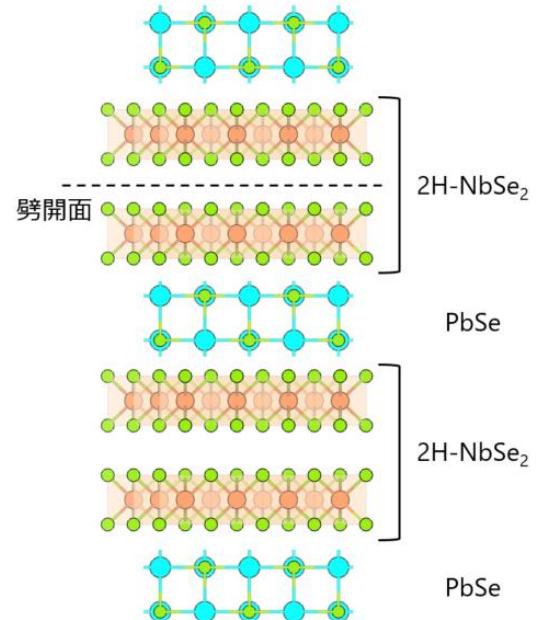


図 :  $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_2$  の結晶構造

# 量子幾何による奇parity磁性

凝縮系理論グループ 工藤幹太

**Abstract** We study the effects of quantum geometry on odd-parity multipole magnetism. We find that the ferroic multipole fluctuation is induced by quantum geometry. Due to the Hubbard interaction, the quantum-geometric multipole fluctuations condense into the multipole order. We predict complex magnetic correlations, which are a signature of quantum-geometric multipole magnetism.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

固体物理における物性の理解はバンド理論から得られるエネルギー分散による理解が中心的であった。しかし、フラットバンド系やトポロジカル物性の発展などに触発されて、ブロック波動関数の非自明な波数依存性が物性へ与える影響が量子幾何の文脈で注目を集めている。量子幾何効果は一種の多バンド効果であり、多バンド系には副格子や軌道の自由度が必要である。また、多体問題に対する量子幾何効果について、強磁性揺らぎに対する量子幾何の研究が進展している[1, 2]。しかし、磁化以外のより複雑な磁気構造については交替磁性に関する[3]が存在する程度である。交替磁性や奇parity多極子のような非自明な対称性の破れを引き起こすような非従来型磁性は軌道や副格子の自由度を利用して引き起こされるため、そのような系は必然的に多バンド系となり量子幾何が現れることが期待される。

そこで、我々は奇parity多極子秩序に対する量子幾何効果を調べた[4]。スピン感受率と奇parity多極子感受率の双方を統一的に理解する枠組みを構築し、量子計量の普遍的役割を導き、広いパラメータ領域で奇parity多極子感受率に対して量子幾何が強く効き、スピン感受率よりも化学ポテンシャル依存性が頑強であることを明らかにした。また、ハバード相互作用によりこの量子幾何誘起の多極子揺らぎは凝縮し多極子秩序へとなる。我々は、量子幾何多極子磁性の特徴的な指標となる複雑な磁気相関を予測する。

## References

- [1] T. Kitamura, A. Daido, and Y. Yanase, Rev. Lett. 132, 036001 (2024).
- [2] T. Kitamura, H. Nakai, A. Daido, and Y. Yanase, (2025), arXiv:2505.01089 [cond-mat.str-el].
- [3] N. Heinsdorf, (2024), arXiv:2410.12789.
- [4] K. Kudo and Y. Yanase, (2025), arXiv:2505.20907 [cond-mat.str-el]

# フィードバック冷却における 情報熱力学的解析及び機械学習応用

Dechant 研究室 小林秀太

**Abstract** Feedback cooling is practically important and well-studied in information thermodynamics. To handle analytically intractable nonlinearities, we implement the “demon” as deep reinforcement learning that sequentially acquires information and applies feedback control to reduce kinetic temperature in a Langevin system.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

Controlling fluctuating systems is an important challenge for understanding, manipulating, and designing physical and biological systems at the nano- and microscales. While thermal fluctuations can be neglected at macroscopic scales through averaging, they crucially influence system behavior at the nano- and microscales, where the dynamics must be described as stochastic processes.

Feedback cooling, one of the optimal control problems for fluctuating systems, applies external forces according to the observed system state in order to suppress entropy production and effectively drive the system toward low-energy states. This process was formulated by Kim and Qian within the framework of Maxwell’s demon, where they showed that the second law can be extended by introducing the entropy pumping rate [1]. Subsequently, Sandberg and Horowitz demonstrated that, when linearity is imposed on the dynamics of the feedback controller, the Kalman filter becomes an information-thermodynamically optimal controller [2]. However, this result is limited in that it constrains the controller dynamics and assumes that the target system is also linear. In this study, we aim to relax these restrictions by investigating the problem from both analytical and numerical perspectives.

One of our results is that, regardless of the specific feedback structure, the information flow exchanged between the system and the controller can be decomposed into the entropy pumping rate and an additional contribution. We formulated the latter as the excess information flow [3]. Moreover, we show that the excess information flow is indispensable for maintaining finite measurement accuracy, leading to a trade-off between measurement accuracy and the cost associated with information processing (or control).

On the other hand, when the system exhibits nonlinear dynamics, obtaining an analytic optimal solution is generally difficult. In recent years, applying machine learning to physical problems has attracted significant attention, and it is expected to provide a way to tackle such analytically intractable nonlinear problems. As another result of this study, we constructed a controller that achieves feedback cooling via deep reinforcement learning in a more realistic setting where particles interact nonlinearly.

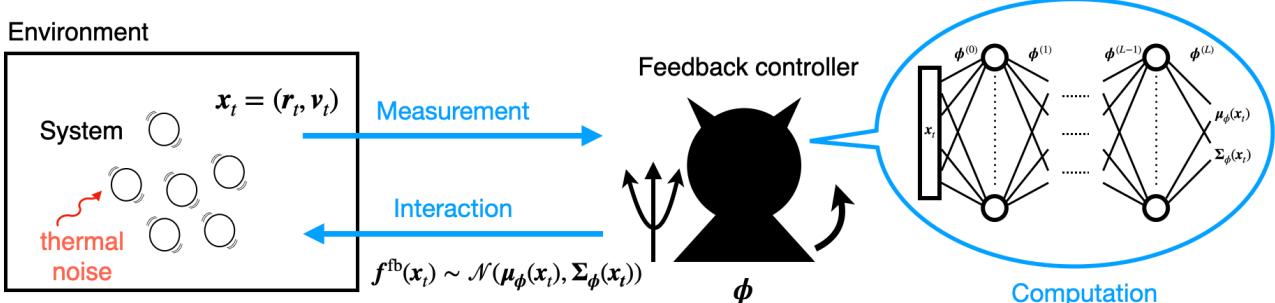


Fig. 1. Schematic description of feedback cooling with DRL

## References

- [1] Kim, K. H., & Qian, H. (2004). *Physical review letters*, 93(12), 120602.
- [2] Horowitz, J. M., & Sandberg, H. (2014). *New Journal of Physics*, 16(12), 125007.
- [3] Dechant, A., Hüpfl, J., KS., Ito, S., & Rotter, S. (2025). arXiv:2508.12875, 2025.

# $^{173}\text{Yb}$ 原子アレイの 1 量子ビット操作の実現と 2 量子ビットゲートに向けたリドベルグ分光

量子光学研究室 齊藤啓都

**Abstract** We report two achievements toward neutral-atom quantum computing. First, we demonstrate coherent control of spin-cat qubits encoded in the nuclear spin states of  $^{173}\text{Yb}$  atoms in an optical tweezer array. Second, we perform spectroscopy of  $^{173}\text{Yb}$  atomic beams, resolving high-lying Rydberg lines.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

光ピンセットアレイ中の冷却中性原子系は高い制御性と孤立性を備えた量子系として、量子シミュレーションや量子計算の研究に広く用いられている[1]。この系は、個々の原子の配置を柔軟に制御できることに加え、高い拡張性や長いコヒーレンス時間有するといった特徴を併せ持つことから、量子誤り訂正を備えた誤り耐性量子計算を実装するプラットフォームとして有望視されている。一方で、実用的な量子計算の実現には、膨大な数の物理量子ビットが必要であり、単純にシステムサイズを拡大するだけでは実装上の限界があると考えられている。こうした課題に対する有力なアプローチの一つが、物理系に固有のノイズ構造を積極的に利用する偏りノイズ量子ビットの導入である。特定の種類のノイズに特化した誤り訂正符号を利用することで、論理エラーに対する高いエラー閾値を達成でき、必要な物理量子ビット数の削減も期待される[2]。

多準位スピン系を用いた spin-cat 量子ビット[3]は、論理ビット反転誤りが抑制され、位相誤りに強く偏ったノイズ特性を自然に備えることから、偏りノイズに最適化された量子誤り訂正符号との高い親和性を有する。我々は、この spin-cat 量子ビットの物理実装として、核スピン  $I = 5/2$  を有する  $^{173}\text{Yb}$  原子に着目した。本研究では、光ピンセット中の  $^{173}\text{Yb}$  原子の基底状態核スピン自由度に符号化された spin-cat 量子ビットに対して、单一ビームラマン遷移を用いたコヒーレント操作を実証した。これにより SU(2) 回転および spin-cat 状態の生成を実現した (Fig. 1)。

また、中性原子系では、リドベルグ状態に励起された原子間の相互作用を利用することで 2 量子ビットゲートが実現される[4]。 $^{173}\text{Yb}$  の場合は、超微細構造によってリドベルグ準位のスペクトルが著しく複雑化し、不要な共鳴励起や相互作用を通じて 2 量子ビットゲートの忠実度低下を引き起こすことが指摘されている[5]。そのため、高忠実度ゲートを実現するには、どのリドベルグ準位を用いるかを慎重に選択する必要があり、精密なリドベルグ分光によるスペクトルの把握が不可欠である。本研究では、原子ビームを用いたリドベルグ分光に向けて新たに実験系を構築し、 $^{173}\text{Yb}$  の共鳴スペクトルの観測に成功した (Fig. 2)。

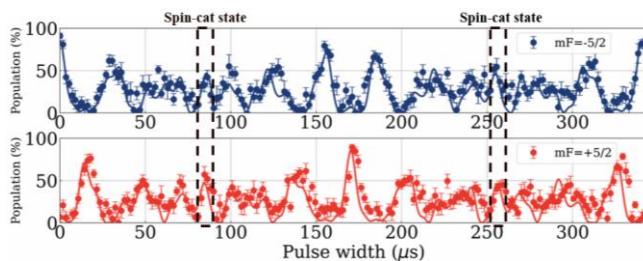


Fig. 1. Spin-cat state generation. The solid line represents the simulation based on the master equation.

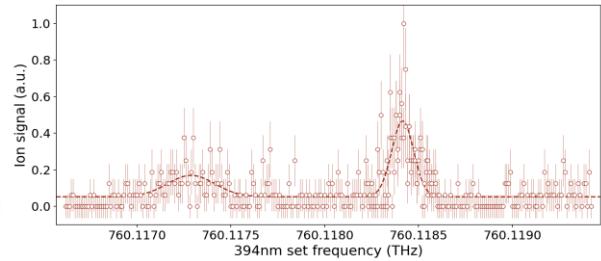


Fig. 2. Rydberg spectrum observed for  $^{173}\text{Yb}$  atoms.

## References

- [1] A.M. Kaufman and K.-K. Ni, Nat. Phys. **17**, 1324-1333 (2021).
- [2] D.K. Tuckett, et al., PRL **120**, 050505 (2018).
- [3] S. Omanakuttan, et al., PRX Quantum **5**, 020355 (2024).
- [4] D. Jaksch et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 2208-2211 (2000).
- [5] M. Peper et al., Phys. Rev. X **15**, 011009 (2025).

# ハニカム構造を持つ層状 5d 電子系超伝導体 $\text{La}_2\text{IOs}_2$ における構造相転移と非従来型超伝導

量子凝縮物性研究室 酒井葵生

**Abstract** We conducted  $^{139}\text{La}$ -NMR measurements on  $\text{La}_2\text{IOs}_2$ , a layered superconductor with a honeycomb structure. We confirmed a structural phase transition at 60 K and an anomaly suggesting CDW formation at 30 K. In the superconducting state below 12 K, the absence of a coherence peak and the presence of a finite residual density of states in nuclear spin-lattice relaxation rate suggest the realization of unconventional superconductivity.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

絶対零度に向かって 2 次相転移温度が消失する量子臨界点近傍では、量子臨界揺らぎが電子間の有効相互作用を媒介し非従来型超伝導が誘起されることが知られている[1]。2023 年に超伝導が報告された  $\text{La}_2\text{IOs}_2$  は層状ハニカム構造を持つ 5d 電子系超伝導体で、関連物質中で最も高い超伝導転移温度  $T_c = 12$  K を示す[2]。本物質では  $T_{a1} = 60$  K および  $T_{a2} = 30$  K において磁化率に異常が見られ、先行研究の X 線回折 (XRD) 測定からは  $T_{a1}$  で六方晶から直方晶への構造変化が報告されている[2]。ただし  $T_{a2}$  に関してはまだ起源はわかっていない。類縁物質  $\text{La}_2\text{IRu}_2$  でも同様の異常と超伝導 ( $T_c = 4.8$  K,  $T_{a1} = 140$  K,  $T_{a2} = 85$  K) が報告されている[3]。 $\text{La}_2\text{IRu}_2$  において Ru をより重い Os に置換することで、 $T_c$  が上昇する点は従来の電子格子相互作用による超伝導から期待される振る舞いと異なり、 $T_{a1}, T_{a2}$  の異常の起源や超伝導対称性の解明が重要な課題となっている。

我々は  $\text{La}_2\text{IOs}_2$  の常伝導・超伝導状態の性質を調べるために  $^{139}\text{La}$ -NMR 測定を行った。まず NMR コイルを用いた交流磁化率測定から、 $\text{La}_2\text{IOs}_2$  の超伝導状態は 15 T の高磁場下においても維持され、軌道対破壊の理論に基づく上部臨界磁場の振る舞いに比べわずかに大きなものとなっていることを確認した(図 1)。次に、 $^{139}\text{La}$ -NMR スペクトルの測定を行った。 $T_{a1}$  以上ではシャープなセンターピークと明瞭なサテライトピークを観測した。一方、 $T_{a1}$  以下でサテライトピークがブロードになる。このサテライトピークの形状の変化は電場勾配の面内異方性の変化でおおむね理解でき、先行研究の XRD 測定における六方晶から直方晶への構造変化と整合的である。これに対し、 $T_{a2}$  付近ではスペクトル形状に変化は見られないが、核スピン-格子緩和率  $1/T_1T$  が  $T_{a2}$  以下で減少しており、秩序に伴う状態密度の減少が示唆される。これは、 $\text{La}_2\text{IRu}_2$  において最近報告されている  $T_{a2}$  での CDW 形成による状態密度の減少と矛盾しない結果である[3]。なお  $\text{La}_2\text{IRu}_2$  においても  $T_{a2}$  での  $1/T_1T$  の減少は報告されている[4]。

さらに、超伝導対称性を調べるために、 $T_c$  以下で  $1/T_1T$  を測定した(図 2)。BCS 超伝導では、 $1/T_1T$  は  $T_c$  直下でコヒーレンスピーク (CP) を示し、その後指數関数的に減少することが知られている。これに対し  $\text{La}_2\text{IOs}_2$  では CP を示さず、低温で常伝導状態の約 40 % に相当する値が見られる。これはフェルミ準位近傍に大きな残留状態密度が残っていることを示唆しており、不純物効果を考慮した非従来型超伝導体に見られる振舞と酷似している。

今回の結果を  $\text{La}_2\text{IRu}_2$  の結果と合わせると、ハニカム格子系がもつ構造の特殊性に起因する異常とそこで起こる非従来型超伝導に相関がある可能性が考えられる。

## References

- [1] P. Monthoux et al., Nature 450, 1177 (2007).
- [2] H. Ishikawa et al., Phys. Rev. Materials 7, 054804 (2023).
- [3] H. Ishikawa, private communication.
- [4] H. Ishikawa et al., Inorg. Chem. 58, 12888 (2019)

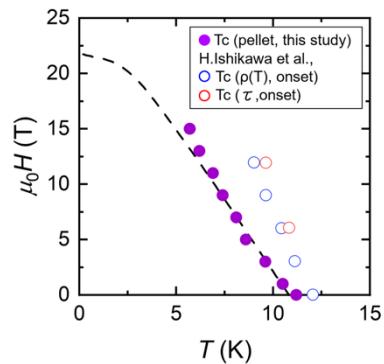


Fig.1 H-T diagram of  $\text{La}_2\text{IOs}_2$

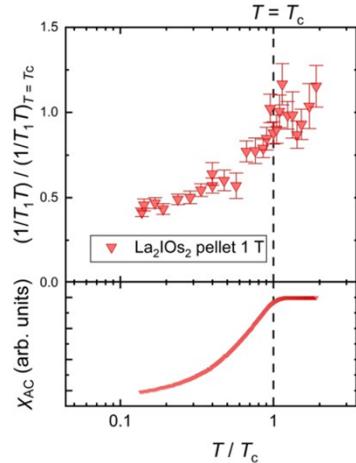


Fig.2 Temperature dependence of  $1/T_1T$

# 非平衡相転移におけるエントロピーゆらぎ 発散機構と普遍性

統計物理・動力学研究室 玉野恭多

**Abstract** We study entropy production fluctuations near nonequilibrium phase transitions in chemical reaction systems. We show that their critical divergence is directly linked to linear stability of macroscopic dynamics, with distinct critical behavior for fixed-point bifurcations and Hopf bifurcations.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

同一の物質や系であっても、制御パラメータの違いにより振る舞いが質的に変化する相転移現象は、物理学の広い分野で重要な役割を果してきた。平衡系においては、相転移は統計力学と熱力学の枠組みにより体系的に理解され、特に臨界点近傍でミクロな詳細に依らない普遍性が成立することが知られている。

一方、非平衡開放系においても、化学反応系をはじめとして、系の定常状態が質的に変化する相転移的な現象が広く観測してきた。とりわけ、Belousov–Zhabotinsky 反応に代表される振動化学反応では、濃度が自発的に時間周期的な振る舞いを示し、平衡系では許されないリミットサイクル状態が実現する。このような現象は、散逸を伴いながら秩序が形成される散逸構造として理解され、従来は主として決定論的力学系としての分岐理論に基づき研究してきた。

近年、確率的ゆらぎのある系の熱力学であるゆらぐ系の熱力学が発展し、非平衡系における不可逆性の指標としてエントロピー生成とそのゆらぎが注目されている[1]。特に、相転移点近傍においてエントロピー生成のゆらぎが発散的挙動を示すことが、化学反応系[2-4]や結合振動子系[5, 6]において数値的に報告されている。しかし、その起源や一般的構造については、個別モデルを超えた理論的理解は未だ確立されていない。

本研究では、化学反応系の非平衡相転移に着目し、エントロピー生成ゆらぎの臨界的発散を理論的に解析した。その結果、エントロピー生成のゆらぎの発散は、マクロな力学系の線形安定性と直接的に結びついていることを明らかにした。また、固定点間の分岐と Hopf 分岐では臨界挙動が本質的に異なり、それぞれに特徴的な臨界指数が現れることがわかった。これらの結果は、非平衡相転移における熱力学量の振る舞いに対する統一的理解を与えることが期待される。

## References

- [1] 齊藤圭司, ゆらぐ系の熱力学 — 非平衡統計力学の発展, SGC ライブライ 182 (サイエンス社, 東京, 2022).
- [2] B. Nguyen, U. Seifert, and A. C. Barato, J. Chem. Phys. 149, 045101 (2018).
- [3] B. Nguyen and U. Seifert, Phys. Rev. E 102, 022101 (2020).
- [4] B. Remlein and U. Seifert, J. Chem. Phys. 160, 134103 (2024).
- [5] L. Oberreiter, U. Seifert, and A. C. Barato, Phys. Rev. Lett. 126, 020603 (2021).
- [6] M. Chudak, M. Esposito, and K. Ptaszynski, arXiv:2512.09718 (2025).

# ネマチック液晶中におけるコロイド粒子のブラウン運動の異常拡散 -並進運動と回転運動の相互関係

ソフトマター研究室 鈴木 佳大

**Abstract** We studied the coupled Brownian dynamics of colloidal particles in nematic liquid crystals. We observed an instantaneous viscous translation-rotation coupling attributed to the asymmetry of the Hedgehog defect, followed by an elastic recoil driven by director field relaxation, highlighting the interplay between hydrodynamic effects and elastic restoring forces.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

**【序】** ネマチック液晶中に表面配向力を付与したコロイド粒子を分散させると、粒子表面の局所配向が巨視的な配向場と結合し、粒子の併進・回転運動や粒子間に強い相互作用を生み出し、「液晶コロイド」と呼ばれる複合系を形成する。特に表面垂直配向を強制した場合は、粒子周囲に Hedgehog 欠陥が自発的に形成され、コロイド粒子のブラウン運動はダイレクター場と弾性的に結合し、並進運動と回転運動の間に相関が現れることが理論的に予測されている[1]。そこで本研究では、回転方位が蛍光励起により視認できる OCULI 粒子を用いた画像解析により粒子の回転運動の精密測定を実現し、並進速度と角速度の間に生じる相関の実験的な検証を目的とした。

**【試料】** カルボン酸系液晶 CC-5 を主成分とする液晶分子に、回転運動を可視化するための増粘剤を添加した混合液晶 (CC-5 90wt%/A6OCB 6wt%/Lauryl Acrylate 4wt%/DMPAP 少量添加) に、表面垂直配向性を有する OCULI 粒子を分散させ、水平配向処理 (AL1254) を施したセルに封入した。高倍率対物レンズを用いた撮影により粒子の運動を記録し、画像解析を経て重心軌跡および回転角の時間変化を記録した。

**【結果】** ダイレクター場に垂直な方向の並進速度  $v_y$  と角速度  $\omega_z$  の相互相関関数は、 $t=0$  において顕著な負のピークを示し、その後  $t=0.05 \sim 0.10$  付近で正領域へ遷移した。初期の負の相関は、Hedgehog 欠陥の構造的非対称性に起因して、並進に伴う粘性応力が逆回転方向のトルクとして働くためであると考えられる。続く正の相関領域は、ダイレクター場の弾性緩和プロセスを反映している。粒子の変位に対して遅れて応答する弾性復元力が、欠陥を引き戻す際に、初期の粘性的な回転とは逆向きのトルクを粒子に誘起したと考えられる。

## References

- [1] T. Turiv, A. Brodin, and V. G. Nazarenko. Anomalous brownian motion of colloidal particle in a nematic environment: effect of the director fluctuations. *Condensed Matter Physics*, Vol. 18, No. 2, p. 23001, 2015.

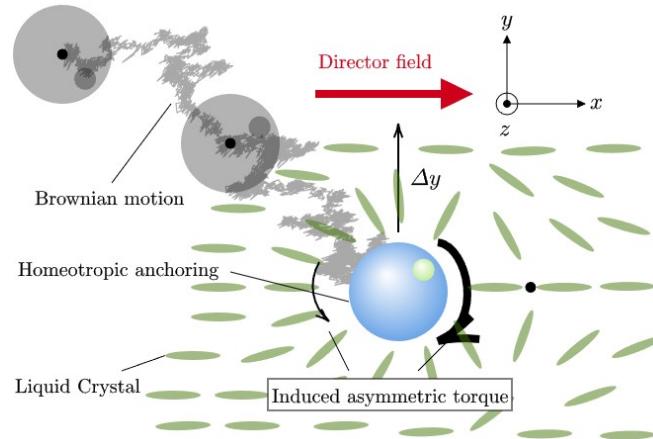


Fig.1: Schematic of coupled Brownian motion, where a random displacement  $\Delta y$  perpendicular to the director induces an asymmetric torque due to structural asymmetry, driving rotational motion.

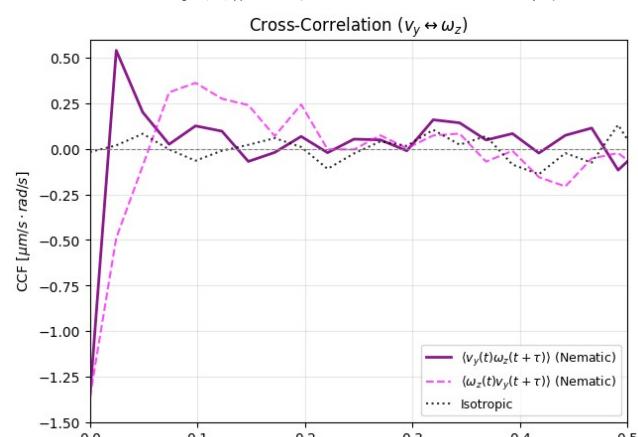


Fig.2: Cross-correlation function of translational velocity and angular velocity.

# トポロジカル秩序相におけるトポロジカルな励起について

佐藤研究室 高間俊至

**Abstract** We introduce higher category theory, conically smooth stratified space, and factorization homology to describe the topological defects in Topological Order, potentially in any dimension. We expose comprehensive review of higher category theory and Topological Quantum Field Theory.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

トポトロジカル秩序 (Topological Order; TO) とは, 热力学極限下で基底状態と第一励起状態の間にギャップを持つ量子多体系のハミルトニアン全体のうち, 絶対零度においてギャップを閉じない断熱変形で互いに移り合えるもの同一視して得られる相のことである. トポロジカル秩序は, その系が持つトロジカル励起によって特徴付けられる. 特に, 平坦な空間上に配置されたトロジカル秩序が持つ全てのトロジカル励起は, 数学的には高次フュージョン圏により記述されると考えられている. しかし, 非自明なトロジーを持つ空間にトロジカル秩序相を配置した際の物理量の振る舞いと, 高次フュージョン圏のデータとの間の関係は非自明である.

本論文では, 特異性のある多様体の定式化である *conically smooth* な層状化空間の理論に基づき, トロジカル秩序相におけるトロジカル励起の解析を行う. そのために, まず平坦な空間に配置された 3 次元トロジカル秩序が持つトロジカル励起を層状化空間および層状化された disk 代数を用いて記述する[1]. その上で, トロジカル秩序が持つ disk 代数の構造を因子化ホモロジーにより「積分」することで, 非自明なトロジーを持つ空間多様体に配置されたトロジカル秩序の基底状態の縮退度を計算する方法を著者独自の観点から説明する[2][3]. これらの手法は本質的に任意次元へ拡張可能である.

さらに, トロジカル秩序の低エネルギー有効理論である, 位相的場の理論 (TQFT) の包括的なレビューを行う. 特に, 2+1 次元 TQFT におけるトロジカル励起をボルディズム圏における構造として記述する, リボングラフ TQFT のレビューを行う. その応用として, 一般化対称性を実現する Symmetry TFT と呼ばれる手法を 1+1 次元の非可逆対称性の場合に解説し, 格子模型における様々な双対性が TQFT によって実現される様を見る[4]. その際に, 層状化空間の理論および因子化ホモロジーとの関連を考察し, 高次フュージョン圏の構成を概観する[5].

## References

- [1] D. Ayala, J. Francis, H. Lee Tanaka, arXiv: 1409.0501 (2014).
- [2] D. Ayala, J. Francis, H. Lee Tanaka, arXiv: 1409.0848 (2014).
- [3] Y. Ai, L. Kong, H. Zheng, arXiv: 1607.08422 (2016).
- [4] D. Aasen, P. Fendley, R. Mong, arXiv: 2008.08598 (2020)
- [5] D. Gaiotto, T. Johnson-Freyd, arXiv: 1905.09566 (2019)

# ファイバー生成により自己駆動する 酢酸菌の波打ち運動に対する力学的評価

時空間秩序・生命物理研究室 雀部太陽

**Abstract** To clarify how self-generated structures influence motility, cellulose-producing *Komagataeibacter hansenii* moving on solid substrates were investigated. Velocity distributions along the first principal component do not differ between motions on and off cellulose tracks, whereas instantaneous velocity distributions do, which indicates selective mechanical constraints imposed by self-generated fibers.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

自律的に運動する個体が集団的な秩序や特徴的な運動様式を示す現象はアクティブマターに特有の重要な性質である [1][2]。その物理的機構を解明するために、アクティブマターエージェントとして様々な微生物が用いられている。微生物の中にはバイオフィルムを生成しながら運動するものも存在する[3]。例えば、微生物の一種である酢酸菌は細胞表面のセルロース合成酵素複合体によって高結晶性のセルロースリボンを連続的に分泌し、その生成過程と運動が強く結びついている[4][5]。さらに、生成されるセルロースリボンはナノスケールでねじれ構造を持ち、力学的に異方的な拘束を細胞に与える可能性が報告されている[6]。しかし、個体が運動と同時に生成する構造物が運動のどの自由度にどのような力学的影響を与えるかについては未だ定量的理解が十分ではない。我々は酢酸菌 *Komagataeibacter hansenii* に着目し、自己生成構造が運動に与える力学的影響を明らかにすることを目的とした。酢酸菌がセルロースファイバーを生成しながら運動する際に、菌体軌跡が波状の特徴的な運動を示すことがわかった。主成分分析を用いて解析を行ったところ、第1主成分方向の平均速度はセルロースファイバー上の運動(on track)とそうでない運動(off track)によって大きく変化しない一方、瞬間の速度には分布の仕方に差が現れた(Fig.1)。また off track の個体では、波打ち運動の振幅が大きくなるとともに、菌体の体長と平均速度の間に正の相関が見られ、体長の長い個体ほど高い移動速度を示す傾向が確認された。一方、on track の個体ではこの相関が弱いことがわかった。これより既存セルロースファイバーによる力学的拘束が、体長に由来する運動自由度の増大を抑制していることが示唆された。これらの結果は、酢酸菌の運動が単なる自己推進ではなく、自己生成したセルロースファイバーという場との相互作用によって強く拘束・制御されていることを示している。本研究は、酢酸菌が単なるセルロース生産菌としてではなく、自己生成構造と相互作用しながら運動する新しいタイプのアクティブマターエージェントとして位置づけられる可能性を与えた。この視点は、自己生成場に結合した非平衡運動というアクティブマター研究の新たな枠組みを提示するものである。

## References

- [1] Ramaswamy, S., *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **1**, 323–345 (2010).
- [2] Be’er, A. and Ariel, G., *Movement Ecology* **7**, 9(2019).
- [3] Klausen, Mikkel, et al., *Molecular microbiology* **48**.6 (2003): 1511-1524.
- [4] Brown, R. M. Jr., Willison, J. H. M., and Richardson, C. L., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **73**, 4565–4569 (1976).
- [5] Kondo, T. et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **99**, 14008–14013 (2002).
- [6] Babi, M. et al., *Biomacromolecules* **24**, 258–268 (2023).

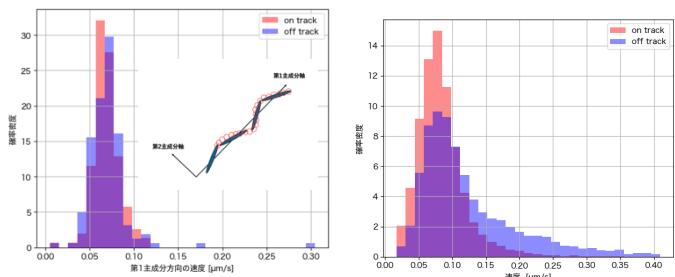


Fig.1: Velocity analysis of *Komagataeibacter hansenii*. Probability density function of velocity in the first principal component direction (Left figure) and instantaneous velocity (Right figure).

The left inset figure shows the tracking of *Komagataeibacter hansenii* and an image diagram when performing Principal Component Analysis on it.

# Neural network quantum states study for toric code under isotropic and antiferromagnetic Heisenberg interactions

Condensed matter theory group      JANG WON

**Abstract** neural network quantum state and Schrieffer-Wolff transformation unveil the phase transition and the emergence of antiferromagnetic x- and z-Néel order beyond the gapped spin liquid phase when the square toric code perturbed by isotropic and antiferromagnetic Heisenberg interaction.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

We investigate the robustness of  $Z_2$  topological order in the toric code against an isotropic antiferromagnetic Heisenberg perturbation on the square lattice with periodic boundary conditions. The toric code is a paradigmatic realization of intrinsic topological order—characterized by long-range entanglement, anyonic excitations, and topologically protected ground-state degeneracy that cannot be captured by local order parameters—and it also serves as a universal low-energy effective description of  $Z_2$  gauge phases that can emerge in correlated spin systems and engineered quantum platforms[1-3]. The isotropic antiferromagnetic Heisenberg exchange is particularly compelling because it is the most generic  $SU(2)$ -symmetric local interaction in microscopic magnets and experimental realizations: it simultaneously includes diagonal and spin-flip terms that do not commute with the toric-code stabilizers, thereby introducing genuine quantum dynamics and a direct competition between topological order and conventional Néel ordering. This makes it a stringent and physically motivated perturbation for understanding how topological signatures persist beyond the exactly solvable limit and how they ultimately break down.

To access intermediate system sizes beyond exact diagonalization, we employ neural-network quantum states based on a convolutional architecture that respects lattice symmetries[4]. We determine the ground state as a function of the Heisenberg coupling  $J$  and diagnose the breakdown of topological order using fidelity susceptibility, Wilson-loop observables, and the topological entanglement entropy extracted via the Kitaev-Preskill construction from the second Rényi entropy[5].

At small  $J$ , we observe a regime consistent with a topologically ordered phase, while increasing  $J$  leads to a clear loss of the quantized entanglement signature and the emergence of antiferromagnetic x- and z-Néel order. The ordered regime is diagnosed using quantities derived from the staggered magnetization, including Binder cumulants and an easy-plane anisotropy ratio that compares in-plane (x, z) and out-of-plane (y) fluctuations. Finite-size scaling of the transition indicators suggests a thermodynamic critical coupling  $J_c \approx 0.157 \sim 0.160$ , obtained by extrapolating the peak positions of the fidelity susceptibility as a function of system size and from the crossing of contractible Wilson-loop values for various  $L$ .

In parallel, we develop an analytic description in the topological regime using a Schrieffer-Wolff transformation[6]. The resulting effective Hamiltonian explicitly shows how virtual Heisenberg processes renormalize the star and plaquette terms and generate closed-string operators, providing controlled insight into the fate of Wilson loops and the finite-size splitting of topological sectors. Together, the numerical NQS calculations and the Schrieffer-Wolff analysis give a coherent description across regimes: NQS data identify the topological-to-Néel transition with increasing  $J$ , and the effective theory accounts for the small- $J$  behavior of energies and (dressed) topological diagnostics within the topological phase.

## References

- [1] A. Kitaev, Annals of Physics 303, 2 (2003).
- [2] A. Kitaev, Annals of Physics 321, 2 (2006).
- [3] D. S. Rokhsar, et al., Phys. Rev. Lett. 61, 2376 (1988).
- [4] K. Choo, T. Neupert, and G. Carleo, Phys. Rev. B **100**, 125124 (2019).
- [5] A. Kitaev and J. Preskill, Phys. Rev. Lett. 96, 110404 (2006).
- [6] S. Bravyi, et al., Annals of Physics 326, 2793 (2011).

# ソレー効果における分子のねじれの影響

統計物理・動力学分科 朝倉佑都

**Abstract** The Soret effect in liquid mixtures is investigated using non-equilibrium molecular dynamics simulations. By comparing molecular models with controlled dihedral potentials, we demonstrate that molecular torsional degrees of freedom significantly influence the Soret effect.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

ソレー効果とは、複数成分からなる混合系に温度勾配を与えた際、各成分が温度に対して異なる応答を示すことにより、系内に濃度勾配が形成される現象である。これまでの実験、理論、ならびにシミュレーション研究により、ソレー効果には分子の大きさ、質量、慣性モーメントといった基本的な物性や、分子間相互作用など、さまざまな要因が関与していることが示されてきた。しかし、その分子論的メカニズムについては未だ不明な点が多い。

近年、Morozov らによって提唱された理論[1][2]では、分子は温度勾配に対して親熱性 (thermophilic) あるいは疎熱性 (thermophobic) を示すとされ、成分間相互作用よりも分子固有の熱疎性 (thermophobicity) に注目が集まっている。実際、先行研究では、ダイマー間の結合の強さを変化させることで分子の柔軟性といった内部自由度を制御し、それがソレー効果に影響を与えることが報告されている[3]。

本研究では、分子内部自由度の一つである分子のねじれに着目し、そのソレー効果への影響を調べた。アルカンと、二面角ポテンシャルを操作したよりねじれやすいフレキシブルなアルカンを等量含む混合系を対象として、温度勾配を導入した非平衡分子動力学シミュレーションを行い、温度勾配下における定常状態の温度分布および濃度分布を解析した。

その結果、炭素数 5 以上のアルカンでは、フレキシブルなアルカンが通常のアルカンよりも高温側を好む、すなわち親熱性を示すことが明らかとなった。本研究は、ソレー効果における分子内部自由度の一つである分子のねじれの寄与を明らかにするとともに、複雑分子系における非平衡輸送現象の理解に新たな知見を与えるものである。

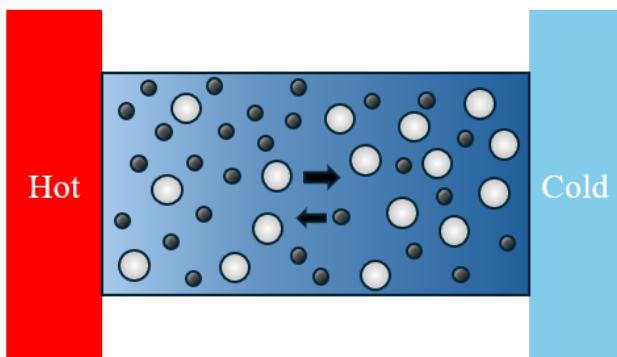


Fig. 1. Schematic illustration of the Soret effect.

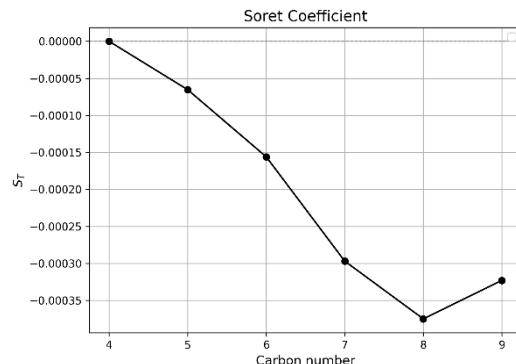


Fig.2. Carbon-number dependence of the Soret coefficient for flexible alkanes.

## References

- [1] K. I. Morozov, Phys. Rev. E 79, 031204 (2009).
- [2] S. Hartmann, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 065901 (2012).
- [3] T. Araki and N. Chikakiyo, Phys. Rev. E 103, 042611 (2021).

# 微小管集団運動の光刺激による速度方向制御

時空間秩序・生命物理研究室 大瀬良勘太

**Abstract** Directional control of microtubule swarms was demonstrated by inducing local mechanical asymmetry using photo stimulation. Microtubules modified with photo-responsive DNA exhibited rigidity increase under UV irradiation. Local stimulation to a swarm created a stiffness gradient that steered its trajectory, and the mechanism was confirmed by both simulations and experiments. © 2026 Department of Physics, Kyoto University

鳥の群れや魚群、バクテリアのコロニーに代表されるアクティブマターの集団運動[1]は、個体間の局所的な相互作用から巨視的かつ動的な秩序構造が創発する現象として広く研究されてきた。集団運動の物理法則や特性を理解するために、*in vitro* の研究において、物理障壁[2]や電場・磁場[3][4]を用いた集団運動の制御が試みられてきたが、これらは時空間全体に一様に作用するマクロな刺激であり、生物の群れに見られるような、局所的な情報の伝播による柔軟な方向転換や複雑なパターンの制御は困難であった[5]。そこで本研究では、高い時空間分解能を持つ「光」を外部刺激として採用し、集団内部に意図的な不均一性を与えることで、微小管集団の進行方向を能動的かつ局所的に制御することを目的とした。

実験系として、光応答性分子アゾベンゼンを導入したDNA (pDNA) で修飾した微小管を用い、DNA相互作用により集団を形成させた。pDNAは、紫外光照射によってアゾベンゼンがトランス体からシス体へと異性化し、その極性変化に伴い微小管の運動特性を可逆的に変化させる。単体微小管の解析では、紫外光照射下において微小管の持続長が増大し、より剛直な直進運動を示すことが明らかになった[6]。この個体の物性変化を利用し、勾配のある光刺激によって微小管の制御を試みた。微小管先端の挙動に着目した「Tip Guidance」モデル[7]に基づくシミュレーションの結果から、強度勾配のある光刺激を用いると、集団を形成した微小管では集団内部に「硬い（剛直な）」領域と「柔らかい（柔軟な）」領域の非対称性を誘起されることで、集団全体に対するトルクが生じ、集団の軌道が曲がりやすくなることが確かめられた(Fig.1)。実験においても、集団に対し一定の勾配のある紫外線を照射した場合では、集団の軌道が曲がりやすくなることが定量的に評価された(Fig.2)。これらの事実は、適切なフィードバックを与えることで集団の制御が実現される可能性を示している。本研究の成果は、集団内部の局所的なゆらぎや物性の変調こそが、非平衡系における巨視的な秩序や運動方向を制御する上で本質的な役割を果たすことを示唆しており、新たなアクティブマター制御論の構築に寄与し得るものである。

## References

- [1] Popkin G, The physics of life, *Nature*, **529**, 16-18 (2016).
- [2] Clemmens J., et al., *Langmuir*, **19**(26), 10967-10974 (2003).
- [3] Van den Heuvel, et al., *Science*, **312**(5775), 910-914 (2006).
- [4] M. Platt, et al., *Chem.Soc*, **127**. **45**, 15686-15687 (2005).
- [5] Kumar K. S., et al., *Lab on a Chip*, **16**(24), 4702-4709. (2016)
- [6] M. Akter, et al., *ACS*, **36**, 37748-37753 (2024).
- [7] T. Kim, et al., *NANOLETTERS*, **1**, 211-217(2006)

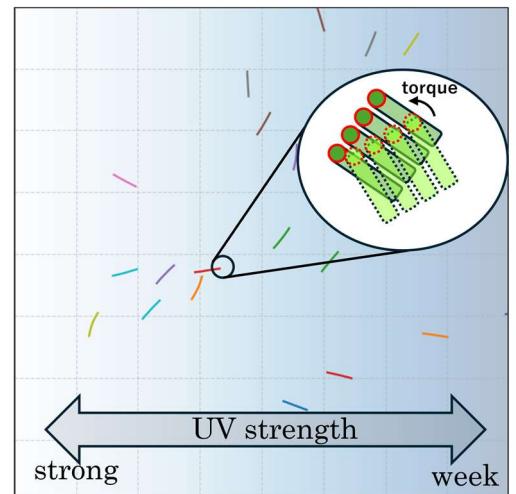


Fig.1 Simulation of microtubule swarms. The swarms frequently bended in regions with a steep gradient.

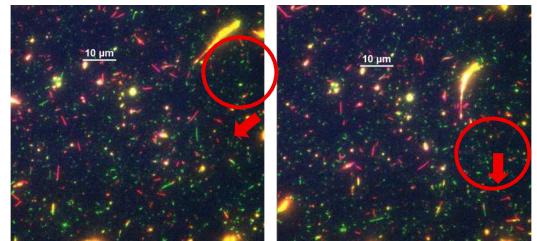


Fig.2 Snapshot of microtubules swarm experiment before (left) and during (right) exposure to UV. Green and red filaments indicate single microtubules filaments, while yellow clusters represent microtubule swarms.

# 走査トンネル分光の新規解析に基づく $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ のナノスケール不均一性と エネルギー・スケールの再評価

量子凝縮物性研究室 中里英史

**Abstract** We performed scanning tunneling spectroscopy on  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  and analyzed spectra using normalized differential conductance. Despite strong nanoscale gap inhomogeneity, we identify a spatially uniform energy scale that varies with doping and corresponds to previously reported spectral kinks, which suggests a distinct global electronic energy scale.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

銅酸化物高温超伝導体は、ドープ量に応じて多様な電子状態を示す強相関電子系であり、その電子状態の統合的な理解は依然として重要な課題である[1]。これまで多様な実験手法が用いられてきたが、その中でも、走査トンネル顕微鏡法/分光法(STM/STS)は、局所電子状態を直接観測できる有力な手法である。STM/STS 測定によって観測される銅酸化物高温超伝導体の電子状態の顕著な特徴の一つは、ナノメートルスケールで空間的に強く不均一である点である。例えば、エネルギー・ギャップの大きさは、数ナノメートル程度の長さスケールで変動し、大きな領域と小さな領域では2倍以上の差が生じる[2, 3]。このような空間的不均一性は、数十 meV 以上の高エネルギーで特に顕著であり、低エネルギーに現れる比較的空間的に均一な特徴を覆い隠してしまうことがある。

この問題への有力な対処法の一つが、不均一性の影響を低減するためのスペクトルの規格化である。実際、不均一なスペクトルに埋もれたボゴリフボフ準粒子干渉の観測に成功した例により、規格化の有効性が示されている[3]。ただし、この際に用いられた規格化手法は、フェルミエネルギーの上下でスペクトルの比を取ることであったため、適用可能な現象が限られる欠点を有していた。

本研究では、銅酸化物高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  に対して STM/STS 測定を行い、得られた微分コンダクタンス( $dI/dV$ )スペクトルに対して、規格化微分コンダクタンス( $dI/dV)/(I/V$ )を用いた解析を行った。この規格化手法は、フェルミエネルギーの上下を区別しない特徴を持つ。解析の結果、従来から知られているナノメートルスケールのギャップ不均一性に対応するピークに加えて、空間的にほぼ一様なエネルギーをもつ別のピークが存在することを見出した。さらに、この空間的に均一なピークのエネルギーは、ドープ量に依存して変化することも明らかになった。

新たに見つかったこのピークは、従来の微分コンダクタンスには、ギャップ内のスペクトルの折れ曲がりとして知られている特徴に対応する[3, 5]。同様な折れ曲がりは、他の高温超伝導体においても観測されている[4]。本研究で抽出されたエネルギー・スケールは、物質や局所的不均一性に依らず現れる共通の特徴であり、キャリアドープに伴う電子状態の発達過程に関連した新たなエネルギー基準である可能性を示唆している。

## References

- [1] B. Keimer *et al.*, *Nature* **518**, 179-186 (2015).
- [2] S. H. Pan *et al.*, *Nature* **413**, 282 (2001).
- [3] J. W. Alldredge *et al.*, *Nat. Phys.* **4**, 319-326 (2008).
- [4] T. Hanaguri *et al.*, *Nat. Phys.* **3**, 865 (2007).
- [5] C. Howald *et al.*, *Phys. Rev. B* **64**, 100504 (2001).

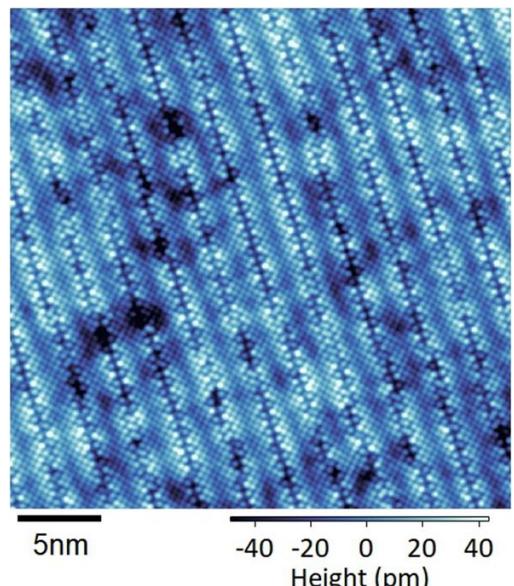


Fig. 1. A topographic image of the BiO surface.

# 超純良単結晶を用いた スピニ三重項超伝導体 $\text{UTe}_2$ の走査トンネル分光

量子凝縮物性研究室 中西宏介

**Abstract** We performed scanning tunneling spectroscopy on ultra-clean  $\text{UTe}_2$  single crystals, a strong candidate for a spin-triplet topological superconductor, to probe their surface electronic states. Measurements under magnetic fields show that the surface charge density wave is likely unrelated to superconductivity, in contrast to previous studies.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

超伝導は、2個の電子がクーパー対を組み、巨視的にコヒーレント状態となることで発現する量子現象である。クーパー対の全スピンが  $S = 1$  となるスピニ三重項超伝導体は、その内部自由度に由来する多彩な超伝導状態の実現可能性や、トポロジカル超伝導の実現による量子計算への応用といった観点から、近年注目を集めている。本研究の対象物質である  $\text{UTe}_2$  はスピニ三重項超伝導体の有力候補であるとされており[1]、トポロジカル超伝導の実現が期待されている。表面敏感なプローブである走査型トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscopy : STM)は、マヨラナゼロモードなどのトポロジカル超伝導体特有の表面状態を探るうえで強力な手法である。

2018年の超伝導発見[2]以降、STMを用いた  $\text{UTe}_2$  の表面電子状態の測定が盛んに行われてきた。複数の研究グループにより電荷密度波(Charge Density Wave : CDW)の観測が報告されており、その超伝導との関連が議論されている。超伝導状態において磁場を印加すると、超伝導上部臨界磁場  $H_{\text{c}2}$  付近(約 10 T)で CDW が消失したことから、CDW が超伝導と強く関連しているという主張が存在する[3]。これに対し、超伝導転移温度  $T_{\text{c}}$  以上で同様の磁場下測定を行った場合、CDW は  $H_{\text{c}2}$  付近で弱まるものの消失しないことから、CDW と超伝導は直接的に関連しないことを示唆する報告も存在する[4]。このように、両者の関係については見解が分かれている。ただしこれらの先行研究は、2018年の超伝導発見当初の製法で作られた  $T_{\text{c}} = 1.6$  K を示す初期試料を用いたものであった。その後 2022 年には製法の進展により、 $T_{\text{c}} = 2.1$  K を示す超純良試料が実現され[5]、初期試料で指摘されていたウラン欠損に起因する純良度の低さや試料内不均一性[6]が改善された。また各種測定において初期試料と異なる結果も報告されており、超純良試料を用いた研究によって  $\text{UTe}_2$  の本質的な物性が明らかにされることが期待されている。

本研究では  $\text{UTe}_2$  の表面電子状態を探ることを目的として、超純良単結晶を用いた STM 測定を行った。初期試料の結果[7]と比較して試料表面の欠陥密度が約 1 桁小さいことから、試料の高い純良度を確認した。また初期試料の約 3 倍に相当する  $H_{\text{c}2} \sim 30$  T を示す超純良試料を用い、11 T 磁場下での測定を行った。前段落で述べた先行研究の議論に基づくと、CDW と  $H_{\text{c}2}$  がスケーリングする場合には 11 T において CDW は抑制されず、スケーリングしない場合には CDW は抑制されると予想される。11 T における測定の結果、CDW ピーク強度の抑制が観測され、初期試料で指摘されていた CDW と超伝導との関係が弱いことが示唆された。以上より、STM で観測されている CDW は超伝導とは直接的に関係せず、何らかの磁気秩序と結合している可能性が高いことが明らかになった。

## References

- [1] D. Aoki *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **34**, 243002 (2022).
- [2] S. Ran *et al.*, Science **365**, 684 (2019).
- [3] A. Aishwarya *et al.*, Nature **618**, 928-933 (2023).
- [4] A. LaFleur *et al.*, Nat. Comm. **15**, 4456 (2024).
- [5] H. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Materials. **6**, 073401 (2022).
- [6] D. Aoki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 083704 (2022).
- [7] Q. Gu *et al.*, Science **388**, 6750 (2025).

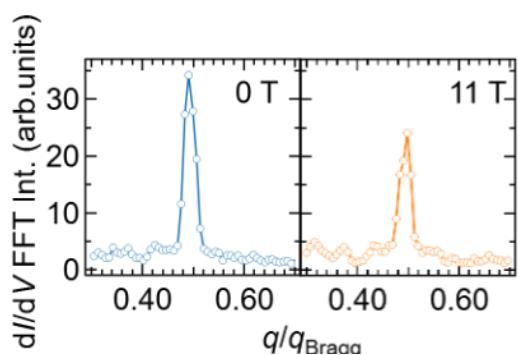


Fig 1. CDW intensity suppressed by the magnetic field 11 T.

# アゾ混合リオトロピック液晶のミセル変形ダイナミクス

ソフトマター物理学研究室 成相 和希

**Abstract** We studied lyotropic liquid crystals mixture containing azo compounds. In this system, excitation light irradiation drives a micelles shape change from rod-like to spherical, inducing N-I transition. We quantitatively investigated this transformation using time-resolved DLS. We successfully elucidated the phase transition using a novel isothermal and instantaneous light-induced quenching method.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

【序】アニオン性界面活性剤である SDS(Sodium Dodecyl Sulfate)とカチオン性界面活性剤である DTAB(Dodecyltrimethylammonium Bromide)の混合水溶液は、低濃度でもリオトロピックネマチック(LLCN)相が発現することが知られている[1]。この系は等方相-ネマチック相の相転移が温度によって起こり、ミセルの形状変化を伴う2次転移となっている。この系にtrans-cis異性化するアゾ化合物を添加することで、励起光強度を新たな状態変数として系の平衡状態を制御することができる[2]。本研究ではアゾ化合物と SDS/DTAB 水溶液の混合系の等方相温度域において、光照射による等温的クエンチに伴うミセル変形のダイナミクスを研究することを目的とした。

【試料・実験】界面活性剤(SDS+DTAB)の質量濃度  $\phi$  と SDS/DTAB のモル比  $\alpha$  の異なる試料を調製し、アゾ化合物として Sunset Yellow を添加した。それぞれの試料における等方相温度域で、励起光と同じ強度で照射し、時分割動的光散乱法(DLS)にて測定を行った。DLS によってミセルのブラウン運動の緩和時間を測定し、ミセルの流体力学半径を求めることができる。励起光照射によるミセルの流体力学半径の経時変化を追跡することで、励起光照射後のミセルの形状変化を考察した。

【結果・考察】Fig. 1 はブラウン運動の緩和時間の温度依存性と励起光照射後の緩和時間の経時変化である。励起光の照射により、温度上昇と同様の緩和時間の減少が確認された。緩和時間から流体力学半径を見積ると、棒ミセルの長さが短くなっていることがわかった。さらに、流体力学半径が変化する応答時間の  $\phi$ 、 $\alpha$  依存性を調べた。Fig. 2 は応答時間の  $\alpha$  依存性を示している。ここで  $\alpha$  が小さくなるにつれて応答時間が長くなっていることが明らかになった。 $\alpha$  はミセル表面の電荷の偏りを意味しているため、ミセル表面の電荷密度が、状態変数のジャンプに対するミセルの形状変化の速さに大きな影響を与えていると考えられる。つまり、本研究から、等温的かつ瞬間的な光励起クエンチが可能となり、ミセル形状変化や等方-ネマチック相転移のダイナミクスを実験的に直接検証できる可能性が示された。

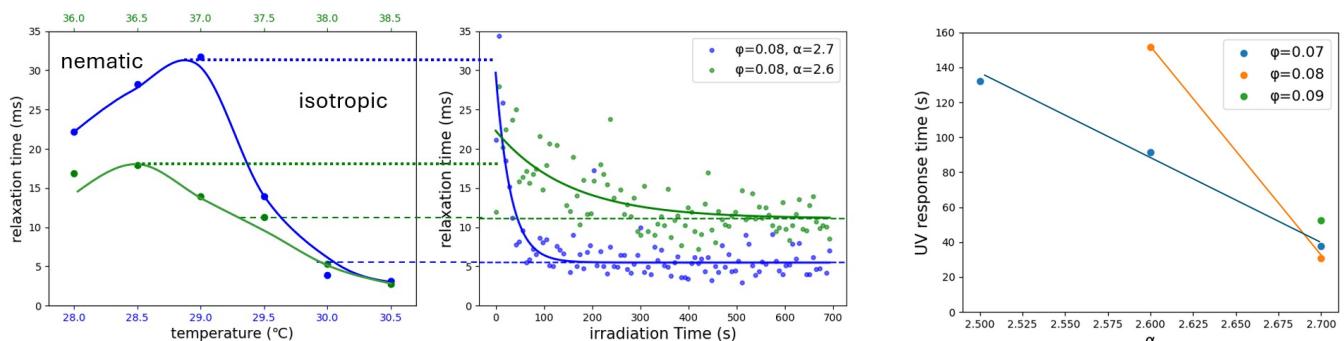


Fig.1. Temperature dependence of relaxation time (left) and change during UV irradiation (right). The dotted line indicates the relaxation time before starting UV irradiation. The relaxation time is decreasing due to temperature rise and UV irradiation.  
(●:  $\phi=0.08$ ,  $\alpha=2.7$  / ●:  $\phi=0.08$ ,  $\alpha=2.6$ )

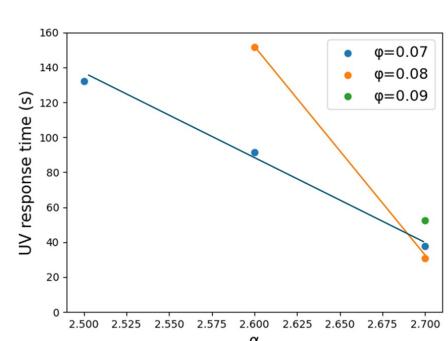


Fig.2.  $\alpha$  dependence of UV response time. The lines are guides to the eye.

## References

- [1]山本潤 他, 2014 年日本液晶学会討論会講演予稿集, 2014  
[2]徳宿光子, 2020

# 非従来型超伝導体における 電流誘起スピン・スピン流の理論研究

凝縮系理論研究室 原慧人

**Abstract** We analyzed supercurrent-induced spin responses in noncentrosymmetric superconductors. We showed that parity mixing of superconducting order parameters enables current-induced spin polarization and spin currents even in the absence of spin-orbit coupling. Furthermore, we demonstrated the existence of a previously overlooked phenomenon, namely supercurrent-driven spin polarization of Cooper pairs.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

対称性が破れた物質では、性質の異なる自由度が結合することで、従来の物質では実現し得ない新奇な物理現象が発現する。その中でも、空間反転対称性が破れた超伝導体では、散逸を伴わない超伝導電流が磁場や電子スピンと結合することで、通常の金属における電流駆動応答と比較して高効率な応答が生じる。その典型例の一つが、超伝導電流がスピン偏極を誘起する現象、すなわち超伝導スピン Edelstein 効果[1]である。このエネルギー損失のないスピン生成機構は、超伝導スピントロニクスの実現に向けた基盤の一つとして大きな注目を集めてきた。さらに、超伝導スピン Edelstein 効果は、非相反応応答[2]や自然光学活性[3]、有限重心運動量の Cooper 対[4]など、空間反転対称性が破れた超伝導体に特有の諸現象と密接に関係しており、この系の多彩な物理を横断的に理解する上で重要な役割を担っている。

顕著な電流誘起スピン応答の実現にはスピン軌道相互作用が強い重金属元素が必要であるという考えが従来のスピントロニクスにおける通説である。しかし近年、強いスピン軌道相互作用を持たない物質においても巨大なスピン偏極が生じ得ることが明らかになりつつある。その代表例は、空間反転対称性と鏡映対称性をともに欠くキラル物質を電子が通過する際にスピンが偏極する現象である。このようにキラリティと電子スピンが関連する現象は総じてキラリティ誘起スピン選択性 (Chirality-Induced Spin Selectivity, CISS) と呼ばれる。CISS 効果の微視的な起源は理論的に明らかにされていないものの、実験的には多くの物質において様々な CISS 効果が観測されている。その中でも、スピン軌道相互作用が微小な有機超伝導体において顕著な CISS 効果が観測されている事実[5]は、空間反転対称性が破れた超伝導体において、「スピン軌道相互作用」やそれに由来する「Cooper 対の重心運動量と磁場の結合」に基づく従来の枠組みとは本質的に異なる電流誘起スピン応答の起源が存在する可能性を示唆している。

そこで本研究では、空間反転対称性が破れた超伝導体における電流誘起スピン応答の非従来的な起源を理論的に探索した。具体的には、従来の理論ではスピン一重項状態が想定されていたのに対して、空間反転対称性が破れた超伝導体で一般的に生じるスピン一重項とスピン三重項の混成を伴う超伝導状態へと枠組みを拡張し、超伝導電流が誘起するスピンおよび非線形スピン流[6]を摂動論により解析した。その結果、スピン軌道相互作用の有無によらず、「パリティが異なる超伝導秩序変数の混成」によって、超伝導電流がスピン偏極と非線形スピン流を誘起することを示した。さらに、パリティ混成に起因するスピン応答は、スピン軌道相互作用に起因するスピン応答とは定性的に異なる温度依存性を示すことを明らかにした。加えて、従来の理論では見逃されていた、電流により Cooper 対自体が偏極する現象が存在することを示し、その起源が「Cooper 対の重心運動量とスピンの結合」であることを解明した。

本研究は、超伝導秩序変数の内部自由度が、対称性が破れた物質における交差応答を支配し得ることを示すものであり、対称性が破れた超伝導体における輸送・応答に関する学理の発展に寄与する。さらに、超伝導電流を通じて Cooper 対のスピン自由度を能動的に操作できるという知見は、超伝導スピントロニクスに加え、超伝導電流による秩序相制御を志向する超伝導エレクトロニクスの進展にも資する。

## References

- [1] V M. Edelstein, Phys. Rev. Lett. **75**, 2004 (1995). [2] Y. Tokura and N. Nagaosa, Nat. Commun. **9**, 3740 (2018).
- [3] K. Shinada *et al.*, Phys. Rev. B **108**, 165119 (2023). [4] M. Smidman *et al.*, Rep. Prog. Phys. **80**, 036501 (2017).
- [5] R. Nakajima *et al.*, Nature **613**, 479–484 (2023). [6] K. Hara and Y. Yanase, Commun. Phys. **8**, 389 (2025).

# ツリウム原子のレーザー冷却

量子光学研究室 東 宏一郎

**Abstract:** To meet the growing demand for neutral atom quantum technologies, I focused on thulium atoms, which are insensitive to the electric field due to the closed outer-shell electrons. This characteristic is advantageous for integrating photonic technologies with atoms. In this study, I successfully laser-cooled thulium atoms.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

近年、光格子時計[1]が商用化し、量子コンピュータ[2]開発の国内ベンチャーが相次いで立ち上がるなど、冷却中性原子を用いた量子技術が脚光をあび、その需要は多種多様に拡大している。このような量子技術は、主にアルカリ原子・アルカリ土類原子を用いて開拓されてきた。私は、拡大する量子への需要に対して対応するためには、光集積回路技術などのフォトニクス技術[3]をより積極的に取り入れることが必要不可欠であると考えた。しかし、導波路やファイバなど、光の制御装置の近傍に原子を近づけると、原子は表面相互作用により、コヒーレンスを失ってしまう[4]。

そこで、私は表面相互作用に極めて鈍感なツリウム原子[5]に着目した。図1にツリウム原子の電子配置を示す。ツリウム原子は5s5p6s軌道が閉殻であり、4f軌道に1つの欠陥（正孔）がある。この欠陥がツリウム原子のエネルギー準位を決定する。ここで、閉殻となっている外殻が外部電場を遮蔽するため、4f軌道の正孔は電場を感じない。すなわち、ツリウム原子は導波路からの表面相互作用に極めて鈍感な原子だと考えられる。

本研究では、ツリウム原子の冷却装置を一から開発し、日本では初となるツリウム原子のレーザー冷却に成功した。すなわち、1000Kという高温に原子固体を加熱するオーブンや、高速の原子を冷却捕獲可能な温度まで減速させるゼーマン減速器、冷却捕獲のためのコイルなどを開発した。日本では初めての試みであったため、オーブンによるアウトガスへの対処や、60cmものゼーマン減速コイルなど、多くの困難や試行錯誤があったが、最終的に無事に真空槽とコイルを開発することができた。

この装置と、別途開発したツリウム原子の冷却遷移である $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}(F=4) \rightarrow 4f^{12}(\ ^3H_5)5d_{3/2}6s^2(J=9/2, F=5)$ と共に410.7nmのレーザーを用いて、私は日本で初、世界で4例目となるツリウム原子のレーザー冷却に成功した（図2）。発表では開発した装置の詳細を含めて述べる。

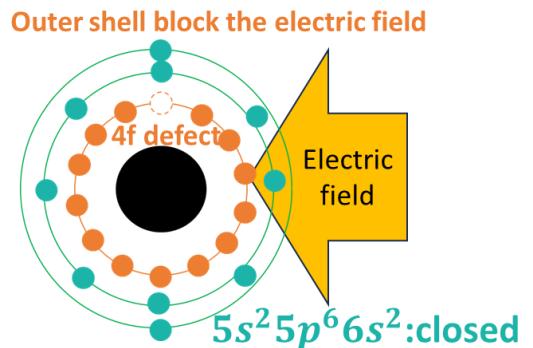


Fig. 1. Electronic configuration of thulium atoms

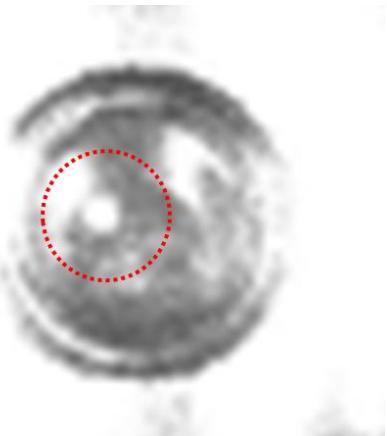


Fig. 2. Laser cooled thulium atoms

## References

- [1] M. Takamoto *et al.*, Nature **435**, 321 (2005).
- [2] Y. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. X. **14**, (2024).
- [3] S. Kato and T. Aoki, Phys. Rev. Lett. **115**, 093603 (2015).
- [4] G. Kestler *et al.*, PRX quantum **4**, 040308 (2023).
- [5] A. Golovizin *et al.*, Nat. Commun. **10**, 1724 (2019).

# 生物対流現象における下降流揺らぎの機構解明と 境界設計による対流パターン安定化

時空間秩序・生命物理研究室 松井健安

**Abstract** Bioconvection is a complex collective motion whose nonequilibrium dynamics remain poorly understood. We focused on the translational motion of downward plumes and examined the convective response in systems with controlled boundaries. Our results show that an imbalance in the cellular flux around the downward plume would be the primary factor. © 2026 Department of Physics, Kyoto University

20世紀初期より非平衡系の時間発展や構造形成が長らく研究されてきた。近年では、自己駆動能をもつ粒子の集団運動を扱うアクティブマター研究が発展し、生物集団や人工粒子が示す非平衡構造形成の研究が盛んに行われるようになった。のような背景を踏まえ、本研究では特に、微生物集団が自らの遊泳運動によって周囲の流体を巻き込み、大規模な構造を形成する生物対流[1]に注目した (Fig. 1)。これまでの生物対流に関する研究では、線形安定性解析により対流構造の特徴波長や不安定化条件が理論的に整理され、実験結果との比較が行われてきた [2]。さらに近年では連続体モデルに基づく数値シミュレーションによって、対流セルやプルーム構造の形成過程が再現されている [3]。しかし、既存研究の多くは、対流構造が形成される初期過程の不安定化やロール対流の空間周波数など定常的側面の再現に主眼が置かれており、非平衡ダイナミクス、すなわち時間発展や安定性など実験で得られる多様な結果については、理論やシミュレーションで十分に説明できているとは言えない。例えば、対流の構成要素である下降流の生成・消滅や移動、下降流同士の合体などの実験報告はあるが [2, 4]、メカニズムを議論する実験的研究や理論的枠組みに決定的と言えるものは無い。

これを踏まえ、本研究では観察容器の境界形状を系統的に変化させた際の、対流構造やダイナミクスの変化を測定することを着想した。実験ではテトラヒメナ (*Tetrahymena pyriformis*) という遊泳微生物の高濃度懸濁液を、対流現象に対して擬二次元とみなせる Hele-Shaw 型容器に入れて、対流構造を側面から観察した。容器底面には柱状の凸構造を導入し、その位置・数・サイズを系統的に制御しつつ、対流構造や下降流位置の変化や応答を測定した。

その結果、下降流が容器底面の柱構造上に定在する状態が得られることを発見した (Fig. 2)。本研究ではこの現象を下降流の“ピン留め”と呼び、その並進位置の安定性とゆらぎを計測した。底面が平坦な場合、下降流は短周期の左右の揺らぎ運動 (数ミリ程度の振幅) を伴いながら、長周期 (数分～数十分) では数センチのオーダーでドリフトするが、ピン留めされた下降流はその間も柱上領域にとどまり、その変位量も柱幅程度 ( $\sim 1\text{mm}$ ) の範囲を示した。更に、拡大像による細胞の出入りフラックスの定量解析を行った結果、下降流の運動が周辺における細胞流入出の非対称性と高い相関がある事が示された。更に、ピン留めなどの挙動の再現に必要な物理的要素を、シミュレーションと比較しつつ探索することで、生物対流モデルの拡張と妥当性の検証を行った。

## References

- [1] M. A. Bees, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **52**, 449–476 (2020).
- [2] M. Levandowsky, B. S. White, F. L. Schuster, *J. Protozool.* **22**, 502–508 (1975).
- [3] M. A. Bees, N. A. Hill, *Phys. Fluids* **11**, 259–271 (1999).
- [4] H. Wager, *Philos. Trans. R. Soc. B* **201**, 333–390 (1911).

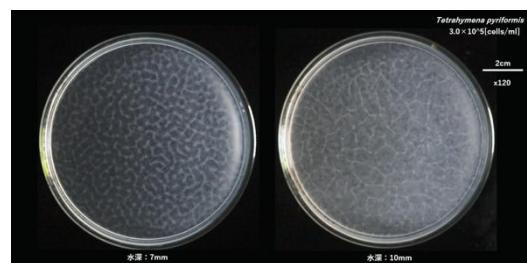


Fig. 1. Bioconvection induced by *T. pyriformis*.

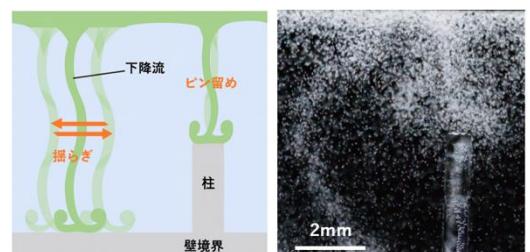


Fig. 2. “Pinning” phenomenon. The downward plume is pinned to the pillar in the biological convection of *T. pyriformis* within the Hele-Shaw cell.

# 量子計算古典通信モデルにおける コインフリッピングと一方向性パズルの関係について

物性基礎論：量子情報研究室 水原朔

**Abstract** We prove that the existence of a Quantum Computation with Classical Communication (QCCC) coin flipping protocol secure against a bias of  $(\sqrt{2} - 1)/2$  implies the existence of one-way puzzles. This extends the classical result of Haitner and Omri (2011) to the QCCC model by employing the random continuation attack.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

離れた場所にいる互いに信用していない二者が、通信路を通じて公平な乱数生成を行う「コインフリッピング (Coin Flipping)」は、1981年にBlum[1]によって発案された暗号理論における問題である。古典暗号において、安全なコインフリッピングプロトコルの存在は一方向性関数 (One-Way Function, OWF) の存在と等価であることが知られている[2]。古典暗号において OWF は最も基礎的な計算量的仮定であると考えられている一方で、量子暗号においては OWF が存在しない世界であっても安全な暗号プリミティブが存在する可能性が示唆されている。本研究は、量子計算は可能であるが通信内容は古典ビットに限る QCCC (Quantum Computation with Classical Communication) モデルにおけるコインフリッピングと計算量的仮定との関係を解析することを目的とする。

本研究の主結果として、バイアスが  $(\sqrt{2} - 1)/2 - o(1)$  以下である安全な QCCC コインフリッピングプロトコルが存在するならば、一方向性パズル (One-Way Puzzle) が存在することを証明した。これは、Haitner と Omri による古典暗号における結果[3]を QCCC モデルへと拡張したものである。

## References

- [1] Manuel Blum. Coin flipping by telephone. In Allen Gersho, editor, *Advances in Cryptology: A Report on CRYPTO 81*, CRYPTO 81, IEEE Workshop on Communications Security, Santa Barbara, California, USA, August 24-26, 1981, pages 11–15. U. C. Santa Barbara, Dept. of Elec. And Computer Eng., ECE Report No 82-04, 1981.
- [2] Iftach Haitner and Eran Omri. Coin flipping with constant bias implies one-way functions. In Rafail Ostrovsky, editor, *IEEE 52nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science, FOCS 2011*, Palm Springs, CA, USA, October 22-25, 2011, pages 110–119. IEEE Computer Society, 2011.
- [3] Itay Berman, Iftach Haitner, and Aris Tentes. Coin flipping of any constant bias implies one-way functions. In David B. Shmoys, editor, *Symposium on Theory of Computing, STOC 2014*, New York, NY, USA, May 31 - June 03, 2014, pages 398–407. ACM, 2014.

# 磁性メタマテリアルにおける光駆動スピン流 に関する研究

光駆動固体物性研究室 渡邊優一

**Abstract** THz emission measurements on patterned Co/Pt magnetic metamaterials directly revealed coherent ultrafast charge and spin currents driven by femtosecond pulses. Their polarization-angle dependence qualitatively agrees with a magneto-photogalvanic effect model incorporating near-field linear and induced circular components, indicating this effect governs current/spin-current generation and guides polarization control.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

光を用いたスピン流生成は、高速性に加え空間的に局所な制御が可能である点から、スピントロニクス技術において重要な役割を担うと期待されている。このため、光の偏光自由度を用いてスピン流の向きやスピン偏極の制御は、プラズモニックスピンポンピング[1]、トポロジカル絶縁体[2]、トポロジカル絶縁体メタマテリアル[3]、ファンデルワールス界面での円偏光ガルバノ効果[4]など多様な系で精力的に研究されている。本研究では、構造に起因する空間反転対称性の破れと、磁化に起因する時間反転対称性の破れが同時にある磁性メタマテリアルに着目し[5]、光照射で誘起されるコヒーレントな電流およびスピン流の生成機構を明らかにすることを目的として、テラヘルツ(THz)放射の時間領域測定を行った。光パルスで駆動される超高速電流・スピン流はマクスウェル方程式に従い、THz電磁波として放射されるため、放射波形を時間領域で測定することで、ピコ秒スケールのコヒーレント応答を非接触で観測できる。従来の電極読み出しで混在し得る熱起源の遅いスピンラチエット効果やスピンゼーベック効果などの非コヒーレント過程を抑え[6]、光照射直後の電流生成の素過程を調べることが可能である。

試料は、面直磁化を示すCo/Pt多層膜に「くの字」形状のパターン加工を施した磁性メタマテリアルを用い、中心波長800 nmのパルス光により励起した。偏光方向と構造の鏡映軸との相対角度を変化させながらTHz波形を観測した結果、THz放射強度が偏光角に依存して変化し、さらに磁化反転により波形の符号が反転することがわかった。これらは、構造的非対称性(反転対称性の破れ)と磁化の双方に由来する光駆動の電流・スピン流が生成していることを示している。磁性メタマテリアルが作り出す近接場が、エッジ近傍の反転対称性の破れた電子系に与える局所電場を調べるため、時間領域差分法(FDTD)による電磁場シミュレーションを行った。入射光が直線偏光であっても、構造近傍の局所電場には有効な円偏光成分が誘起されることを見いだした。FDTDで得た近接場(直線・円偏光成分)を考慮し、エッジ近傍における電子の光ガルバノ、磁気光ガルバノ効果のモデル計算を行い、光電流および光スピン流の偏光角依存性を評価した。その結果、実験で観測された偏光角依存性と定性的に一致することがわかった。これらの結果は、時間反転対称性の破れに加え、構造エッジ付近の界面によって空間反転対称性も破れた電子系に対し、近接場中の直線偏光成分と円偏光成分が磁気光ガルバノ効果を引き起こし、磁性メタマテリアルにおける光スピン流生成を支配していることを示している。

## References

- [1] J. W. McIver *et al.*, Nat. Nanotech. **7**, 96 (2012).
- [2] K. Uchida *et al.*, Nat. Commun. **6**, 5910 (2015).
- [3] X. Sun *et al.*, Science Advances **7**, eabe5748 (2021).
- [4] S. Duan *et al.*, Nat. Nanotech. **18**, 867 (2023).
- [5] M. Matsubara *et al.*, Nat. Commun. **13**, 6708 (2022).
- [6] M. Hild *et al.*, Physical Review B **107**, 155419 (2023).