

令和5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

2024年1月29日(月)、1月30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）

2024年1月29日（月）9：00～17：50

目次

1. 相互作用にランダム性を有する液晶相転移の解析
天野 玲（9：00）・・・ 1
2. Td-WTe₂の光誘起構造相転移における赤外線形・非線形光学応答
繁岡 優（9：20）・・・ 2
3. 強相関電子系における非線形エーデルシュタイン効果
大池 潤（9：40）・・・ 3
4. 金属錯体 DNA の特異性を研究する分子動力学シミュレーション
岡本 光（10：00）・・・ 4
5. 物質のトポロジカル相における対称性と双対性
安藤 貴政（10：20）・・・ 5

10：40～10：50 休憩

6. 非エルミート表皮効果の局在特性の解明
下村 顕士（10：50）・・・ 6
7. 混合次元周期アンダーソン模型における UTe₂の磁性と超伝導
白野 龍二（11：10）・・・ 7
8. 表面微細金属構造によるテスラ級ピコ秒パルス磁場の発生と
スピンドYNAMIKSの研究
丸山 慶（11：30）・・・ 8
9. Interacting Kitaev Chain with $\mathcal{N} = 1$ Supersymmetry
三浦 憂（11：50）・・・ 9
10. 計算機解析と量子ビーム散乱によるタンパク質の溶液構造ダイナミクス研究
會澤 直樹（12：10）・・・ 10

12：30～13：30 昼休み

11. 化学気相成長ダイヤモンドにおける励起子再結合過程の評価
戸塚 大貴（13：30）・・・ 11

- 1 2. 冷却原子を用いたゲインエンジニアリング：
ダーク状態およびトポロジカルエッジ状態の原子波レーザーの観測
津野 琢士 (13:50)・・・12
- 1 3. Fiber Bragg grating を用いたひずみ測定による新奇交差相関応答の観測
富川 幹也 (14:10)・・・13
- 1 4. 光格子中量子磁性観測に向けた
量子気体顕微鏡の安定性改善と新イメージング法の提案
磯貝 賢伸 (14:30)・・・14

14:50～15:00 休憩

- 1 5. 一般のノイズに対する量子情報復元手法の明示的構成
Constructing succinct decoders for an arbitrary noisy channel
内海 武尊 (15:00)・・・15
- 1 6. 異方的三角格子反強磁性 $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ における
熱伝導率測定による1次元スピノン励起の観測
大塚 健一 (15:20)・・・16
- 1 7. Kitaev 量子スピン液体候補 $\alpha\text{-RuCl}_3$ 単層膜における
特異な状態密度振動の原子分解能解像
大間知秀祐 (15:40)・・・17
- 1 8. 一粒子トラッキングによるせん断速度測定法の開発
尾形正太郎 (16:00)・・・18

16:20～16:30 休憩

- 1 9. アガロース高分子ネットワークとコロイド粒子の動的結合
小野 基紀 (16:30)・・・19
- 2 0. UV レーザー干渉縞による分子マニピュレーション
谷 知晃 (16:50)・・・20
- 2 1. 液晶エマルションの磁気誘起複屈折
松村 大毅 (17:10)・・・21
- 2 2. 確率的秩序変数ダイナミクスにおけるエントロピー力の紫外発散
角 祐太郎 (17:30)・・・22

2024年1月30日 (火) 9:00～15:10

- 2 3. 超純良 UTe_2 単結晶におけるスピン三重項超伝導状態のギャップ構造
神村 真志 (9:00)・・・23
- 2 4. 近藤超格子における非相反輸送測定によるヘリカル超伝導相の観測
小菅 優輝 (9:20)・・・24

25. 擬似ランダム量子状態に基づく量子暗号の安全性	白川 雄貴 (9 : 40) 25
26. カゴメ格子反強磁性体 $YCu_3(OH)_{6.5}Br_{2.5}$ における磁化プラトー	立石将太郎 (10 : 00) 16
27. 時空間分解発光分光による混晶ハライドペロブスカイトの光誘起相分離の研究	大穀 裕介 (10 : 20) 27

10 : 40 ~ 10 : 50 休憩

28. 非線形量子干渉計を用いた広帯域もつれ光子対の研究	廣田 晴哉 (10 : 50) 28
29. 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における発振双安定性	小埜 朋樹 (11 : 10) 29
30. 二層系における内因的超伝導ダイオード効果	中村 恭平 (11 : 30) 30
31. Non-Equilibrium Spatiotemporal Dynamics of Human Colorectal Cancer Organoids	永井 翔吾 (11 : 50) 31
32. 開放量子系におけるトポロジカル相の理論的研究	濱中 秀有 (12 : 10) 32

12 : 30 ~ 13 : 30 昼休み

33. 制限空間内の超流動 ^3He texture	原 奈槻 (13 : 30) 33
34. 超流動 $^3\text{He-A}$ 中におけるドメインウォール構造とスピンスーパー流の効果	日野 祐哉 (13 : 50) 34
35. 純良単結晶 UTe_2 の核磁気共鳴測定による超伝導状態の研究	松村 拓輝 (14 : 10) 35
36. 確率的化学反応系の Hopf 分岐点近傍における情報の流れの解析	松本 健心 (14 : 30) 36
37. エアロジェル中の超流動 ^3He における渦糸格子	涌井 真哉 (14 : 50) 37

相互作用にランダム性を有する液晶相転移の解析

統計物理・動力学研究室 天野玲

Abstract We examined the effect of random bonds on the isotropic-nematic transition using the Lebwohl-Lasher model. In the absence of randomness, the Lebwohl-Lasher model displays a weak first-order transition. Our simulations revealed that the discontinuity associated with the first-order transition disappears when the degree of randomness exceeds a certain threshold.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

3次元の液晶系は通常一次のネマティック-等方相転移 (N-I 相転移) をみせるが, 山本ら[1]および伊田ら[2]は棒状ミセルを形成する SDS/DTAB 混合水溶液が温度依存的な N-I 相転移を起こし, さらに SDS/DTAB 混合比に応じてミセルのアスペクト比が変わることおよび一次転移がみられなくなることを実験的に見出した. これについて棒状ミセルの長さのばらつきによるミセル間相互作用のランダム性が系のふるまいに影響を及ぼした可能性が考えられる. 我々はこれを確かめるため相互作用にランダム性を導入した液晶系の数値解析を行い N-I 相転移の挙動を調べた. 我々の採用したモデルは, 一次 N-I 相転移を理論的に導くとされる 3次元 Lebwohl-Lasher 模型 (LL 模型) [2]を土台に, 相互作用項にランダム性を導入し, さらに2次式を p 次式に拡張した以下のハミルトニアンを持つ模型である.

$$H = -a \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} |\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j|^p + b \begin{pmatrix} p: \text{even} \\ a, b: \text{const.} \end{pmatrix},$$
$$J_{ij} := J_i \times J_j, \quad P(J_i) \propto \exp\left(-\frac{(J_i - J_0)^2}{2J^2}\right).$$

ここで \mathbf{s}_i はサイト i における分子の向きを表し, 総和は立方格子の隣接サイトの組 $\langle i, j \rangle$ を走るものとする. これは相互作用の係数 $J_{ij} = J_i \times J_j$ が確率変数となっているためランダムボンド模型に類する. 以下 $V[J_{ij}] =: J^2$ により確率変数 J_{ij} の従う確率分布の分散を表す. $p = 2, 6, 8, 10$ では分散 $J^2 = 0$ (ランダム性なし) でみられた一次相転移の特徴が J^2 が大きくなるとみられなくなっていく. 具体的には $J^2 = 0$ でみられた秩序変数 λ の急減衰や比熱 c のピークは J^2 が大きくなるとみられなくなり (Fig. 1. (i)(ii)), $J^2 = 0$ で自由エネルギー F に極小値を与えていたエネルギー E_1, E_2 の差 ΔE は J^2 の増大に伴って減少しやがて 0 となった (Fig. 1. (iii)). すなわち相互作用にある大きさ以上のランダム性が入ると液晶系は一次転移を示さなくなることが示された.

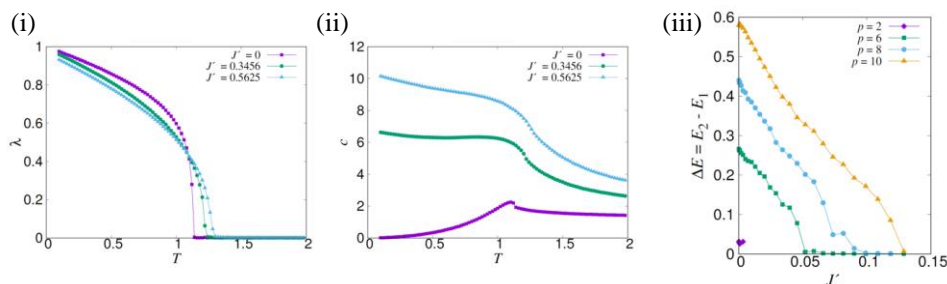


Fig. 1. (i)(ii) Temperature dependence of the order parameter λ and specific heat c for each variances J^2 in $p = 2$ case. (iii) Dependence of the differences between two energies E_1 and E_2 giving the local minima of the free energy on the variance J^2 .

References

- [1] 山本潤, HyeRan Jo, 丸山祐也, 高西陽一, “超膨潤リオトロピックネマティック相の等方相-ネマティック相 2 次転移,” 日本液晶学会討論会講演予稿集 (2014).
- [2] 伊田知里, 高西陽一, 山本潤, “アゾ混合リオトロピックネマチック相における光誘起ネマチック-等方相転移,” 日本液晶学会討論会講演予稿集 (2015).
- [3] Lebwohl, P. A., and Lasher, G. ”Nematic-liquid-crystal order—a Monte Carlo calculation,” Phys. Rev. A 6.1 (1972): 426.

Td-WTe₂の光誘起構造相転移における 赤外線形・非線形光学応答

光物性研究室 繁岡 優

Abstract We explored the photo-induced phase of Td-WTe₂ by analyzing linear and nonlinear optical responses in the near- and mid-infrared regions. By comparing results obtained from three distinct probes, we distinguished between electronic temperature-related effects and lattice displacement contributions. This differentiation offers insights into comprehending the mechanism underlying photo-induced phase transitions. © 2024 Department of Physics, Kyoto University

光誘起相転移は照射によって物質のマクロな性質が変化する現象である。照射による物性の変化は構造[1]、磁性[2]など多岐に渡り、様々な物質系で長年研究されてきた。光誘起相転移における超高速な変化を観測する手法としては、フェムト秒パルスレーザーを用いたポンプ-プローブ分光法が広く用いられてきた。この手法では、ポンプ光によって誘起される物質系の変化を、時間遅延をつけて入射されるプローブ光の応答（反射・透過）の変化として観測することで、電子-格子結合ダイナミクスやキャリア緩和ダイナミクスなどの情報を取り出すことが可能である。しかし、光誘起相転移では格子変位や温度、キャリア密度などの様々な自由度が相互に関連しながらマクロな物性が変化するとともに、光学応答を特徴付ける電子状態も大きく変化するため、それぞれの自由度の変化が光学応答に与える影響を分離して理解することは一般に難しい。各自由度の役割を理解できれば、光誘起相転移のメカニズムの解明に繋がると期待される。

層状物質Td-WTe₂は光誘起構造相転移が実験的に確認されている物質であり、高強度な光励起により層間剪断変位が生じて構造が変化する[3,4]。構造変化に伴いトポロジカルな性質を変えることから、光誘起トポロジカル相転移の研究の舞台として注目されている。先行研究では、光励起によるキャリアドープが自由エネルギーの平衡点を変えることで剪断変位が誘起されることや[3]、過渡反射率測定により観測されるコヒーレントフォノン応答がプローブ光の波長と偏光に依存することが明らかにされ[4]、また赤外域に励起偏光に依存した軌道選択的な遷移の存在が理論的に予想されている[5]。

本研究では、高強度光励起によって形成したTd-WTe₂の光誘起相を、波長・偏光の異なる赤外光によりプローブし、さらに非線形光学応答である高次高調波を利用することで光学応答変化における各自由度の寄与の分離を目指した。Fig.1は赤外ポンプ光(1.55 eV)入射後15 psにおける(a)近赤外光学濃度変化(0.99 eV)、(b)中赤外反射率変化(0.26 eV)、(c)6.5 ps後における3次高調波(THG)強度変化のポンプ強度依存性である。ポンプ強度に対して、(b)はほぼ線形な傾向を示すのに対し、(a)は1.2 mJ/cm²以上で非線形な増大を示し、(c)は高強度励起で飽和する。これらの結果の比較から、波長・偏光に依らない電子温度の寄与を分離し、格子変位の寄与が波長選択的であることを明らかにした。つまり、波長・偏光によって関与する電子バンドが異なるとすれば、剪断変位による電子バンドの変化は各バンドで異なる。また、THG強度の大きな変化は線形光学応答では取り出せない電子バンドの微細な変化を反映していると考えられる。これは高次高調波を用いたプローブが光誘起相転移における超高速な電子バンドの変化を観測する強力な手法であることを示す。

References

- [1] S. Koshihara *et al.*, Phys. Rev. B **42**, 6853 (1990).
- [2] S. Koshihara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 4617 (1997).
- [3] E. J. Sie *et al.*, Nature **565**, 61(2019).
- [4] D. Soranzio *et al.*, Phys. Rev. Res. **1**, 032033(R) (2019).
- [5] M. X. Guan *et al.*, Nat. Commun. **12**, 1885 (2021).

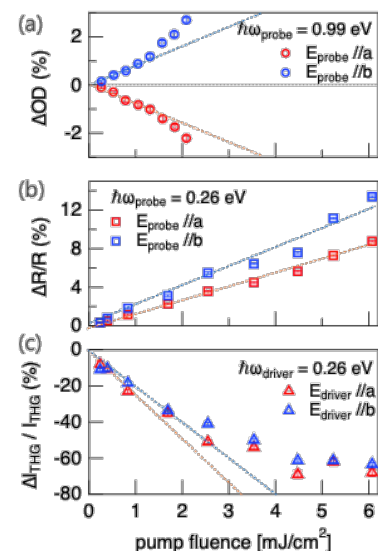


Fig.1 Pump fluence dependence of photo-induced change in infrared (a)optical density, (b)reflectance and (c)THG intensity. The dashed lines are linear guides.

強相関電子系における非線形エーデルシュタイン効果

凝縮系理論研究室 大池潤

Abstract We study electron correlations on the nonlinear Edelstein effect. In particular, we reveal that the effect of electron correlations depends on the form of the applied external field, and we clarify the physical origin of this dependence.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、電子のスピン自由度を利用した「スピントロニクス」が大きく進展し注目を集めている。スピントロニクスの中心的課題はスピンを電氣的に生成・制御することであり、典型的な手法の一つとしてエーデルシュタイン効果(LEE)が利用されている。LEEとは印可した電場によってスピンが偏極される現象で、空間反転対称性の破れた金属で観測される創発電磁応答の一種である。実際に、LEEで駆動されるスピントルクが理論的に提案され、磁性体中のドメイン反転にも成功している。他方、スピントロニクスで扱われる物質は弱相関系が大半で電子相関は見逃されていることが多い。背景には現代のスピントロニクスが線形応答に基づいて発展してきたことにある。例えば、電子相関がもたらす電子のくりこみ効果は線形応答に対してほとんど影響を与えないことが分かっている[1]。しかし、強相関物質の一つである $\text{Ce}_3\text{Bi}_4\text{Pd}_3$ において巨大な非線形ホール効果が観測されたこと[2]を契機に、非線形応答に強相関効果を取り込む研究が進展してきている。

スピントロニクス分野においても非線形効果を取り入れた研究が報告されつつある。例えば、非線形エーデルシュタイン効果(NEE)が理論的に提案されている[3-5]。NEEは以下3つの点から興味深い性質を持っている。まず、NEEはLEEと異なり空間反転対称性の破れを必要としない。また、金属に限らず半導体や絶縁体でも観測される。そして、非線形応答にも関わらずLEEと同程度の強さが期待される。上記の魅力的な特徴は「非線形スピントロニクス」を推し進めるとともに、強相関電子系をスピントロニクスの研究舞台に導くことが期待される。

そこで、強相関電子系が非線形スピントロニクスに有用な物質系であることを示すために典型的な Hubbard 模型に対して NEE の解析を行った。具体的には、強相関効果を取り込めるように NEE を定式化し、動的平均場理論(DMFT)を用いて強相関効果を取り込んだ。その結果、電子相関により応答が増強される場合と抑制される場合があること[Fig. 1]、そしてその違いを生み出す背景にある物理を明らかにした。これらの結果は今後の実験的検出に向けての指針を与えるとともに、非線形応答を媒介とした「強相関スピントロニクス」という新たな研究分野を提供するための第一歩である。

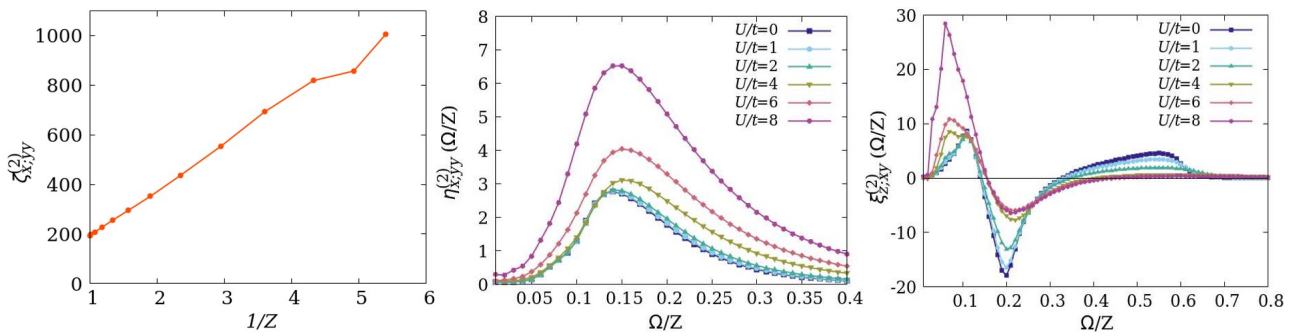


Fig. 1 Interaction dependence of (left panel) the current-induced, (middle panel) the linear polarization-induced and (right panel) the circular polarization-induced NEE response tensor.

References

- [1] Y. Michishita and R. Peters, Phys. Rev. B **103**, 195133 (2021).
- [2] S. Dzsaber, *et al.*, PNAS. **118**, e2013386118 (2021).
- [3] H. Xu, *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 205417 (2021).
- [4] B. M. Fregoso, Phys. Rev. B **106**, 195108 (2022).
- [5] C. Xiao, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 166302 (2023).

金属錯体 DNA の特異性を研究する 分子動力学シミュレーション

統計物理・動力学研究室 岡本光

Abstract We investigated the stability of metal-complex DNA through all-atom molecular dynamics simulations employing the reactive force field (ReaxFF). Our findings suggest that the introduction of the metal-complex enhances stability against temperature fluctuations, although counterintuitively, it diminishes resistance against external forces.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

金属錯体 DNA は抗がん剤や DNA を用いたナノテクノロジーの進歩に大きく貢献することが期待され、実験による研究が多くなされてきた。図 1 が本研究で使用した金属錯体 DNA の全体像である。天然 DNA における水素結合より、金属イオンによる配位結合の方が強いため、金属錯体の導入により DNA の安定性が増すと考えられ、多くの実験結果を再現できるが、その微視的な機構については分からないことも多い。数値シミュレーションによる研究が望まれるが、系の複雑さのため、金属錯体 DNA に関する研究は多くない。本研究では、反応力場ポテンシャルを用いた全原子分子動力学シミュレーションの開発し、金属錯体 DNA の安定性について調べた。

用いた錯体は図 1 にあるヒドロキシピリドンと二価の銅イオンが結合した H-Cu²⁺-H である。この錯体は銅イオンに配位する酸素と銅イオンが同一平面内に収まるという特徴を持ち、DNA 内部の立体構造を邪魔しにくい[1]。錯体の配位結合は水素結合よりも結合エネルギーが強く、錯体が増えれば増えるほど結合そのものは強くなることを期待される。

本研究では、特に(1)温度安定性と(2)外力応答に関する生体内の DNA と金属錯体 DNA の差について調査した。両者ともに構造変化の指標として二乗平均平方根偏差 (RMSD) を用いる。これはタンパク質などの構造の類似性を図るためにしばしば利用されるものである。本研究においては、初期構造をほぼ完全な二重らせん構造とし、この構造との類似性を RMSD という指標で計測し、温度上昇や外力に対して構造を保てるか、という研究を行った。

その結果、(1)温度変化に対しては図 2 のように RMSD の傾きを用いて考えた。その結果金属錯体 DNA の方が確かに RMSD の傾きが小さい、つまり温度に対する構造変化が起きにくく温度安定性が高いことが分かった。(2)外力応答に関しては、結合が強くなるため直観的には金属錯体 DNA の方が構造変化が起きにくくなると思われるが、これに反した結果が得られた。発表では、開発した手法の紹介と、このような錯体を DNA に挿入したことによる特異性について紹介する。

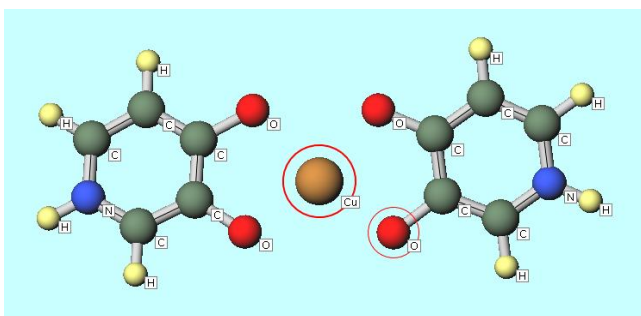


Fig. 1. Metal complex 'H-Cu²⁺-H'

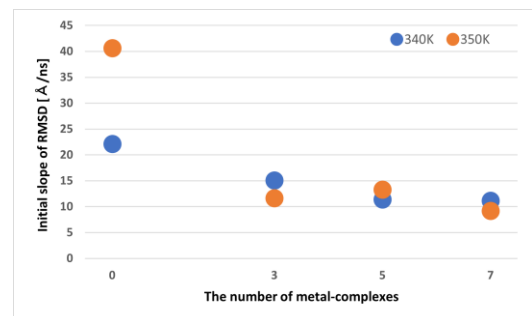


Fig. 2. Thermostability of the metal-complex DNAs

References

[1] Yusuke Takezawa and Mitsuhiko Shionoya., Accounts of Chemical Research, **45**, 2066–2076 (2012)

物質のトポロジカル相における対称性と双対性

基礎物理学研究所 凝縮系 安藤貴政

Abstract When the system has a global symmetry, we can define duality operations that map the system to others with dual symmetries. In this presentation, we discuss the structures of such dualities in (1+1)-dimensional systems. In particular, we explore implications of self-dualities.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

量子多体系の性質を理解するうえで、その基底状態において発現するトポロジカル相の性質を調べることは重要な課題である。これまでの研究において、系が持つ大域対称性に注目することでさまざまなトポロジカル相の性質が明らかにされてきた。近年においては大域対称性の概念が拡張されており[1]、そのような拡張された対称性の枠組みにおけるトポロジカル相が盛んに研究されている。大域対称性に基づいたトポロジカル相の研究の一つの方向に、実現可能な相を列挙し分類することがある。この研究は大きな成功を収め、ある特別なクラスの相においては、次元と対称性に応じたほぼ完全な分類が知られている[2]。

こうした個別のトポロジカル相の性質はよく知られている一方で、異なるトポロジカル相の間にはどのような関係があるかについては理解されていない部分が多い。この問題に取り組む手法の一つに双対変換がある。双対変換とは、系の大域対称性に応じて定義される（一般に異なるヒルベルト空間の間の）変換であり、あるトポロジカル相に属する系を異なるトポロジカル相に属するものへ移すような操作である。双対変換後の系は一般にもとの系とは異なる大域対称性を持つ。さらに、ある系が可解であれば双対変換後の系も可解であるため、変換をうまく選ぶことで性質の良い対称性を持つ系に移ることができる場合がある。

本研究では、空間1次元系における双対変換のなす構造の詳細を調べる。特に、双対変換のもとで不変な（自己双対性を持つ）系についての解析を行う。自己双対性のもとでは系の対称性はより拡大されたものとなり、その帰結として模型の詳細によらず基底状態の性質に大きな制約を課することができる（例えば[3]のような結果がある）。さらに、こうした自己双対性のある系を調べることにより、異なるトポロジカル相の間で発現する臨界相（一般には多重臨界点）の性質が議論可能となる。本研究ではこのような一般論に加えて、ある対称性に対する自己双対性を持つ系の性質を調べ、さらにいくつかの臨界格子模型を解析する。応用として、位数4の二面体群の対称性を持つ系において、双対変換の自己双対性に注目することで、量子異常に起因する **unique** かつ **gapped** な基底状態を禁止する機構と、自明な **SPT** 相を禁止する機構との関係を議論する。自己双対性のもとの対称性の拡大については数学的な一般論が存在する[4]が、この結果の物理的意味および拡張についても議論する。

References

- [1] D. Gaiotto, A. Kapustin, N. Seiberg, and B. Willett, *Generalized Global Symmetries*, JHEP **02** (2015) 172.
- [2] D. S. Freed and M. J. Hopkins, *Reflection positivity and invertible topological phases*, Geom. Topol. **25** (2021) 1165-1330.
- [3] M. Levin, *Constraints on order and disorder parameters in quantum spin chains*, Commun. Math. Phys. **378** (2020) 1081-1106.
- [4] P. Etingof, D. Nikshych, and V. Ostrik, *Fusion categories and homotopy theory*, Quantum Topol. **1** (2010) 209-273.

非エルミート表皮効果の局在特性の解明

基礎物理学研究所物性基礎論凝縮系

下村 顕士

Abstract We establish a criterion for localization phenomena inherent in non-Hermitian systems. This criterion elucidates the localization property of non-Hermitian skin effects in single-particle systems, and is also applicable to many-body systems. We discuss the effect of such a localization to dynamics of a non-Hermitian system.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

古典系から量子系にいたるまで、非エルミート行列がダイナミクスを規定する物理系の性質が近年盛んに研究されている。非エルミート系ではエルミート性由来の制約を超えた現象が現れる場合があり、非エルミート表皮効果はその典型である。並進不変な格子上的自由粒子に関する非エルミート表皮効果は、開放境界条件の下で多数の固有状態が系の端に局在することによって特徴づけられる [1]。1次元系の場合は、周期境界条件でのバンドトポロジー [2, 3] や開放境界条件での拡張されたバンド理論 [1, 4] の観点から非エルミート表皮効果の起源と振舞いが系統的に理解されている。一方、高次元系、並進不変でない格子系、相互作用系では、非エルミート表皮効果を引き起こすモデルが個別的に研究されているに留まり、特にその局在特性には未解明な部分が多い。

幅広いクラスの非エルミート表皮効果の局在特性を系統的に理解するため、本講演ではまずベクトルの局在性を一般的な枠組みで定義する (Fig 1)。その上で、「同じ位置に局在するベクトルの個数がある閾値を越えるとそれらを固有状態に持つ行列がエルミートになりえない」という定理を示す。この定理はエルミート系に対応物がない固有状態局在現象の特徴づけになっており、非エルミート表皮効果の局在特性がこの定理から説明される。また、この定理は系の次元性や形状に関係なく成立し、相互作用系においても Fock 空間に属する固有状態に対してこの定理が適用できる。

次に、このような固有状態局在現象が非エルミート系のダイナミクスに及ぼす影響を議論する。そのために条件数と呼ばれる固有ベクトルの非直交性の指標を導入する [5]。条件数の増大は擬スペクトルを通して系の過渡領域のダイナミクスに影響を与えることが知られている [6]。本講演では固有状態の局在性と条件数との間に成り立つ不等式を導き、固有状態の強い局在が条件数を増大させることを示す。

References

- [1] S. Yao and Z. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 086803 (2018).
- [2] N. Okuma, K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Sato, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 086801 (2020).
- [3] K. Zhang, Z. Yang, and C. Fang, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 126402 (2020).
- [4] K. Yokomizo and S. Murakami, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 066404 (2019).
- [5] Y. O. Nakai, N. Okuma, D. Nakamura, K. Shimomura, and M. Sato, arXiv preprint arXiv:2304.06689 (2023).
- [6] L. N. Trefethen and M. Embree, *Spectra and Pseudospectra*, Princeton University Press (2005).

A vector $\mathbf{u} \in \mathbb{C}^D$ is Λ -localized with localization length ξ .

$\stackrel{\text{def}}{\iff}$

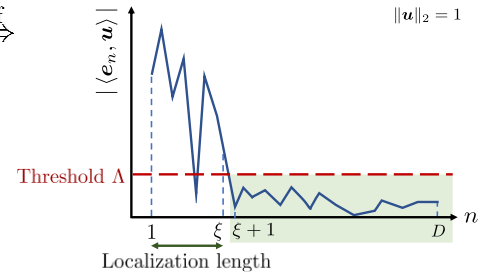


Fig 1. Schematic illustration of the vector localization considered in this talk.

混合次元周期アンダーソン模型における UTe₂の磁性と超伝導

凝縮系理論研究室 白野龍二

Abstract UTe₂ is a strong candidate for the spin-triplet superconductor. We construct a mixed-dimensional periodic Anderson model and apply it to UTe₂ in order to elucidate the relationship between the Fermi surface, magnetic fluctuation, and superconducting state. We show that the spin-triplet *p*-wave superconductivity is stable over a wide range of parameters, especially in the regime dominated by antiferromagnetic fluctuations.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

スピン三重項超伝導はクーパー対がスピン自由度を持つ超伝導状態であり、トポロジカル超伝導など様々な興味深い現象が発現する舞台であると考えられている。UTe₂は2018年に超伝導が発見された近年非常に注目を集めている超伝導体[1]であり、パウリ極限を超える非常に大きな上部臨界磁場[2]、磁場や圧力をかけることによって現れる多重超伝導相[3]などの事実からスピン三重項超伝導体の有力な候補物質であると考えられている。

発見当初から UTe₂ の超伝導対称性を決定するために非常に多くの研究が行われてきた。最近では、NMR のナイトシフト測定や熱伝導度測定においてフルギャップ超伝導状態を示す結果が得られている。一方で、比熱や磁場侵入長測定においてはポイントノードの存在を示唆する実験結果が得られているため、超伝導対称性に関するコンセンサスを得るには至っていない。

また、超伝導の発現機構については、発見当初に行われた磁化率測定や他の強磁性超伝導体との類似点から、強磁性揺らぎが誘起するスピン三重項超伝導体であると考えられてきた。しかし、その後行われた中性子散乱の実験により強磁性揺らぎではなく反強磁性揺らぎが観測された。反強磁性揺らぎは一般にスピン三重項超伝導ではなく、スピン一重項超伝導を安定化するため磁気揺らぎと超伝導状態の関係を再考する必要性が認識された。

電子状態に関しては、UTe₂ ではド・ハース・ファン・アルフェン振動の実験から準2次元的なフェルミ面が報告されており、第一原理計算の結果からそれらは1次元的な伝導電子から構成されていると考えられている[4]。一方で、このフェルミ面に加えて3次元的なフェルミ面の存在を示唆する結果が第一原理計算やいくつかの実験から報告されている。

本研究では、上で述べた1次元及び3次元的なフェルミ面が共存するような混合次元周期アンダーソン模型を構築し、磁気揺らぎ及び超伝導不安定性を解析した[5]。その結果を UTe₂ に適用し磁気揺らぎの起源及び超伝導対称性を決定することを目的とした。乱雑位相近似を用いた理論解析により、フェルミ面の性質によって磁気揺らぎが変化することを示した。また、広いパラメータ領域、特に反強磁性揺らぎが支配的な領域においてもスピン三重項 *p* 波超伝導が安定になることを明らかにした。

References

- [1] Sheng Ran *et al.*, Science **365**, 684-7 (2019).
- [2] Georg Knebel *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 063707 (2019).
- [3] Daniel Braithwaite *et al.*, Commun. Phys. **2**, 147 (2019).
- [4] Dai Aoki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 083704 (2022).
- [5] Ryuji Hakuno, Kosuke Nogaaki and Youichi Yanase, arXiv:2306.00405.

表面微細金属構造によるテスラ級ピコ秒パルス磁場の発生とスピンドYNAMIKSの研究

光駆動固体物性研究室 丸山慶

Abstract We studied the generation of terahertz magnetic field pulses by applying terahertz pulses to a micro-scale metallic structure fabricated on a terbium-gallium-garnet substrate. We measured the temporal waveform of the magnetic pulses by a magneto-optical sampling method and showed that the maximum value achieved at about 1 T.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、微細な金属共振器構造を用いてテラヘルツ (THz) 光の電場や磁場を増幅させる技術によって、新しい物理現象の発見、および新規物性を解明する研究が盛んに行われている[1,2]。アンテナ付きらせん型共振器 (SAR) はその一つであり、自由空間を伝播する THz パルスを高効率に捕集し、らせん構造内に瞬間的に電流が発生することにより、物質内部にピコ秒程度の高強度磁場パルスの生成が予測されている[1,3]。最近では、SAR を活用したスピンの非線形応答が観測されているが[1]、発生する磁場パルスの時間波形や絶対値を実験的に直接評価した報告例はない。本研究では、発生させる磁場パルスの時間波形の絶対値を磁気光学サンプリング法 (MOS) によって評価することを目的とした。

Fig. 1 に本研究で行った MOS 実験の光学系を示す。試料として、Fig. 2 に示すような SAR をテルビウム-ガリウム-ガーネット (TGG) 上に作製した。TGG 結晶は、大きなヴェルデ定数を持ち、ファラデー回転角から磁場の絶対値を決定する実験に適した常磁性材料である[4,5]。近赤外光パルス (中心波長 800 nm、時間幅 80 fs) をパルス面傾斜法を用いて LiNbO₃ に照射し、高強度な THz パルスを発生させた。放物面鏡を用いて試料表面にある SAR のアンテナ部分の長手方向に偏光した THz パルスを集光させた。電気光学サンプリング法により測定した最大電場強度は 0.6 MV/cm である。THz 電場照射により、らせん構造に流れる瞬時電流によって TGG 結晶内に発生するパルス磁場を、プローブ光の偏光回転角の変化として測定した。ここで、らせん内部の磁場が均一な領域は直径 4 μm 程度であるため、プローブ光を対物レンズで 1 μm 程度に集光している。入射する THz パルスと近赤外光パルスの相対的時間間隔をステージ掃引により変化させ、発生するパルス磁場の時間波形を測定した。静磁場によるファラデー回転測定により測定した TGG 試料のヴェルデ定数 (80 rad/T m) を用いることにより、ピコ秒パルス磁場の最大磁場強度が 0.96 T に達することが分かった。また、その磁場波形は計算値と精度良く一致した。

さらに、反強磁性体オルソフェライト Sm_{0.7}Er_{0.3}FeO₃ 上に SAR を作製し、テスラ級ピコ秒パルス磁場による非線形なスピンドYNAMIKS を観測した。発表ではこの成果についても報告する。

References

- [1] Z. Zhang *et al.*, Nat. Commun. **14**, 1795 (2023).
- [2] Y. Mukai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 22410 (2014).
- [3] D. Polley *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **51**, 224001 (2018).
- [4] N. Kumar *et al.*, Opt. Express **20**, 11277 (2012).
- [5] K. Maruyama *et al.*, under review.

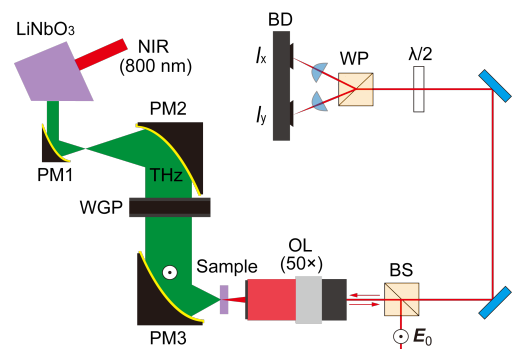


Fig. 1. Experimental setup.

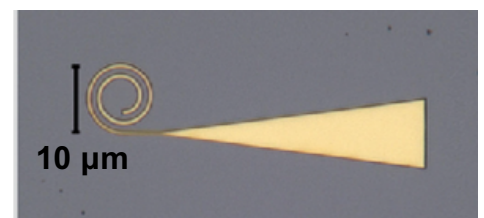


Fig. 2. SAR fabricated on a TGG substrate.

Interacting Kitaev Chain with $\mathcal{N} = 1$ Supersymmetry

Physics of Matter: Condensed Matter Physics (YITP) Urei Miura

Abstract We explore a Kitaev chain model with $\mathcal{N} = 1$ supersymmetry, focusing on ground-state degeneracy and fermion excitations. We identify a phase with spontaneously broken supersymmetry and analyze the related phase transition. Using superfield formalism, we devise a mean-field theory to understand the order parameters and Nambu-Goldstone fermions. We discover significant degeneracy in the ground state at the frustration-free point, linked to zero-energy domain walls that separate the trivial and topological states of the Kitaev chain.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

Symmetry is crucial in modern physics, providing a unified framework for elementary particles and essential for categorizing various phases of matter. Supersymmetry, generated from fermionic operators, stands in contrast to conventional bosonic symmetry and boasts unique properties. It is particularly useful in condensed matter and statistical physics for analyzing disordered systems. An exemplary case is the $\mathcal{N} = 1$ supersymmetry at the tricritical point in the two-dimensional Ising model with vacancies.

There is growing interest in applying the non-relativistic supersymmetry to the purely fermionic lattice models [1], which showcase special features like extensive ground-state degeneracy and Nambu-Goldstone fermions with spontaneous supersymmetry breaking.

We propose a lattice model composed of Majorana fermions with explicit $\mathcal{N} = 1$ supersymmetry [2-4]. In this model, the supercharge is represented as a sum of local terms. This setup facilitates the study of fermionic excitations at low energies and the characteristics of the ground state through both analytical and numerical methods. We rigorously prove the spontaneous breaking of supersymmetry and the existence of Nambu-Goldstone fermions. Moreover, we develop a new mean-field approximation that automatically detects the breaking of supersymmetry. The phase transition points obtained from numerical analysis using the Density Matrix Renormalization Group (DMRG) are consistent with our rigorous analytical results and the estimates from the mean-field approximation. The DMRG further reveals that the emergent Nambu-Goldstone fermions are described by Ising Conformal Field Theory (CFT), and the supersymmetry breaking transition point is described by the tri-critical Ising CFT. Additionally, we identify the exact ground state at a certain parameter value, which exhibits degeneracy proportional to the system size and forms a zero-energy domain wall, separating the topological from the trivial states in the Kitaev chain (see Fig. 1). Through perturbation theory, we elucidate that this domain wall ground state demonstrates a quadratic dispersion relation when the parameter values are altered.

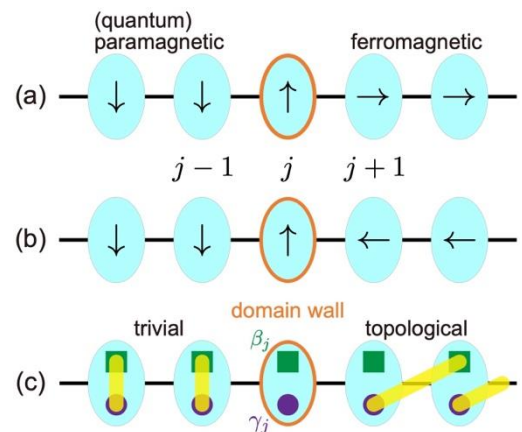


Fig.1 Exact ground state as the zero-energy domain wall.

References

- [1] Fendley, P., Schoutens, K., & de Boer, J. (2003). Physical review letters, 90(12), 120402.
- [2] Sannomiya, N., Katsura, H., & Nakayama, Y. (2016). Physical Review D, 94(4), 045014.
- [3] Miura, U., & Totsuka, K. (2023). arXiv:2308.03346.
- [4] Miura, U., Shimomura, K., & Totsuka, K. (2023). arXiv:2310.19493.

計算機解析と量子ビーム散乱による タンパク質の溶液構造ダイナミクス研究

生体分子構造研究室 會澤直樹

Abstract The combination of small-angle X-ray scattering, small-angle neutron scattering assisted by deuteration and ligation techniques and computational approach was applied to solve the solution structure of a multi-domain protein (MDP). The solution structure of MDP was successfully reproduced by the ensemble of five model structures.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

マルチドメインタンパク質 (MDP) は複数のドメインから構成されるタンパク質であり、溶液中の内部運動が MDP の多様な溶液構造の起源となっている。溶液構造を捉える手法として X 線小角散乱 (SAXS)、中性子散乱 (SANS) が挙げられ、計算機解析との統合解析が進められている。一方、大きな内部運動の振幅を持つ MDP の散乱曲線は、散乱強度に対して散乱ベクトルの単調減少として観測されることが多い。このような散乱曲線のみによる溶液構造の解明は困難なため、更なる実験による拘束条件が必須である。部分重水素タンパク質は 100% 重水中の SANS 測定で散乱的に不可視化される [1]。また、ライゲーション技術により MDP の構成ドメインを連結することで MDP を再構成できる [2]。即ち、重水素化とライゲーション技術の組み合わせによりヘテロ重水素化 MDP を調製し、その SANS 測定から得られる散乱曲線は更なる実験上の拘束条件となることが期待される。本論文では、MDP の一例として 2 つのドメイン (Helicase domain (H) と Nuclease domain (N)) と天然変性領域 (I) から構成される Hef に注目した。軽水素化 Hef (*h*-Hef: *h* は軽水素化を表す) 溶液の SAXS 及び SANS 測定、Helicase domain を重水素化した Hef (*hN*-*hI*-*pdH*: *pd* は部分重水素化を表し、SANS では不可視化) 溶液、Nuclease domain を重水素化した Hef (*pdN*-*hI*-*hH*) 溶液の SANS 測定から得られた散乱曲線 (Fig. 1) を用いて、Hef の溶液構造解析を行った。アンサンブル最適化法 (EOM) [3] から生成された候補集団を用いて、四つの散乱曲線を最も良く再現する構造集団を遺伝的アルゴリズムを用いて選出した。最終的に、Fig. 2 に示す構造集団により四つの散乱曲線を再現した。本構造集団を用いた更なる解析、及び物理的な解釈は当日発表する。

References

- [1] M. Sugiyama *et al.*, *J. Appl. Cryst.* (2014), 47, 430.
- [2] A. Okuda *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.* (2022) 62, e202214412.
- [3] T. Giancarlo *et al.*, *IUCrJ* (2015) 2, 207.

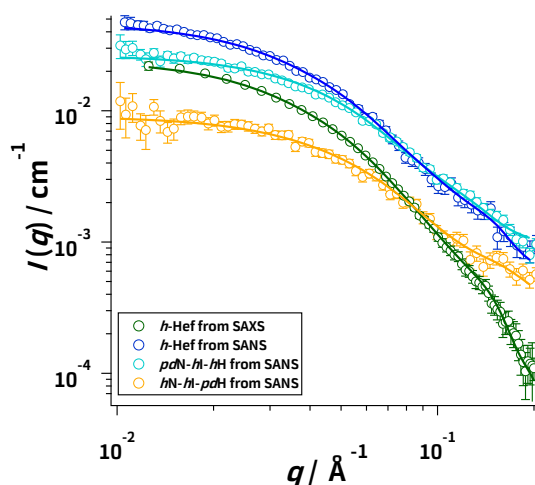


Fig.1. SAXS profile from *h*-Hef (green circle), SANS profiles from *h*-Hef (blue circle), *hN*-*hI*-*pdH* (yellow circle), *pdN*-*hI*-*hH* (light blue circle). The green, blue, yellow and light blue lines correspond to the ensemble averaged scattering profiles for *h*-Hef, *h*-Hef, *hN*-*hI*-*pdH*, and *pdN*-*hI*-*hH*, respectively.

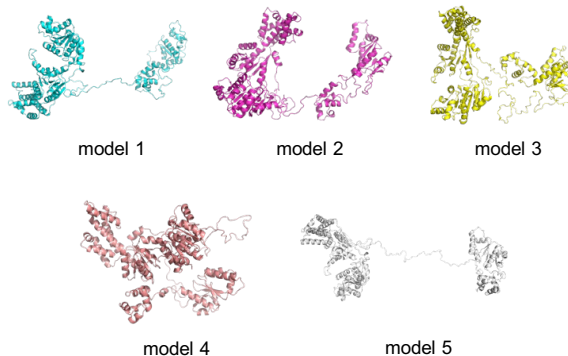


Fig.2. Five model structures selected by EOM.

化学気相成長ダイヤモンドにおける 励起子再結合過程の評価

光物性研究室 戸塚大貴

Abstract The effect of non-radiative recombination of excitons at dislocations in chemical-vapor deposition diamonds is modeled based on a diffusion equation. We have found an excellent agreement between the predicted spatial patterns of quantum efficiency of excitonic emission and the observations.
© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ダイヤモンドは5.5 eVのワイドバンドギャップを持つ間接半導体であり、近年は化学気相成長(CVD)法によって高純度な単結晶が合成可能となったことから、深紫外発光ダイオードやパワーデバイスへの応用が期待されている。ダイヤモンドを光励起することで生成される電子と正孔の束縛対である励起子は94 meVという大きな束縛エネルギーを持ち[1]、ダイヤモンドの光学特性に深く関わっている。CVDダイヤモンドでは線欠陥(転位)が多く内在し、励起子の非輻射中心としてはたらくことが最近指摘された[2]。本研究では、転位によって生じるひずみの大きさから局所的に発光量子効率を求めるモデル(以下、転位モデルと呼ぶ)を2次元に拡張し、長い拡散長をもつ励起子の空間移動に加え、結晶内に不均一に分布する複数の転位の効果を取り込んで量子効率を求める数値計算の手法を提案した。また、空間分解発光測定によって量子効率を極低温から室温まで実測し、計算結果との定量的な比較を行った。転位モデルでは、複屈折法により測定した主ひずみ差 ϵ を用いて転位までの有効距離 $w[\mu\text{m}] = 0.35/\sqrt{\epsilon}$ を求めることで、結晶内の各場所における非輻射寿命

$$\tau_{\text{nrad}} \approx \frac{w}{2S} + \frac{4w^2}{D\pi^2}$$

を近似的に計算した。ここで、 $D(=70 \text{ cm}^2/\text{s})$ は拡散係数、 $S(=1.3 \times 10^6 \text{ cm/s})$ は表面再結合速度である[2]。得られた τ_{nrad} と既知の輻射寿命 $\tau_{\text{rad}}(=1.5 \mu\text{s})$ を用い、量子効率 $\eta = \tau_{\text{nrad}}/(\tau_{\text{rad}} + \tau_{\text{nrad}})$ の空間分布に換算した。一方、数値計算では、実測したひずみの空間分布を再現するような2,000個の転位を初期条件として配置した。時間積分した励起子密度が量子効率に比例すると考え、転位での非輻射再結合を境界条件とした拡散方程式の時間積分形を数値的に解くことで、その空間分布を求めた。

実験では、深紫外レーザー光を線状にダイヤモンド試料($3.5 \times 3.6 \times 0.5 \text{ mm}^3$)に照射しスキャンすることで励起子発光の空間分布を測定し、試料中央で測定した寿命 $\tau_{\text{net}} = (1/\tau_{\text{rad}} + 1/\tau_{\text{nrad}})^{-1}$ を用いて量子効率を求めた。図1の黒線は実測した量子効率 $\eta = 0.22$ の等高線を表し、転位による空間不均一性が転位モデル(図1 a)および数値計算(図1 b)で再現されていることが分かる。数値計算で得られた量子効率は実験値より2倍程度高く、このことは励起子が拡散するだけでなく転位周りのポテンシャル勾配により引き込まれる可能性を示唆している。

References

- [1] T. Ichii, N. Naka, and K. Tanaka, Phys. Rev. B **104**, 205201 (2021).
- [2] K. Konishi, I. Akimoto, J. Isberg, and N. Naka, Phys. Rev. B **102**, 195204 (2020).

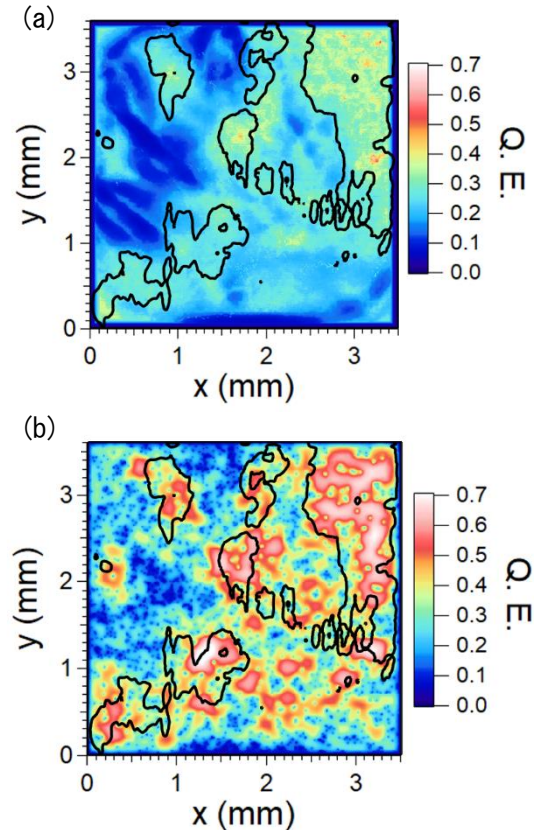


FIG. 1: Map of calculated quantum efficiency (Q.E.) by (a) dislocation model and (b) numerical simulation compared with measured Q.E. depicted by black contours at $\eta=0.22$ at 20 K.

冷却原子を用いたゲインエンジニアリング： ダーク状態およびトポロジカルエッジ状態の 原子波レーザーの観測

量子光学研究室 津野琢士

Abstract We investigated engineering of an effective gain through evaporative cooling of judiciously chosen initial thermal atoms. We successfully observed a formation of Bose-Einstein condensation in a dark state and a topological edge state in a synthetic hyperfine lattice, which is regarded as atomic laser oscillations.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、孤立系では見られない新奇な現象が生じることから、開放系に注目が集まっている。特に、量子状態の制御が研究の重要な課題となっている。開放系における主要な研究プラットフォームの一つであるフォトニクス系はゲインとロスの両方の制御が柔軟に可能である。そのため、トポロジカル絶縁体レーザー[1]などの様々な非エルミート物理現象が実現されている。また、このような相互作用のない古典系とみなせるフォトニクスと異なり、冷却原子系は原子間相互作用が重要な役割を演じる量子多体系であり、その高い制御性から量子開放系としても注目を集めている一方で、冷却原子系はゲインをコントロールすることが容易ではないため、非エルミート過程の制御がロスの制御に限定されている。つまり、冷却原子系ではゲインによる非エルミート物理現象を研究することができないという制限がこれまで存在していた。

本研究では、 ^{87}Rb の超微細構造を用いた人工次元[2]の格子上にダーク状態およびトポロジカルエッジ状態をマイクロ波を照射することにより用意し、重ね合わせ状態を維持しつつ蒸発冷却することでボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を生成する、すなわち原子波レーザー発振させる実験を行った。より具体的には、3-site lattice を人工次元上に構築し、ダーク状態の BEC の生成を試みた。また図1のように 5-site の Su-Schrieffer-Heeger(SSH)モデルを人工次元上に構築し、トポロジカルエッジ状態の BEC の生成を試みた。その結果、複数の実験条件においてダーク状態およびトポロジカルな重ね合わせ状態の BEC の生成を確認できた。すなわち、適切な熱的原子の初期状態を用意することで、蒸発冷却を通して lattice サイト依存の有効ゲインのエンジニアリングに成功した。これは、冷却原子系に対する新たなゲインエンジニアリングの手法を実証したことになり、開放量子系の研究に新たな展開をもたらすことが期待される。

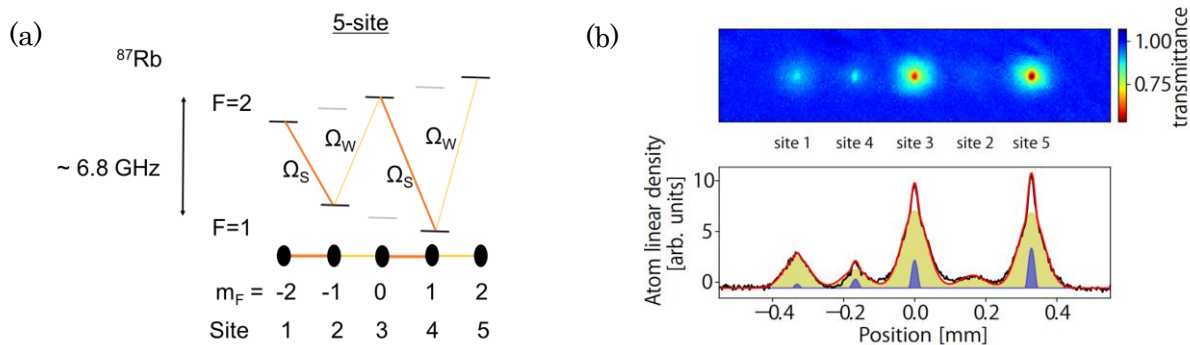


Fig. 1. (a) Microwave coupling scheme in the ground $5^2S_{1/2}$ state with ^{87}Rb . (b) Atomic laser oscillations in a topological edge state of the Su-Schrieffer-Heeger lattice in the synthetic hyperfine lattice. The upper is a typical absorption image and the below is the corresponding column density with the best fit bimodal function.

References

- [1] Miguel A. Bandres *et al.*, Science **359**, eaar4005 (2018).
- [2] T. Ozawa and H. M. Price, Nat. Rev. Phys. **1**, 349–357 (2019).

Fiber Bragg grating を用いたひずみ測定による 新奇交差相関応答の観測

固体量子物性研究室 富川幹也

Abstract Using fiber Bragg grating, we measured two types of cross correlations: piezomagnetism (magnetic-field-induced strain) in URhGe and magnetopiezoelectric effect (current-induced strain) in BaMn₂As₂. Piezomagnetism of URhGe appeared in “V-shaped” magnetostriction ($\epsilon \propto |H|$), and magnetopiezoelectric effect of BaMn₂As₂ could be distinguished from other thermal effects.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

異なる対称性をもつ物理量が、物質のパリティ対称性や時間反転対称性の破れにより結びつく「交差相関」が近年注目を集めている。その一つに、圧磁効果 (piezomagnetism) がある。これは磁性物質に磁場をかけて磁化させたのち、その反対方向に磁場をかけるとひずみが線形に応答する ($\epsilon \propto H$) 現象や、その逆効果を指す[1,2]。これは時間反転対称性を破った系で起こり得る交差相関であり、これまで反強磁性体やフェリ磁性体において観測されていた。しかし近年、イジング的遍歴強磁性体 URhGe において磁化容易軸 (c 軸) への磁場の印加により、圧磁効果がみられる旨の理論予想がなされている[3]。

また、新規に提唱されている交差相関として、磁気圧電効果 (magnetopiezoelectric effect) がある[4]。これは電流の印加によってひずみが誘起される現象で、時間反転対称性と空間反転対称性が破れた系において起こり得る。動的測定ではすでに反強磁性金属EuMnBi₂において確認されており[5]、さらなる物質での観測が期待されている。候補物質であるBaMn₂As₂は、 $T_N = 625$ KでG-typeの反強磁性秩序を示し、そのときの磁気構造は、時間反転対称性・空間反転対称性を共に破った奇パリティ多極子秩序状態となっている。この状態に c 軸方向の電流を流すと、 ab 面方向に格子ひずみが誘起されると予想されている[4]。

本研究では、光ファイバーベースのひずみ測定手法である fiber Bragg grating (FBG) 法[6]の電磁耐性や多軸同時測定が可能な特性を生かし、これら2種類のひずみに関する交差相関を研究した。

Fig. 1にURhGeの $T_{FM} = 9.5$ K前後での $H \parallel c$ 中での磁気ひずみを示す。 $T > T_{FM}$ では $H \sim 0$ T付近で $\epsilon \propto H^2$ の振る舞いを示すのに対して、 $T < T_{FM}$ では $\epsilon \propto |H|$ となる。URhGeの $H \parallel c$ 下での磁化は、わずか 10^{-2} Tほどの外部磁場で完全に反転できるため我々のひずみ測定の結果は、低磁場での磁化方向の切り替わりと圧磁効果の組み合わせで解釈できる。これは、我々の知る限り、強磁性体における初めての磁気圧電効果の観測例である。

Fig. 2に、BaMn₂As₂の c 軸方向に矩形波の電流を印加した際の[110]軸と[100]軸のひずみのフーリエ変換の結果を示す。[110]軸には矩形波のフーリエ変換に現れるような1倍波や3倍波がみられるが、[100]軸にはみられない。これは、磁気圧電効果により ab 面にシアーなひずみが発生していることを示唆している。

References

- [1] A. S. Borovik-Romanov, *Ferroelectrics* **162**, 152-159 (1994).
- [2] M. Jaime *et al.*, *Nat. Commun.* **8** 99 (2017).
- [3] V. P. Mineev, *J. Exp. Theor. Phys.* **132**, 556-558 (2021).
- [4] H. Watanabe and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **96**, 064432 (2017).
- [5] Y. Shiomi *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **122**, 127207 (2019).
- [6] C. E. Campanella *et al.* *Sensors* **18**, 3115 (2018).

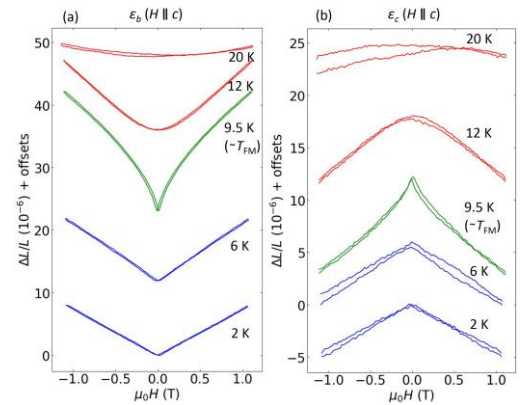


Fig. 1. Magnetostriction of URhGe (a) ϵ_b , (b) ϵ_c , with $H \parallel c$.

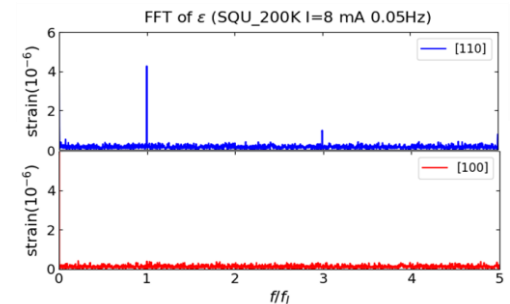


Fig. 2. FFT of the square AC induced strain of BaMn₂As₂.

光格子中量子磁性観測に向けた 量子気体顕微鏡の安定性改善と新イメージング法の提案

量子光学研究室 磯貝賢伸

Abstract By significantly improving our quantum gas microscope machine, we successfully obtain clear fluorescence images with single-site resolution for single ^{174}Yb atoms of a Bose-Einstein condensate loaded into a two-dimensional optical lattice. We also propose a high-fidelity spin-selective imaging scheme for ^{173}Yb .

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

1995年に冷却気体原子によるボースアインシュタイン凝縮[1]が実現されて以来、冷却気体原子系は量子多体系の新たな研究材料として注目されるようになった。特に近年では、光格子中の冷却気体原子系を用いた Hubbard モデルの量子シミュレーションが盛んに研究されている。このような系を、観測する強力な手法として量子気体顕微鏡(QGM)がある。量子気体顕微鏡とは、光格子中にトラップされた原子を、高分解能イメージング系によって単一格子点単位で直接観測する手法である。原子スピンを分解して測定することによる、量子磁性の直接観測も達成されている[2]。

従来の量子気体顕微鏡では、アルカリ金属が研究の対象とされることが多かったが、我々の研究グループの量子気体顕微鏡はアルカリ土類金属であるイッテルビウム(Yb)を対象としたものである。イッテルビウム原子は安定同位体が豊富であり、特に核スピン $I=5/2$ を持つ ^{173}Yb ($I=5/2$) は 新奇な量子相をもつ $SU(N \leq 6)$ Hubbard 模型[3]の研究に利用することが可能であり、最近では新奇な $SU(N)$ Hubbard 模型における反磁性相関の観測も行われている[4]。

我々の装置では、固侵レンズの使用によって高分解能を達成しているが、単一格子分解イメージングを行うためには、固侵レンズの直下に十分に冷却された原子を用意することが不可欠である。本研究では、系統的な測定に必要な安定性を確保するため、不安定性の原因を突き止め装置の改善を行った。特に、輸送に使用する移動光格子内における原子の意図しない加熱原因の除去、磁気光学トラップにトラップされた原子数の揺らぎの抑制、等に成功した。結果、 ^{174}Yb (ボーズ同位体) を使用した実験では、安定的にボースアインシュタイン凝縮を作り出すことに成功した。更に、Richardson-Lucy アルゴリズムを利用した Deconvolution[5]と組み合わせることで、各サイトの発光量分布をプロットしたヒストグラムにおいて、占有サイトと非占有サイトの発光量ピークを分離することにも成功した。また、本研究では、 ^{173}Yb 原子を用いた実験に向けて、Probe 光による原子の加熱を抑制し、また同時に原子の冷却を行うこともできるようなイメージング手法を提案する。単一格子分解測定のフ

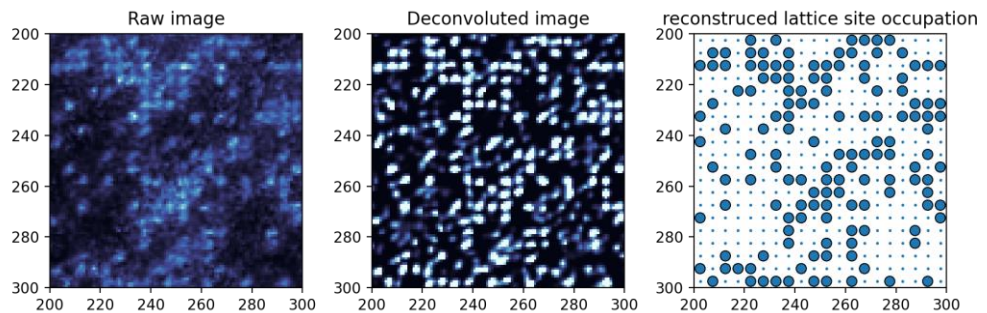


Fig. 1. Fluorescence imaging of ^{174}Yb atoms in two-dimensional lattice. (Left) Raw, (Middle) deconvoluted images with $10.78\mu\text{m} \times 10.78\mu\text{m}$. (Right) Reconstructed lattice site occupation.

References

- [1] M. H. Anderson et al, Science **269**(5221), 198-201(1995).
- [2] A. Mazurenko et al., Nature **545**, 462 (2017).
- [3] M. A. Cazalilla and A. M. Rey, Rep. Prog. Phys. **77**, 124401 (2014).
- [4] S. Taie et al., Nat. Phys. **18**, 1356 (2022).
- [5] W. H. Richardson, J. Opt. Soc. Am. **62**(1), 55-59 (1972).

一般のノイズに対する量子情報復元手法の明示的構成 Constructing succinct decoders for an arbitrary noisy channel

物性基礎論：量子情報研究室 内海武尊

Abstract For quantum information recovery, we introduce two decoders for any quantum noise. One is an extension of the Yoshida-Kitaev decoder, and the other is a concise version of the Petz map. We analyze upper bounds on recovery error and circuit complexities. We then compare their efficiency with the Petz map.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

量子情報の通信を行う際に、情報源から送信される情報は環境系との相互作用によってノイズの影響を受けてしまい情報が正しく受信されないことが起こりえる。そこで、通信の前後にエンコーディング・デコーディングと呼ばれる操作を行うことでそのノイズを実効的にキャンセルし、望みの情報の伝達を可能にしたい。ノイジーな量子通信理論はこのような問題に取り組むものであり、本研究はその一分野に属する。

送信できる情報量のレートの原理的な上限は量子通信容量と呼ばれ、これまで盛んに研究されてきた。量子相関のモノガミー性に基づいたデカップリングアプローチにより、量子通信容量を達成するエンコーディングの手法としては、Haar ランダムユニタリを用いる“良い”手法が知られている。一方で、デコーディングの手法は明示的ではなく、Uhlmann の定理によりデコーダの存在が保証されるに留まる。しかし実際に通信を行う場合、具体的なプロトコルとして提示された明示的なデコーダが必要となる。現時点では、明示的に構成され、一般のノイズに適用可能な効率の良いデコーダの開発は十分ではない。

本研究では量子情報のデコーディングに着目し、既存の明示的なデコーダに着想を得た2種類の新デコーダの構成を行った。一つは qubit 消失ノイズに対する復元手法として提案された Yoshida-Kitaev デコーダを拡張したものである。Qubit 消失ノイズは Hayden-Preskill モデルとしても知られており素粒子物理の観点から注目を集めているが、量子情報の観点からはより一般のノイズに対する拡張が期待されていた。もう一つは量子情報分野でよく知られている Petz recovery map をより簡潔にしたデコーダである。Petz recovery map は既に一般のノイズに対して適用可能であるが、その計算量が大きいため、計算量を可能な限り抑えたより簡潔なデコーダの構成が求められていた。

本研究の主な成果は、以下の5点である。

- ・デコーダを一般化し、一般のノイズに適用可能なデコーダを構成した。
- ・Petz recovery map に着想を得た、より簡潔なデコーダを構成した。
- ・新デコーダそれぞれの復元エラーの上限を求め、任意のノイズに対して量子通信容量を達成可能なことを示した。
- ・新デコーダそれぞれの回路計算量を評価した。
- ・新デコーダに必要な計算量と Petz recovery map の既存の計算量を比較し、前者の計算量が後者の計算量より小さくなる条件を明らかにした。

References

- [1] Mark M. Wilde, “From Classical to Quantum Shannon Theory”, arXiv: 1106.1445 (2011).
- [2] B. Yoshida, A. Kitaev, “Efficient decoding for the Hayden-Preskill protocol”, arXiv: 1710.03363 (2017).
- [3] A. Gilyén, et al. “Quantum algorithm for Petz recovery channels and pretty good measurements”, Phys. Rev. Lett. 128.22 (2022): 220502.

異方的三角格子反強磁性 $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ における熱伝導率測定による1次元スピノン励起の観測

量子凝縮物性研究室 大塚健一

Abstract To investigate whether one-dimensional spinon excitations survive at a low energy scale, we performed thermal conductivity experiments on anisotropic triangular lattice antiferromagnet $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$. We found thermal conductivity divided by temperature in the paramagnetic state has a finite intercept at $T = 0$ K, suggesting the presence of one-dimensional spinon excitations.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

フラストレート磁性体は絶対零度までスピンの凍結しない量子スピン液体の候補として精力的に研究されている。異方的三角格子は2種類の相互作用 J, J' ($J > J'$) をもつ三角格子であり、 $J'/J < 0.7$ ではフラストレートの効果により2次元から1次元へのクロスオーバーが生じることが予想されており、2次元格子であるにもかかわらずスピン1/2ハイゼンベルク鎖特有のスピノン励起が現れる。異方的三角格子反強磁性体の代表例として Cs_2CuCl_4 が知られており、中性子散乱実験[1]によって1次元スピノン励起に特有な連続体励起が観測されている。しかしながら、 Cs_2CuCl_4 は磁気秩序化する温度 T_N に対して相互作用 J' の値が小さく、狭い温度領域でしか1次元の物理現象が探索できないという欠点があった。

最近発見された異方的三角格子反強磁性体 $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ は Cs_2CuCl_4 よりも T_N に対する J' の値が大きく、広い温度領域での1次元の物理現象の探索が可能である。 $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ における中性子散乱実験[2]や比熱測定[3]で1次元スピノン励起特有の現象が観測されている。しかしながら、これまでの実験では低温かつ低エネルギー領域まで1次元スピノン励起が存続しているかどうかは不明のままであった。

本研究では方向性をもったバルクプローブである熱伝導率測定を $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ に対して行った。鎖内方向であるb軸と鎖間方向であるc軸方向のそれぞれ熱流方向の熱伝導率測定を行った結果、b軸方向では磁気秩序化する温度 T_N で折れ曲がりが見られ、常磁性領域での温度依存性を0K外挿したところ有限の値をとることが明らかとなった。一方、c軸方向ではこのような振る舞いは観測されなかったことから、1次元スピノンがb軸方向に熱輸送していることを示唆している。また、磁場の印加によってb軸方向の熱伝導率が減少することから、1次元スピノン励起に由来する熱伝導が抑制されることが明らかとなった。これらの結果は1次元スピノンが低温かつ低エネルギー領域でも存続していることの証拠であり、 $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ において2次元から1次元へのクロスオーバーがフラストレートによって誘起されていることを示している。

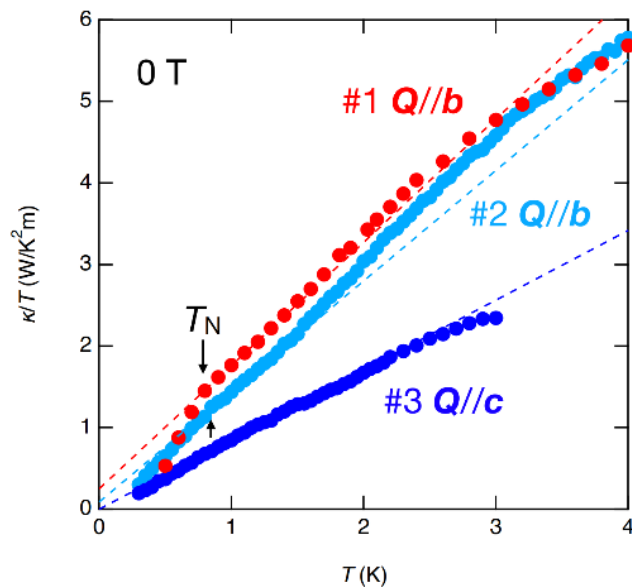


Fig. 1: Temperature dependence of the thermal conductivity of $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$.

References

- [1] R. Coldea *et al.*, Physical review letters, **86**(7):1335, (2001).
- [2] K. Nawa *et al.*, Physical Review Research, **2**(4):043121, (2020).
- [3] D. Hirai *et al.*, journal of the physical society of japan, **88**(4):044708, (2019)

Kitaev 量子スピン液体候補 α - RuCl_3 単層膜における 特異な状態密度振動の原子分解能解像

量子凝縮物性研究室 大間知秀祐

Abstract We report the results of scanning tunneling spectroscopy measurements on monolayer α - RuCl_3 , a promising Kitaev quantum spin liquid candidate. We discover decaying spatial oscillations around point defects with a characteristic bias dependence. The oscillation is distinct from any known spatial modulations and may therefore be an unusual phenomenon.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

強い量子揺らぎの影響で絶対零度においても磁気秩序を持たない量子スピン液体は、量子磁性体の新しい状態として注目を集めている。A. Kitaev が考案した 2 次元ハニカム格子に $S=1/2$ が並ぶ Kitaev 模型では、基底状態が厳密に量子スピン液体を実現し、スピンの分数化して Majorana 粒子になる [1]。Majorana 粒子は外乱の影響を受けにくいことから、ノイズに強いトポロジカル量子計算の基本要素として期待されている。Mott 絶縁体 α - RuCl_3 は熱 Hall 伝導度などのバルク測定において Kitaev 量子スピン液体物質であることを示唆する結果が得られているが [2]、量子計算への応用のためには実空間分解能を有する方法で Majorana 粒子を検出・制御することが必要である。

我々はパルスレーザー堆積法を用いて作製した α - RuCl_3 単層膜を、極低温走査型トンネル顕微鏡によって測定した結果、膜上に点欠陥が存在し、そこから減衰する局所状態密度の空間的振動を観測した (Fig. 1-A)。この振動の波数は正負バイアスで異なるが、正負バイアスそれぞれで分散を持たないという特徴を持ち (Fig. 1-B)、電荷密度波や準粒子干渉などの従来の現象では説明がつかない。異なる Mott 絶縁体やその他の絶縁体または単層膜において同様の振動の報告例はなく、 α - RuCl_3 単層膜に固有の特異な現象であると考えられる。また、振動は Néel 温度以上の 8 K でも観測されたことからジグザグ反強磁性秩序とは無関係であり、この結果は振動が Kitaev 相互作用に由来することを支持する。我々が欠陥周りで観測した振動は、Kitaev 模型下での Majorana 粒子によるものであると推測している。

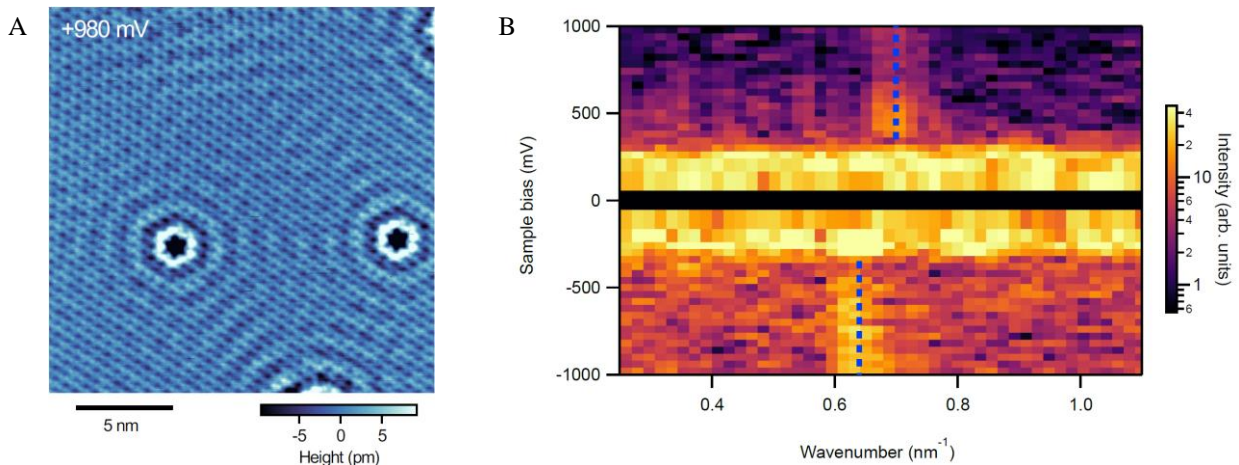


Fig. 1: (A) A topographic image of an α - RuCl_3 monolayer film taken at +980 mV and 0.1 nA (T = 5 K).

(B) The amplitude of Fourier transforms of the normalized conductance maps. Blue dotted lines indicate the wavenumbers of the oscillation.

References

- [1] A. Kitaev, *Annals of Physics*, **321**(1), 2–111 (2006).
- [2] Y. Kasahara *et al.*, *Nature*, **559**(7713), 227–231 (2018).

一粒子トラッキングによるせん断速度測定法の開発

時空間秩序・生命物理研究室 尾形正太郎

Abstract We measured shear velocity around a micro-swimmer through tracking a particle which has an eccentric fluorescently bright point, so called OCULI particle. We measured the particle's velocity and the rotation speed of the particle along shear flow, and examined the correspondence between the two. In addition, we estimated the strength of shear velocity around *Tetrahymena* by using the relationship above mentioned.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ミクロな水中は低レイノルズ数の世界であり、そこで生きる微生物はストークス方程式に支配されている。移動や転向に使う推進力やトルクは流体との相互作用によって得ており、運動の特徴は細胞近傍の流体や場合によっては細胞内の流体の運動に反映される。そこに現れる渦や剪断流など流体中に生じる速度差の測定は、散逸の見積もりや遊泳の特徴付けなどにとって重要である。微生物が泳いだときの周囲の流体の振る舞いに関しては、高密度にプローブ微粒子を分散させた媒質を用意し、その複数の粒子の変位から流体の変位を算出する粒子画像流速測定法などの測定が代表的な実験手法として用いられている。しかし、細胞内などの微小領域や、遊泳微生物の遊泳装置の傍など、遊泳にとって興味深い領域の測定となると、せん断の大きさに対して粒子密度や数が足りなくなる為に測定は困難になってくる。この問題を解決する足掛かりとして、回転を直接検出できるコロイド粒子の利用を試みた。

球の中心とは異なる場所に蛍光の発光点を持つ粒子は、粒子の並進運動と回転運動の両方の情報が乗った形で発光点の並進運動が観察される。最初に、せん断速度の直接測定プローブとして利用可能かどうか、ハーゲン・ポアズイユ流れの中で粒子の測定を行った。内部寸法で厚さ $200\ \mu\text{m}$ の直方体形状の流路に矩形波で圧力を印加し、流路の中を流れる粒子の発光点の並進運動と蛍光強度を追跡し、それらを流路内の高さを変えて取得した。流体をせん断応力と流速の差が比例関係にあるニュートン流体を仮定し、粒子の平均の並進速度の微分と流れに沿った回転速度を測定したうえで両者の間の対応関係を検討した。その後実際に遊泳する微生物での測定例として繊毛虫テトラヒメナを用い、テトラヒメナの周りに目玉粒子を分散させた上でその回転を測定した。上で求めた速度差と回転速度の校正関係を利用することで、テトラヒメナのごく近辺に生じた剪断応力の強さの算出を試みる。

孤立した一粒子でのせん断速度や回転の測定が可能になれば、微小領域の複雑な流れの測定手法の発展に大きく貢献する事が期待できる。

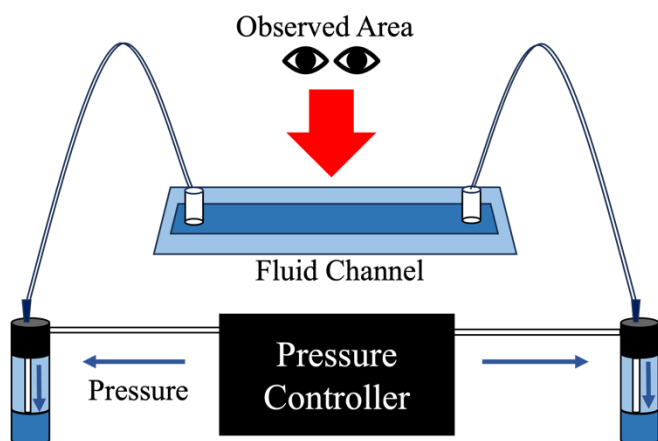


図 1 実験の概略図

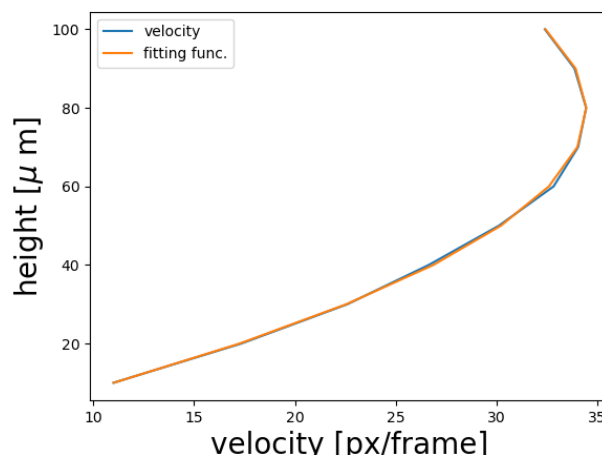


図 2 高さごとの平均流速とそのフィッティング
(1 pixel = $0.109\ \mu\text{m}$, 50 fps, 30px/frame = $163.5\ \mu\text{m/s}$)

アガロース高分子ネットワークとコロイド粒子の動的結合

ソフトマター物理学研究室 小野基紀

Abstract Dynamic coupling between the Brownian motion of colloidal particles and agarose sols and gels was studied using DLS. The motion of colloidal particles in agarose solutions was slower than that in water. The diffusion of colloidal particles was found to slow down as the concentration of agarose increased.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

アガロースは寒天の主成分の高分子で、水溶液中ではポリマー間の水素結合によりクラスターを生成し、クラスターは水溶液中で拡散運動をしている。さらに高濃度では 30°C 程度まで冷却するとクラスターがパーコレートしてゾル-ゲル転移する。本研究では、アガロース水溶液に球状のコロイド粒子(シリカナノ粒子、直径 50nm)を混合し、アガロース高分子のクラスターの拡散運動とコロイド粒子のブラウン運動との動的結合を動的散乱(DLS: Dynamic Light Scattering)により研究した。

まず、アガロース溶液(0.05wt%:ゾル状態)とコロイド溶液の DLS 測定をそれぞれ 30°C で行い、Fig. 1 に示すように、いずれも単一緩和を示す協同運動が存在することを確認した(それぞれ青●と黒●)。また散乱角を変化させた Fig. 2 の分散関係測定(青×と黒●)に示されるようにそれぞれの協同運動は拡散的な運動であることが示され、それぞれコロイド粒子のブラウン運動と、アガロースのクラスターの拡散運動に対応すると理解できる。アガロースはコロイド粒子より 100 倍程度大きなクラスターを生成しており、コロイド粒子の半径と比較すると数ミクロン程度のクラスターであることが推測される。

次に、混合溶液におけるコロイド粒子濃度依存性の測定を行った。コロイドが低濃度(<0.2wt%)の領域では、2 段階緩和として 2 つの緩和が観測され(Fig. 1 緑●)、Fig. 2 の分散関係測定に示されるように、2 つの運動は共に拡散的な運動であった。観測された速い緩和時間(緑●)は純粋なコロイド粒子溶液で観測された緩和時間(黒●)に、遅い緩和時間(緑×)は純粋なアガロース溶液で観測された緩和時間(青×)に近い。一方、高濃度(>0.2wt%)の領域では、単一緩和が観測され(Fig. 1 赤●)、Fig. 2 の分散関係測定から、その緩和時間は純粋なコロイド粒子溶液に近いが、アガロースの混合に伴い減速することが分かった。

これは、アガロースネットワークの存在により、コロイド粒子がアガロースネットワークを巻き込んで運動するためと考える。

最後に、コロイド粒子濃度を 0.5wt% で固定して、アガロース濃度依存性を 0.05wt%~1wt% まで変えて測定を行った(Fig. 3)。速い緩和時間として観測されるコロイド粒子の拡散は、アガロース濃度の増加に伴い減速し、アガロース濃度 1.0% では拡散係数が 1/3 となることが分かった。アガロース濃度の増加に伴い、コロイド粒子の運動がアガロースネットワークにより強く制限されていることが分かった。

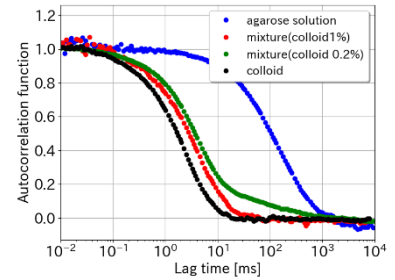


Figure 1 Autocorrelation functions from DLS.

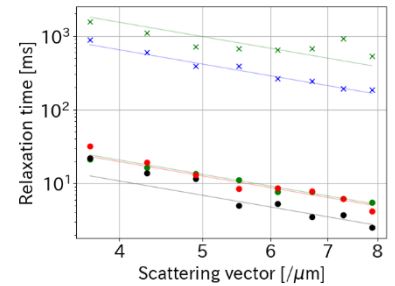


Figure 2 Wavenumber dependence of relaxation time.

×···agarose solution
×···mixture(colloid0.2%) : slow
●···mixture(colloid0.2%) : fast
●···mixture(colloid1%) : fast

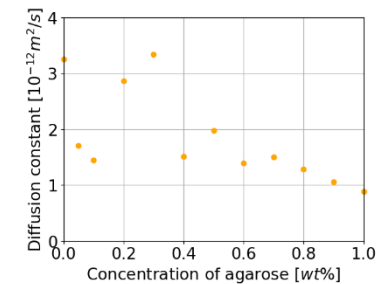


Figure 3 Agarose concentration dependence of the diffusion constant of colloidal particles in an agarose solution. When there were multiple relaxation modes, the faster, diffusive mode was selected.

UV レーザー干渉縞による分子マニピュレーション

ソフトマター物理学研究室 谷知晃

Abstract We performed molecular manipulation in a liquid crystal by illuminating the sample with an interference pattern of UV laser light. The stripe spacing was made significantly narrower ($\lambda=18\mu\text{m}$) than in previous work ($\lambda=60\mu\text{m}$), allowing for higher resolution manipulation. This improvement was largely due to significant modifications to the optical system and a thinner sample cell

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ネマチック液晶にアゾ化合物をドーブし、Trans-Cis異性化を誘起する励起光のパターン照射により、液晶の配向秩序度の空間分布制御し、不純物濃度の空間分布を制御する分子マニピュレーションが発明された[1]。最近、当研究室ではUVレーザー干渉縞を用いたストライプ型のマニピュレーションが実現されたが、縞間隔を狭められないことが問題であった[2]。本研究では光学系の改良とともに、セル厚を薄くすることで干渉縞によるマニピュレーションと、その高解像度化を実現した。

試料はE44とT15の混合物(ネマチック液晶)、メタクリル酸11-[4-(4-ブチルフェニアゾ)フェノキシ]ウンデシル(Azo:アゾ化合物)、ADS12PQT(PQT:蛍光高分子)を混合したものである。試料は水平配向処理を行ったガラスセルの中に封入した。UVレーザーには325nmのHe-Cdレーザー光を用いた。UV光照射前後のPQTの蛍光輝度を冷却CCDカメラで撮影し、PQTの濃度分布変化を観測した。液晶セルの厚さは従来の1/4の $5\mu\text{m}$ とした。干渉縞を生成する光学系部分は可変な縞間隔を実現するために、マッハ・ツェンダー干渉計を参考に改良した(Fig. 1)。これにより縞間隔、数 μm から $100\mu\text{m}$ 程度の安定な干渉縞を生成することができた

Fig. 2はAzo 2.8wt%、PQT 0.08wt%の試料を、温度 105°C で干渉縞(縞間隔 $18\mu\text{m}$)を5分照射後の蛍光輝度変化画像である(撮影範囲は約 $120\mu\text{m}$ 四方)。Fig. 3にストライプに垂直な方向に蛍光輝度(緑線)と周期変化を干渉縞間隔の周期関数でフィッティングした結果(紫線)で示した。セル厚を薄くしたことによって撮影前後の蛍光ノイズが低減され、蛍光輝度画像がより明瞭になった。蛍光輝度変化はUVレーザー干渉縞に一致しており、レーザー干渉縞による高解像な分子マニピュレーションの実現を確認した。

References

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

[2]高富士愛子, 修士論文(2022)

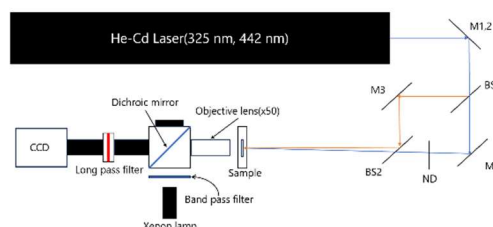


Figure 1 Improved interference device

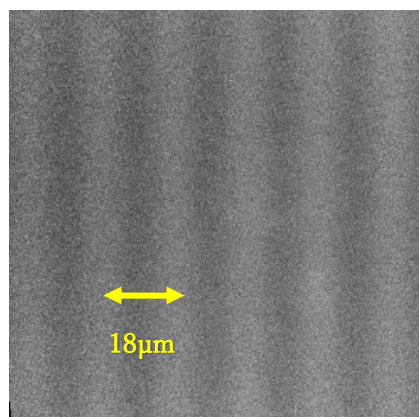


Figure 2 Normalized fluorescence intensity image.

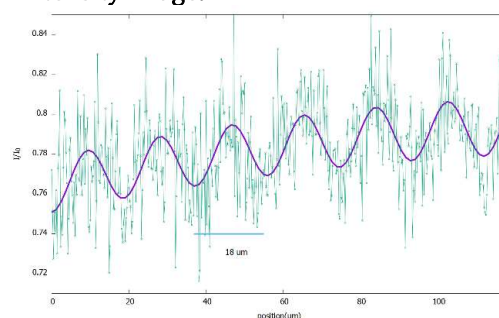


Figure 3 Normalized fluorescence intensity (green) and fitting curve (purple).

液晶エマルションの磁気誘起複屈折

ソフトマター物理学研究室 松村大毅

Abstract Liquid crystal emulsions are microscopically anisotropic due to the internal director alignment of individual droplets, but macroscopically isotropic due to their random orientation. We placed the emulsion in a magnetic field and succeeded in realizing a macroscopically anisotropic optical response. Their birefringence was found to depend on magnetic field strength.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

液晶分子は疎水性のため、水に液晶分子を分散させると液滴状に相分離する。液晶エマルションとは、界面活性剤により、水中に液晶液滴を安定に分散させたものであり[1]、液滴一つ一つは有限のネマティック配向秩序を有し、異方性を持つにもかかわらず、水中で液晶液滴の異方軸の方向がランダムとなるため、巨視的には等方性を示す。液晶エマルションに、電場や磁場をかけると、液滴内部の液晶分子はトルクを受け、液滴の異方軸の方向が磁場や電場方向にそろい、マクロな異方性を示すことが期待できる。本研究では、単分散な液晶エマルションを作成し、磁気誘起複屈折を発現させることを試みた。

液晶エマルションの作成には、Ouzo 効果を利用した。これは、アセトンのような水によく溶ける溶媒に疎水性の溶質を分散させたのち、多量の水を加えると、溶媒が水に溶けるために疎水性物質が水中に孤立し、単分散な液滴を形成するという現象である[2]。本研究では、水、アセトン（水に対し 1wt%）、低分子液晶 7cb と界面活性剤 PEO-PCNEPMA（合計で水に対し 0.01wt%）を混合して溶液を作成した。液滴の流体力学的半径と単分散性は動的光散乱法で測定した。得られた自己相関関数を拡張型の指数関数でフィッティングしたところ、ストレッチインデックスは 0.9 程度と 1 に近く、液晶エマルションの単分散性が確認できた。

最大で 600mT の磁場を発生できる電磁石の磁極間に、温度制御可能な試料ホルダーを設置し、液晶エマルション水溶液を封入した光路長 10mm の光学セルを配置した (Fig. 1)。磁気誘起複屈折を観測するため、偏光子により入射光の偏光方向を磁場と 45° に設定し、もう 1 枚の偏光子をクロスニコルとなる配置に設置して、光電子増倍管により磁場 On/Off に対する透過光強度の変化をデジタルオシロで観察した。磁場 On に対する磁気複屈折の時間変化の磁場依存性の測定例（液晶エマルション半径 640nm, 0.01wt%, 温度 35°C）を Fig. 2 に示す。磁場印加に対する応答時間は 1 秒程度であることが分かった。また磁場 On 後に十分な時間が経った後の光強度は、磁場強度の増加とともに大きくなる様子が観測された (Fig. 3)。これは液晶エマルション中の配向秩序が持つ磁気異方性に起因して、液晶エマルションを磁場方向に配向させようとする回転トルクと、配向をランダム化する回転ブラウン運動が拮抗していると理解できる。

References

- [1] Shinji Bono *et al.*, *Europhys. Lett.* **109**, 26004 (2015).
- [2] Elise Lepeltier *et al.*, *Adv. Drug Deliv. Rev.* **71**, 86 (2014).

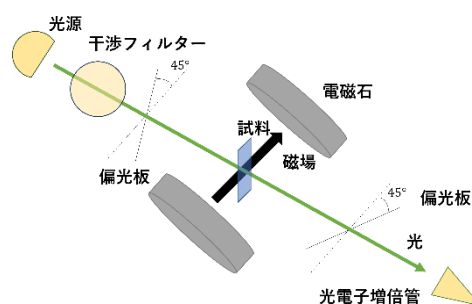


Fig. 1. Schematic representation of the experiment.

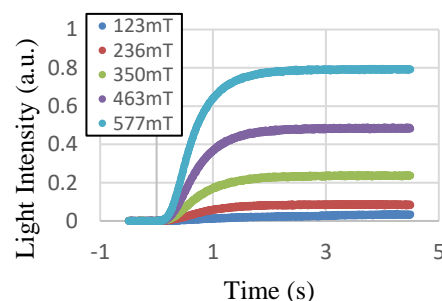


Fig. 2. Change of light intensity against time when the magnetic field was turned on at $t = 0$. Different colors represent different field strength.

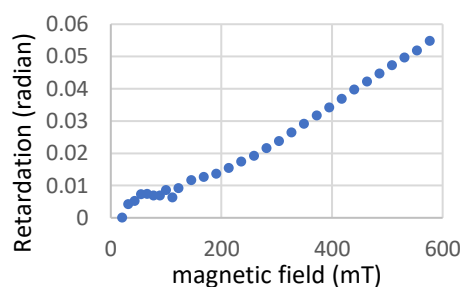


Fig. 3. Retardation against magnetic field strength.

確率的秩序変数ダイナミクスにおける エントロピー力の紫外発散

統計物理・動力学分科 角祐太郎

Abstract The stationary propagation velocity of a $(d-1)$ -dimensional planer interface in d -dimensional space is studied by analyzing mesoscopic non-conserved order parameter dynamics with two local minima under the influence of thermal noise. It is found that the velocity singularly depends on an ultraviolet cut-off when $d \geq 2$.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

異なる相が平坦な界面を通じ接触しているとき、一般に界面はある方向に運動する。その定常速度は、二相の自由エネルギー差による駆動力と易動度で決まる。この現象を秩序パラメタ場に対する決定論的力学系で記述するとき、モデルのポテンシャルが自由エネルギーに対応する。すなわち、二つのポテンシャル極小状態におけるポテンシャル値が等しいとき、界面は運動しない。この系にノイズが加わると、自由エネルギーにノイズに由来するエントロピーの寄与が加わる。その結果、界面は運動する [1]。このように、エントロピーの寄与により駆動される界面をエントロピー駆動界面と呼ぶ。

本修士論文では、 d 次元空間で定義される場に対する $(d-1)$ 次元平坦界面がエントロピー駆動される場合の定常速度を問題にする [2]。具体的には、 d 次元空間で秩序パラメタ場 $\varphi(\mathbf{r}, t)$ 、ミクロなカットオフ長 $2\pi/k_c$ を定義し、ポテンシャル密度 $f(\varphi)$ 、易動度 Γ 、界面エネルギーの定数 κ 、温度 T とし、

$$\partial_t \varphi = -\Gamma[f'(\varphi) - \kappa \Delta \varphi] + \eta$$

により時間発展が記述される系を考える。 Δ は d 次元のラプラシアンである。ガウスホワイトノイズ $\eta(\mathbf{r}, t)$ は揺動散逸関係

$$\langle \eta(\mathbf{r}, t) \eta(\mathbf{r}', t') \rangle = 2\Gamma T \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t')$$

を満たす。

このモデルに対して、界面の定常速度の公式を新たな方法で導出する。特に、先行研究で得られていた $d=1$ の場合 [1]と先行研究の方法では導出できていない $d \geq 2$ の場合に対し、統一的に定式化する。新たに得た $d \geq 2$ に対する公式によると、定常速度は k_c に依存し、 $k_c \rightarrow \infty$ の極限で発散する。つまり、このメソスケールの系はよりミクロな階層と分離できないことを意味する。さらに、 $d=2$ のモデルの数値計算を行ない、定常速度が数値計算の格子間隔に特異的に依存することを確認する。Fig. 1 では、界面の定常速度 c の格子間隔 Δx 依存性について、数値計算結果と理論的結果を示している。両者はよく一致することが分かる。

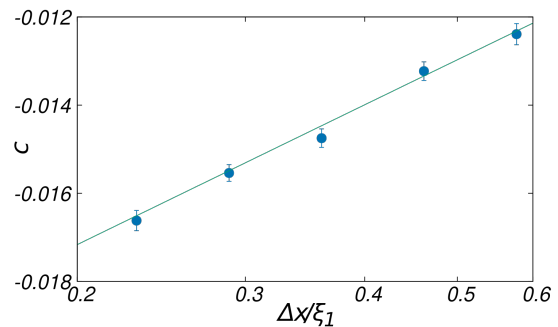


Fig. 1 Δx -dependence of c in two dimensions. ξ_1 is the correlation length of fluctuations in the bulk region. The symbols show the result of numerical simulations. The solid line represents the theoretical result.

Reference

[1] G. Costantini and F. Marchesoni, Phys. Rev. Lett. 87, 114102 (2001).

[2] Y. Kado and S.-i. Sasa, arXiv:2304.03554. [Phys. Rev. Lett.に掲載決定]

超純良 UTe_2 単結晶における スピン三重項超伝導状態のギャップ構造

量子凝縮物性研究室 神村真志

Abstract We measure the thermal conductivity of ultra-clean UTe_2 single crystals to determine the superconducting gap structure. Contrary to previous reports, we find the absence of nodes around a -axis. Combined with the reduction of nuclear magnetic resonance Knight shift, these results indicate the superconducting symmetry is the fully gapped A_u symmetry.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

スピン三重項超伝導体は Majorana フェルミオンが出現するトポロジカル超伝導が実現するための理想的な環境であり、トポロジカル量子計算への応用などから強い関心を集めている。その有望な候補物質が 2018 年に超伝導が発見された重い電子系超伝導体 UTe_2 であり [1], Pauli 極限を大きく超える上部臨界磁場やリエントラント超伝導などからスピン三重項超伝導体であることが支持されている。URhGe や UCoGe などの強磁性超伝導体と異なり常磁性の UTe_2 は転移温度が高く常圧下で超伝導状態となるため、様々な実験手法により超伝導の性質を調べられる格好の物質である。

しかし、超伝導発現機構や超伝導状態のトポロジカルな性質を理解する鍵となるギャップ構造は未だ明らかになっていない。比熱や Kerr 効果測定からは時間反転対称性の破れについて相反する結果が報告されている [2]。また、複数の実験からポイントノードの存在が示唆されているが、その位置は報告によって様々であり議論が続いている。熱伝導率 [3] など複数の実験から対称性が B_{3u} である可能性が主に議論されてきたが、異方的超伝導体では低エネルギー準粒子励起が不純物の影響を強く受けるため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、純度の高い試料では転移温度が高く、比熱の 2 段階転移が消失し残留比熱が激減しているため、ギャップ構造の決定には試料純度が高いこと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る極めて純度が高い単結晶が作製されたことで [4], UTe_2 の本質的な性質が明らかになることが期待されている。本研究では超伝導ギャップ構造を調べるため、高純度試料に対しバルクプローブである熱伝導率測定を行った。その結果、磁場が a, c 軸方向の場合の a 軸方向の残留熱伝導率は、低磁場領域では常伝導状態の残留熱伝導率の 1% 以下であり他のウラン系超伝導体に比べて非常に小さいことが分かった (右上図)。これにより超伝導ギャップが a 軸方向及びその周辺にノードを持たないことが明らかになり、これまで支持されてきた B_{3u} 対称性が排除された。核磁気共鳴 Knight シフトの結果 [5] と合わせると、対称性はフルギャップの A_u であると結論付けられ、これは超流動 3He の B 相に相当する超伝導状態である。 UTe_2 の超伝導対称性が A_u であることを考慮すると、Fermi 面が 3 次元構造を持つ場合は 3 次元巻き付き数をトポロジカル不変量として持つ強い 3 次元トポロジカル超伝導体となり、全ての表面にヘリカルな Majorana 表面状態が現れることが期待される。

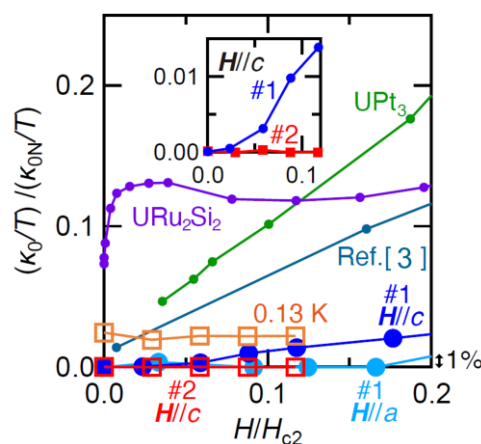


Fig. 1. Field dependence of residual thermal conductivity.

References

- [1] S. Ran *et al.*, *Science* **365**, 684 (2019)
- [2] D. Aoki *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **34**, 243002 (2022).
- [3] T. Metz *et al.*, *Phys. Rev. B* **100**, 220504 (2019).
- [4] D. Aoki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 083704 (2022).
- [5] H. Fujibayashi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 043705 (2022).

近藤超格子における非相反輸送測定による ヘリカル超伝導相の観測

量子凝縮物性研究室 小菅優揮

Abstract We measured nonreciprocal electrical transport on tricolor superlattices, 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.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、非従来型の超伝導体として、クーパー対が有限の重心運動量を持つ超伝導体が注目を集めている[1]。しかし、このような超伝導相の存在を実証するような実験結果は未だ挙がっていない。

そのような状況の中、この有限の重心運動量を持つ超伝導体の一種であるヘリカル超伝導相の発現を観測できる実験手法として、非相反輸送測定という手法が理論分野で提案された[2]。実際に空間反転対称性を破った s 波超伝導体において非相反輸送の測定が行われたが、ヘリカル超伝導相由来の信号とその他の由来の信号の分離が難しいなどの問題があり、現在に至るまでヘリカル超伝導相の発現を示す決定的な実験結果は報告されていない。そこで我々は、重い電子系の s 波超伝導体 CeCoIn_5 と、その他に二種類の金属を用いて空間反転対称性を破っ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、様々な物性の測定結果から、低温高磁場においてヘリカル超伝導相の可能性のある新たな超伝導相の存在が報告されている物質である[3]。

そこで今回我々はヘリカル超伝導を観測することを目的として、三色超格子における非相反輸送測定を行った。その結果、低温高磁場において電気抵抗の非相反成分 $R_{2\omega}$ が観測され、さらに $R_{2\omega}$ が磁場方向に対して異方性を示すことを発見した。先行研究で見られるような渦糸による非相反輸送ではこのような異方性を説明できず、磁場を面内から傾けた際に信号がほぼ変化しないことからマイスナー遮蔽効果による寄与も否定されるため、この信号は有限重心運動量対による寄与だと考えられる。有限重心運動量対を持つ状態として、ヘリカル超伝導相の他に FFLO 状態が挙げられるが、三色超格子では Rashba 効果によってもたらされるエネルギー利得 α_R が、FFLO 状態の起源となるゼーマン効果によるエネルギー利得 $\mu_B H$ を大きく上回るため、三色超格子では FFLO 状態ではなくヘリカル超伝導相が発現する可能性が高いと考えられる。

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。

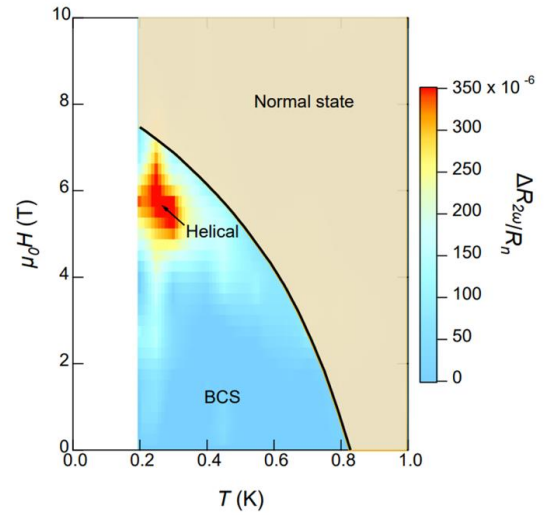


Fig.1: H - T Phase diagram of the difference of nonreciprocal transport $\Delta R_{2\omega}$ and superconducting

References

- [1] E. Bauer and M. Sigrist, *Non-Centrosymmetric Superconductors*, Lecture Notes in Physics, 2012.
- [2] N. F. Q. Yuan, L. Fu, PNAS **119**, 15 (2022).
- [3] M. Naritsuka *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 174512 (2017).

擬似ランダム量子状態に基づく量子暗号の安全性

物性基礎論：量子情報研究室 白川雄貴

Abstract Pseudorandom quantum states generators (PRSGs) are efficient quantum algorithms that output quantum states which are computationally indistinguishable from Haar random states. We clarify the computational assumptions necessary for the existence of PRSGs and PRSG-based cryptographic primitives in terms of the relationships between the computational complexity classes.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

暗号における安全性の概念は、おもに情報理論的安全性と計算量的安全性の2種類に分けられる。情報理論的安全性は計算能力が無制限の攻撃者に対しても安全であるという利点を持つが、この安全性を達成可能な例は限られたものしか知られていない。一方で、計算量的安全性は多項式時間の振る舞いをする攻撃者に対する安全性であり、強度の点で情報理論的安全性に劣るものの、公開鍵暗号をはじめとする多くの実用的な暗号機能が構成できる。RSA暗号が素因数分解の難しさを仮定した上で安全であるように計算量的安全な暗号には何らかの仮定が必要となる。そのため、どれだけ信頼度の高い仮定から暗号機能を構成できるかが重要な問題である。古典暗号においては最も基礎的な仮定として一方向性関数が知られているが、量子暗号の場合は擬似ランダム量子状態と呼ばれる暗号機能が一方向性関数なしでも存在できる可能性が示唆され[1]、暗号における量子優位性として注目されている。

擬似ランダム量子状態生成器 (PRSG) [2] とは一様ランダムにサンプリングされた量子状態と多項式時間で区別出来ない量子状態を効率的に生成するアルゴリズムである。また、一方向性関数を量子アルゴリズムへと一般化した一方向性量子状態生成器 (OWSG) [3] や秘密にしたいメッセージを暗号化する手法の1つである古典通信量子擬ワンタイム・パッド (ccQPOTP) [4] などの暗号機能は PRSG から構成できることが知られている。

本研究では、これらの暗号機能の安全性の程度をよく知られた計算量クラスとの関係という観点から明らかにした。特に、1. qubit 数の小さい量子状態を出力する PRSG、2. 異なる鍵から生成される状態間の距離が遠くなる性質を持つ特殊な OWSG、3. ccQPOTP、に着目してそれぞれ以下の結果を得た：

1. $n(\lambda) = O(\log \lambda)$ かつ $n(\lambda) \geq \log \lambda$ を満たす $n(\lambda)$ に対して $n(\lambda)$ -qubit 状態を出力する PRSG が存在するならば $BQP \neq QCMA$ が成立する。
2. $0 \leq c(\lambda) < 1 - 1/\text{poly}(\lambda)$ に対して、 c -injective OWSG が存在するならば $BQP \neq PP$ が成立する。
3. $M(\lambda)(> \lambda)$ -bit メッセージに対する ccQPOTP が存在するならば $BQP \neq QCMA$ が成立する。

References

- [1] W. Kretschmer, “Quantum pseudorandomness and classical complexity”, TQC 2021.
- [2] Z. Ji, Y-K. Liu, and F. Song, “Pseudorandom quantum states”, CRYPTO 2018.
- [3] T. Morimae, and T. Yamakawa, “Quantum Commitments and Signatures Without One-Way Functions”, CRYPTO 2022.
- [4] P. Ananth, A. Gulati, L. Qian, and H. Yuen, “Pseudorandom (Function-Like) Quantum State Generators: New Definitions and Applications”, TCC2022.

カゴメ格子反強磁性体 $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ における磁化プラトー

量子凝縮物性研究室 立石将太郎

Abstract To investigate the ground state of the kagome antiferromagnet $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$, we have measured the magnetization process and the magnetic torque. We observed the 1/9 and 1/3 magnetization plateaus. We estimated that the spin gap of $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ was less than 1.4 K from linear magnetization curve near zero magnetic field. © 2024 Department of Physics, Kyoto University

フラストレート磁性体は、幾何学的に競合する磁気相互作用や量子揺らぎからエキゾチックな量子多体状態を持つ。その代表的な系である、量子スピン 1/2 カゴメハイゼンベルグ反強磁性体は、絶対零度においても磁気秩序のない量子スピン液体状態を持つことが期待されている。これまで2次元カゴメハイゼンベルグ反強磁性体の基底状態の性質について精力的な研究が行われてきたが、未解決の問題が数多くある。例えば、ゼロ磁場中の基底状態でのギャップの有無である[1]。また磁場中では、磁場誘起スピンギャップから生じる飽和磁化の 1/9、1/3、5/9、7/9 で磁化プラトーが出現することが予想されている。これらのプラトーは古典的スピンでは説明できない量子もつれ状態によるものであり、エキゾチックな状態であることが期待されているが、基底状態についてはまだ明らかとなっていない。1/9 磁化プラトーに関してはその存在すらはっきりとわかっていない。

カゴメ反強磁性体の基底状態を明らかにするためには、ゼロ磁場でのギャップの有無や磁化プラトーを実験で観測する必要がある。しかしながら、これまでカゴメ格子に歪みを持たず、低温で磁気秩序しないカゴメ反強磁性体はあまり見つかっていない。最も有望な候補物質の $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ でさえも、Zn と Cu のサイト間の乱れによって、その基底状態ははっきりとわかってこなかった。

最近発見された $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ (YCOB) は歪みのない Cu^{2+} のカゴメ格子を持ち、60~80K の反強磁性相互作用 J に対して、50 mK まで磁気秩序が観測されていない。さらに、 $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ のようなサイト間の乱れを持たないため、カゴメ反強磁性体の基底状態を調べるのに理想的な舞台となっている。

以上の背景から、本研究では、YCOB のパルス磁場による 57 T までの磁化過程と、低磁場の磁気トルクを測定した。50 T 以上では、 Cu^{2+} イオンの飽和モーメントの 1/3 で明確な磁化プラトーが観測され、YCOB が理想的なカゴメ反強磁性体に近いことが明らかとなった。さらに 20 T 付近では 1/3 プラトーの約 1/3 の磁化を持つ 1/9 磁化プラトーを発見した。これらのプラトー領域での磁化曲線が、1.6 K 以下で温度に依存しないことから、スピンギャップの存在が明らかとなり、その大きさはプラトー幅から約 15 K と見積もられた。以上の結果は、YCOB がカゴメハイゼンベルグ反強磁性体におけるエキゾチック量子相を探索するための理想的なプラットフォームであることを示している。

また YCOB の磁気トルク測定からは、磁化は 0.25 K において 0.5 T 以上では磁場に対して線形であることがわかった。これは、もしゼロ磁場においてギャップが存在するとしても、スピンギャップが 0.7 K 未満であることを示している。

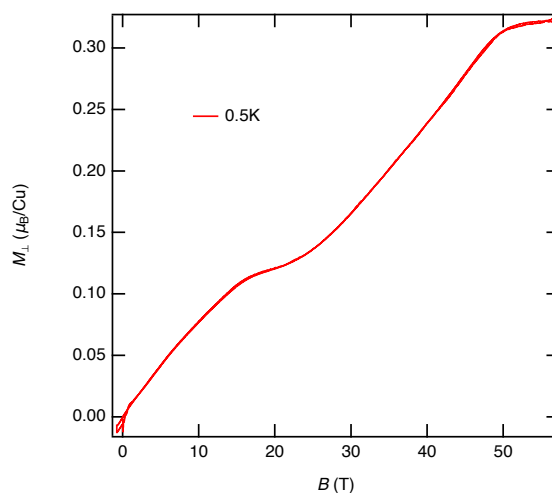


Fig. 1. Magnetization process of YCOB for $H||c$

References

- [1] S. Yan, D. A. Huse, and S. R. White, *Science* 332, 1173(2011).
- [2] T. Picot, M. Ziegler, R. Orús, and D. Poilblanc, *Phys.Rev. B* 93, 060407 (2016).
- [3] M. R. Norman, *Rev. Mod. Phys.* 88, 041002 (2016).
- [4] X.-H. Chen, Y.-X. Huang, Y. Pan, and J.-X. Mi, *J. Magn. Magn. Mater.* 512, 167066 (2020).

時空間分解発光分光による 混晶ハライドペロブスカイトの光誘起相分離の研究

光駆動固体物性研究室 大穀裕介

Abstract Using hyperspectral photoluminescence (PL) imaging techniques and PL lifetime measurements, we studied spatial and temporal dynamics of photoinduced phase separation in mixed halide perovskite thin films. By focusing continuous light on a spot and applying electric fields, we revealed that the phase separation originates from halide ion migration through defects.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ハロゲン化金属ペロブスカイトは高効率な光電変換材料として活発な研究が行われている[1]。その基本的な組成は ABX_3 [$A = Cs, CH_3NH_3$ (MA), $HC(NH_2)_2$ (FA), $B = Pb, Sn, X = I, Br, Cl$] で表され、各サイトに種類の異なる複数のイオンを用い、その混合比を変えることによってバンドギャップエネルギーを操作できる。なかでも X サイトに I と Br を用いた混晶ハライドペロブスカイトが積層型太陽電池のトップセル材料として期待されている[2]。しかし、混晶ハライド系に連続的に光を照射すると発光スペクトルが大きくレッドシフトすることが知られており[3]、実用上の課題となっている。この現象の原因としてハロゲンのイオン移動による I-rich 相と Br-rich 相の形成が議論されているが、そのメカニズムは未だに理解されてなく、その解明が応用上待ち望まれている。加えて、このような光誘起相分離は基礎光物理学の観点からも非常に興味深い現象である。

そこで本研究では、 $Cs_{0.15}FA_{0.85}PbI_2Br$ 薄膜の相分離過程における発光スペクトルを時空間分解発光分光により測定した。ガラス基板上に作製した試料に対して 2 W/cm^2 の励起光を局所的に 3 分間照射した後の発光エネルギーの空間分布を Fig. 1 に示す。照射前は発光エネルギーが 1.73 eV 程度の均一な分布を示したが、励起光照射後は空間分布に不均一性が生じ、スポット中心では 1.67 eV 程度まで発光エネルギーがレッドシフトした。さらに、金電極を蒸着したガラス基板上に試料を作製し、局所的な連続光照射と電圧の印加を同時に行い、発光スペクトルの時空間変化をハイパースペクトルイメージング分光により測定した。時間経過に伴って、発光強度が減少しつつ発光エネルギーがレッドシフトした領域が陽極側から励起光照射スポットに向かって移動する様子が観測された。同時に空間分解発光寿命測定も行うことで、その領域では発光寿命も減少することが確認された。この結果は、連続的な光照射がハロゲン欠陥を介したイオンの移動を誘起することを示している。また、発光スペクトルのレッドシフトと欠陥の増加が同時に起こることから、I-rich 相および Br-rich 相の形成は Br イオンの移動によるものであると結論した。以上の結果は、格子欠陥を介したイオン移動過程により光誘起相分離が起こることを明確にとらえたものであり、光誘起相分離の抑制やペロブスカイト太陽電池の長寿命化実現のヒントを与えるものである。

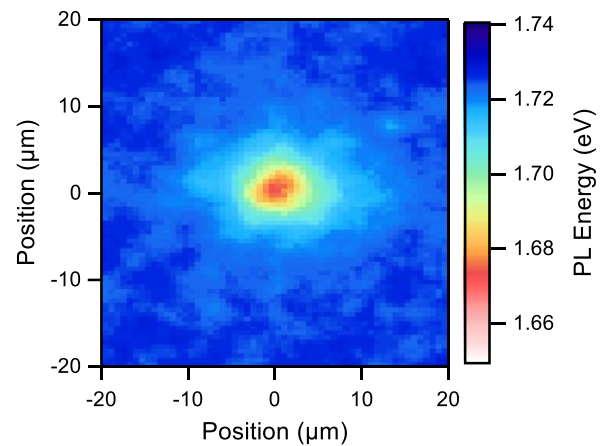


Fig.1. A spatial image of the PL energy in a mixed halide perovskite film after laser excitation. The vertical and horizontal axes show the distance from the center of the excitation laser spot. The beam spot diameter is $18\text{ }\mu\text{m}$.

References

- [1] Y. Kanemitsu, T. Handa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 090101 (2018).
- [2] C. D. Bailie, M. D. McGehee, *MRS. Bulletin.* **40**, 8, 681-686 (2015).
- [3] E. T. Hoke *et al.*, *Chem. Sci.* **6**, 613-617 (2015).

非線形量子干渉計を用いた広帯域もつれ光子対の研究

光物性研究室 廣田晴哉

Abstract Photon pairs generated by simultaneous spontaneous-parametric down-conversion process have been characterized for the future application to the quantum spectroscopy. We observed quantum interference of the pair with the nonlinear interferometer and confirmed that the spectrum of the idler is widely spread over the mid-infrared region. © 2024 Department of Physics, Kyoto University

光量子分光法は光の量子統計性を利用した分光法である。通常の古典的分光法では、ランプやレーザーなどの古典光で系を励起し、その後の透過、反射、吸収、光散乱などを計測する。これらのデータに半古典的近似の理論を適用することにより、物質の励起状態や素励起の情報を得ることができる。最近、励起光の量子統計性が生成される素励起の性質に強く反映されることが指摘された[1, 2]。このような現象は半古典的近似では完全な説明ができない。さらに、量子もつれ光子対の量子相関を用いた光量子分光法が提案され、その実証が行われている[3]。しかし、これらの手法に必要な量子もつれ光子対発生技術は発展途上であり、発生波長の選択性が高い量子もつれ光子対源の開発が求められている。我々の研究グループでは、同時自発的パラメトリック下方変換 (s-SPDC) 過程と呼ばれる、波長可変かつ広帯域量子もつれ光子対の発生手法を提案した[4]。s-SPDC は 2 つ以上の位相整合条件を同時に満たすことで 2 組の光子対を発生させるパラメトリック過程である。s-SPDC ではシグナル光 (近赤外光) とアイドラー光 (中赤外光) が周波数もつれを持って発生するため、生成されたもつれ光子対を光量子分光に用いることによって、物質の振動遷移と電子遷移の間の量子的な相関を取得できることが期待される。

本研究の目的は s-SPDC で発生した量子もつれ光子対源の評価を行うことである。本実験では周期分極反転 MgO 添加 LiTaO₃ (PPSLT) に 638nm の光を入射させたときに発生するシグナル光とアイドラー光のスペクトルを調べる。特に s-SPDC によって発生する中赤外光は強度が弱く半導体検出器や超伝導ナノワイヤーでは検出が困難であるため、中赤外光を直接検出せず中赤外光のスペクトルを取得する必要がある。この問題を解決するために本研究では s-SPDC に基づく非線形干渉計を構築した。非線形干渉計では、①ポンプ光を非線形光学結晶に入射させ s-SPDC により光子対 (シグナル光とアイドラー光) を発生させる、②結晶から出射されたポンプ光と光子対を結晶に再度入射させて①の光子対と重なるように光子対を発生させて、③シグナル光とアイドラー光を分離してシグナル光の光子計数を行う。計測されたシグナル光は①と②のいずれの光子対発生によるものかは区別できないことから、量子干渉が生じる。この過程は 3 つの光の位相に敏感であることから、①と②の間のアイドラー光に遅延時間を付与することにより、シグナル光の光子数が増減する量子干渉を遅延時間の関数として計測できる。この干渉をフーリエ変換することにより、アイドラー光 (中赤外光) のスペクトルが得られる。

図 1 は PPSLT 結晶の反転分極周期 17.1 μm 、結晶温度 25 $^{\circ}\text{C}$ のときに、観測するシグナル光の波長を変えることによって得られた、対応するアイドラー光のスペクトルである。s-SPDC で発生された 3.7 μm から 4.9 μm の中赤外光の発生を確認できた。この結果は s-SPDC 過程における光子対発生過程が量子的な性質を持つことを示唆する。発表では、そのメカニズムに関して議論する。

References

- [1] M. Kira and S. W. Koch, Phys. Rev. A **73**, 013813 (2006).
- [2] M. Kira *et al.*, Nature Phys **7**, 799 (2011).
- [3] K. E. Dorfman, F. Schlawin, and S. Mukamel, Rev. Mod. Phys. **88**, 045008 (2016).
- [4] M. Hojo and K. Tanaka, Sci. Rep. **11**, 17986 (2021).

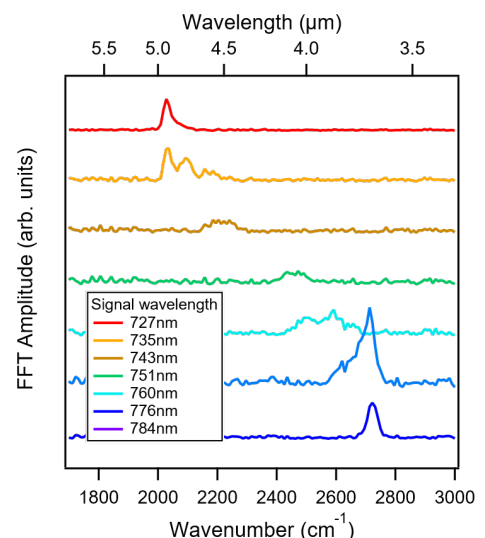


Fig.1. Idler spectra obtained from the nonlinear interferograms. The idler peak position is systematically obtained by observing the signal with corresponding wavelength.

共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器 における発振双安定性

光物性研究室 小嶋朋樹

Abstract We found an unstable oscillation state of the RTD oscillator biased in the bistable regime triggered by the fast bias voltage modulation. Characteristics of the transient oscillation are explained by considering the noise. This suggests that the stability of the RTD oscillator in the bistable region is dominated by noise.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

共鳴トンネルダイオード(RTD)発振器は、室温テラヘルツ(THz)光源の有力な候補であり、次世代通信など様々な分野での応用が期待されているデバイスである[1]。RTD 発振器は、RTD が微分負性抵抗を持つバイアス電圧範囲で発振することができるが、その発振範囲の両端において、バイアス電圧のスweep方向によって発振状態が異なるという双安定性が現れることが知られている[2]。この双安定性は、応用上重要であるバイアス電圧変調下の動作を不安定にする可能性がある。そこで本研究では、RTD 発振器の双安定領域における発振の安定性について調べた。

実験では、双安定領域にバイアスされた RTD 発振器のバイアス電圧に変調を加えることで発振状態を操作し、その後の過渡的な発振状態を評価した。その結果、低速に電圧をスweepした際には双安定性が確認されなかった領域においても、過渡的に発振状態が変化する現象が確認された。Fig. 1(a) に 1 μ s の間だけバイアス電圧変調を加えることで、一時的に発振させた際の出力を示す。変調終了後も ~ 700 μ s に渡って発振が持続している。この発振が持続する時間は、変調を加えるごとに毎回変化し、その分布は Fig. 2(b) に示すようにある寿命で減衰する指数関数に従っていることがわかった。さらに、この発振持続寿命は、バイアス電圧を変化させると指数関数的に変化するということがわかった (Fig.1(c))。同様の振る舞いは、一時的に発振を停止させるような変調を加えた際にも確認された。これらの振る舞いは、集中定数等価回路に基づいた理論とシミュレーションに、RTD 発振器内部の電氣的ノイズにより発振振幅が変化する効果を取り入れることにより説明することができた。これは、双安定領域における発振状態の安定性がノイズによって支配されていることを示唆する。

また、双安定領域にバイアスされた RTD 発振器に、外部から THz 光のパルスを注入することにより、発振状態を切り替えることも見出した。これは、THz 光パルスがノイズと同様に振幅を変化させる役割を担っていることを示唆する。

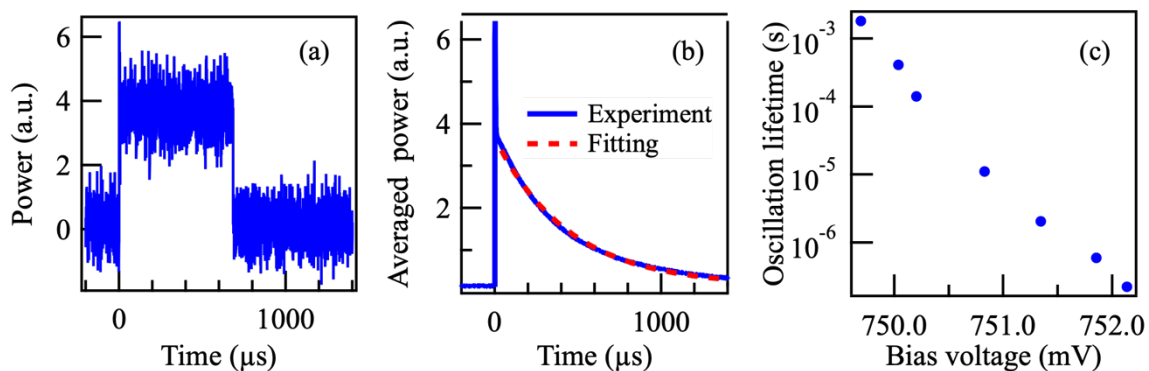


Fig. 1. (a) Single-shot measurement of the output power of the RTD oscillator induced by the bias voltage modulation. (b) Averaged output power of the RTD oscillator. (c) Bias voltage dependence of the oscillation lifetime.

References

- [1] M. Asada and S. Suzuki. Sensors. 21, 1384 (2021).
- [2] 有住徹弥 et al., 応用物理 32, 892 (1963).

二層系における内因的超伝導ダイオード効果

凝縮系理論研究室 中村恭平

Abstract The superconducting diode effect (SDE) is characterized by the nonreciprocity of the critical current. We study an orbital effect on the SDE in a bilayer system. We show that a small orbital effect leads to a crossover of the helical superconducting state at a lower magnetic field than the monolayer, and a large orbital effect induces a decoupling transition, resulting in the drastic change of the SDE.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、順方向と逆方向で応答が異なる非相反現象への関心が集まっている。特に、超伝導体における非相反現象である「超伝導ダイオード効果」は、Nb/V/Ta での観測[1]を契機に、爆発的に研究が加速した。超伝導ダイオード効果は、臨界電流の非相反性が現れる現象であり、順方向には超伝導電流、逆方向には常伝導電流が流れるという理想的な整流作用を実現できることから省電力デバイスへの応用が期待されている。また、物質の量子相が電流の方向によって制御されるというのは基礎的な側面からも注目に値する特徴である。

Nb/V/Ta では、臨界電流の非相反性が磁場に対して振動することが実験的に観測されているが[2]、内因的機構に基づく理論研究によってこの特徴的な振動現象が再現された[3]。また、超伝導ダイオード効果とクーパー対が有限の重心運動量をもつヘリカル超伝導との関連性も明らかになり、ヘリカル超伝導の有用なプローブとしての可能性が示唆されている。理論のモデルは、空間反転対称性の破れに起因するラシュバ型スピン軌道相互作用がはたらく、面内磁場が印加された単層系という、比較的シンプルなものであり、実験結果を定性的に再現するには十分であるが、定量的な一致には至っていない。

そこで、本研究では二層系における超伝導ダイオード効果の理論研究を行った[4]。二層系にすることで、単層系からの単純な拡張に留まらず、層間へのジョセフソン渦の侵入に起因する軌道対破壊効果という、これまでの理論研究では考慮されることがなかった効果を取り入れることができる。BdG 方程式による解析の結果、軌道対破壊効果が小さいときには臨界電流の非相反性の振動周期が短くなり、軌道対破壊効果が大きいときには二層のデカップリング転移によって、多層効果、あるいは軌道対破壊効果という新しい内因的機構に基づく振動現象が現れることが示された[Fig. 1]。したがって、軌道対破壊効果は超伝導ダイオード効果において定性的にも定量的にも重要な役割を果たすと言える。

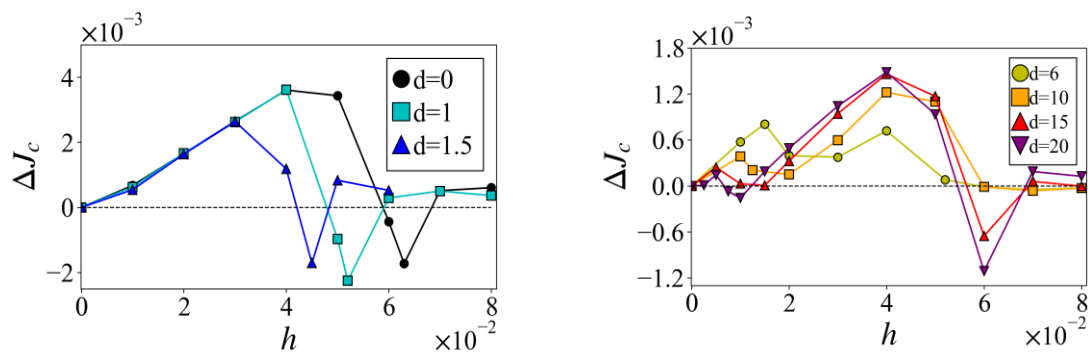


Fig. 1 Magnetic field dependence of the superconducting diode effect

References

- [1] F. Ando *et al.*, Nature **584**, 373 (2020).
- [2] R. Kawarazaki *et al.*, Appl. Phys. Express **15** 113001 (2022).
- [3] A. Daido *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 037001 (2022).
- [4] K. Nakamura *et al.*, arXiv:2305.19317.

Non-Equilibrium Spatiotemporal Dynamics of Human Colorectal Cancer Organoids

Active Matter Lab Shogo Nagai

Abstract Non-equilibrium spatiotemporal dynamics of human colorectal cancer organoids (miniaturized organ model) were quantitatively analyzed from the dynamic deformation of growing organoids. Using the organoids with known genetic fingerprints, the causality connecting the principal gene mutations in cancer and the spatiotemporal patterns of dynamic deformation could be identified.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

Colorectal cancer is the second cause of cancer death in Japan. To date, the majority of cancer research has relied on microscopic images of fixed cells and tissues. However, non-equilibrium dynamics of cancer have been largely overlooked, despite the fact that cancerous cells and tissues are highly dynamic. Extending the recent studies shedding light on the dynamics of the isolated cells, spatiotemporal analysis of cancer on a multicellular level is expected to reveal how the genetic mutation and the modulation of protein expression affect the growth and invasion of cancerous tissues.

This study aims to extract the characteristic spatiotemporal patterns of colorectal cancer organoids (miniaturized organ model) with two principal genetic mutations (*BRAF* and *KRAS*). The organoids derived from patients were cultured under collaboration with the Department of Gastroenterology and Hepatology, Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University. After seeding single cells in a 3D gel matrix, the dynamic deformation of organoids was monitored for 5 days (120 h), and the time lapse images were quantitatively evaluated by the Fourier mode expansion (Fig. 1). The deformation power summed over $m = 2 - 4$, indicated that the deformation of the organoids with *BRAF* mutation was much larger compared to the wildtype organoids (no mutation) and those with *KRAS* mutation. Next, the effective viscoelasticity of organoids was calculated from a stress-normalized deformation power. As a remarkable result, the organoids with *BRAF* mutation showed the lowest effective elasticity throughout the whole observation period ($t = 0 - 120$ h), suggesting the weaker cell-cell junctions caused by *BRAF* mutation. In fact, the immunofluorescence images indicated that the expression of cell-cell junction protein (E-cadherin) in organoids with *BRAF* mutation was significantly lower than the wildtype and the organoids with *KRAS* mutation.

In conclusion, this study demonstrated that the spatiotemporal dynamic analysis of cancer organoids can be used to unravel how the key gene mutations modulate the protein expression and result in the active deformation of multicellular systems. The *dynamic phenotype* of cancer organoids proposed here could potentially serve as a novel diagnostic index to unravel the dynamic aspects of cancer progression out of equilibrium that cannot be detected by the standard diagnosis using fixed samples.

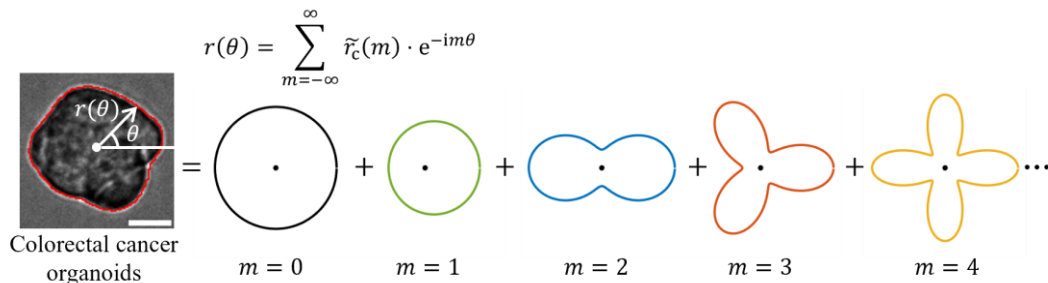


Fig. 1. Quantitative evaluation of the colorectal cancer organoid by the Fourier expansion of the polar function of its shape. Scale bar is 20 μm .

開放量子系におけるトポロジカル相の理論的研究

凝縮系理論研究室 濱中秀有

Abstract We propose novel topological phenomena in open quantum systems under different situations. One is the interaction-induced skin effect in ultracold atoms, and the other is the emergence of the skin effect in equilibrium topological matter.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、孤立系の枠組みを超えた開放量子系におけるトポロジカル相の研究が盛んに行われている。特に相互作用のない1次元系においては、非自明な1次元トポロジカル不変量に起因して、表皮効果という固有状態のほとんどが端に局在する現象が起きる[1]。本研究では、以下の2つの課題に取り組んだ。

(1) 相互作用誘起の表皮効果[2]

冷却原子系において、光会合と呼ばれる技術を用いて、 ^{173}Yb などの原子間に非弾性散乱を誘起することで、システムに制御可能な散逸を導入できるようになった[3]。このような冷却原子系は開放量子系の格好の実験的舞台となる。特に、冷却原子系においては、相互作用や多体の粒子ロスが自然に現れる[4]。しかしながら、従来の開放系のトポロジーに関するほとんどの研究は相互作用のない系を扱っており、強相関効果が開放量子系におけるトポロジカル相に与える影響の多くが未解明となっている。たとえば、開放系特有のトポロジーが強相関効果によって誘起され得るかという問題は明らかとなっていない。

そこで、本課題では、1次元の強相関モデルに2体ロスが存在するモデルを解析することで、相互作用誘起のリウビリアン表皮効果を提案した[2]。特に、相互作用によって固有モードが端に局在することを数値的に示した。さらに、リウビリアンを二重化ヒルベルト空間に作用する演算子に書き換えた場合、ケット空間にのみ捻り境界条件を課すことでリウビリアン表皮効果を特徴づけられることを確認した。また、この特徴づけは1粒子系におけるリウビリアン表皮効果[4]にも有効であることを解析的に示した。

(2) 平衡系のトポロジカル相における点ギャップトポロジカル現象の発現

上述の課題で、外因的に散逸が加わった系を解析したように、これまでの大部分の研究は散逸を外部から与えることで表皮効果を誘起している。したがって、平衡系における点ギャップトポロジカル現象の観測およびその役割は現状、ほとんど理解されていない。

本課題では、平衡系における点ギャップトポロジカル現象の発現を提案する。具体的には、エルミートなトポロジカル絶縁体のエッジを着目系とみなし、バルクを熱浴とみなすことで、エッジの有効ハミルトニアンが非自明な点ギャップトポロジーを示すことを見出した。特に、1粒子グリーン関数法を用いて[6]、Chern絶縁体のカイラルエッジ状態が羽田野ネルソンモデルのような表皮効果を示すことを確認した。本成果によって、固体中における表皮効果の役割を明らかにすることが期待される。

発表会では、(1) 相互作用誘起の表皮効果について説明を行った後、(2) 平衡系のトポロジカル相における点ギャップトポロジカル現象の発現について簡単に議論したい。

References

- [1] N. Okuma, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020); K. Zhang, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 126402 (2020).
- [2] SH, K. Yamamoto, and T. Yoshida, Phys. Rev. B **108**, 155114 (2023).
- [3] K. Sponselee, *et al.*, Quantum Sci. Technol. **4**, 014002 (2018); T. Tomita *et al.*, Sci. Adv. **3**, e1701513 (2017).
- [4] K. Honda, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 063001 (2023).
- [5] T. Haga, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 070402 (2021).
- [6] T. Yoshida *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 12A109 (2020).

制限空間内の超流動 ^3He texture

低温物理学研究室 原奈槻

Abstract We used NMR to study the textures of superfluid ^3He in cylindrical cells under conditions where defect formation was expected. Unusual NMR signals were observed in both superfluid $^3\text{He-A}$ and $^3\text{He-B}$. Possible shapes of the textures were discussed based on numerical simulation.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

制限空間内の超流動 ^3He では、クーパー対の軌道とスピンの異方性を反映したオーダーパラメータが空間変化を持って分布しており、テクスチャーと呼ばれる。テクスチャーは容器壁から受ける制限と系の自由エネルギーを最小にする要請が競合して決定され、条件によっては、2つのエネルギー的に縮退した領域を滑らかに繋ぐドメインウォールや、線欠陥が形成される[1]。特に超流動 $^3\text{He-B}$ 相において、円筒容器に円筒軸と垂直な方向に磁場を印加すると矛盾する境界条件が生まれ、そこで欠陥の生成が期待される。欠陥は周辺から受ける制約によって形成されるため、欠陥の位置を特定することは欠陥の構造を解析する上で重要である。そこで、直径 1mm の円筒型サンプルセル内を MRI 撮像し、テクスチャーを解析する実験を計画した。直径 1mm は超流動 $^3\text{He-B}$ 相のテクスチャーのヒーリング長の 10 倍程度のオーダーであり、温度を変化させていく過程でテクスチャーの発展を観測するのに適している。

超流動 $^3\text{He-B}$ 相では、常流動相で得た NMR 信号の周波数から 30Hz 程度のシフトが見られた。NMR 信号の周波数シフトは B 相のオーダーパラメータの異方性を記述する n ベクトルと外部磁場の成す角に依存するものであり、これは容器壁または欠陥から制約を受けて n ベクトルが一様でない空間構造を形成していることを意味する。さらに温度を下げていくと容器壁や欠陥から強く制限を受けて n ベクトルのテクスチャーが発達していき、シフト量は大きくなると予想していたが、これに反してシフト量は大きくならないという興味深い結果が得られた。観測したシフト量から考えられるテクスチャーについてパターン別に検討した。

超流動 $^3\text{He-A}$ 相では、低温になるにつれて NMR スペクトルの線幅が大幅に広がる場合と広がらない場合の両方を観測した。 $^3\text{He-A}$ 相においても、軌道の異方性を表す l ベクトルとスピンの異方性を表す d ベクトルによってテクスチャーが形成されるが、円筒容器内でのテクスチャーをコンピュータシミュレーションによって計算すると、今回の実験で観測したテクスチャーに構造体がある可能性を示唆する結果が得られた。

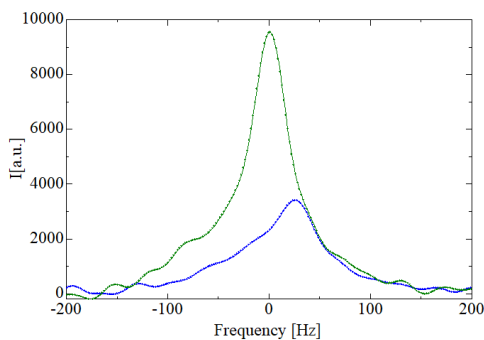


Fig.1 Spectra of the normal phase (green) and B phase (blue)

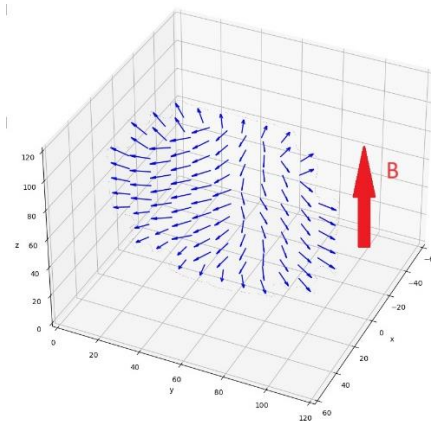


Fig.2 Numerically calculated texture of the $^3\text{He-A}$ phase in a cylindrical cell, with the magnetic field applied perpendicular to the cylindrical axis.

References

- [1] G.E. Volovik, Symmetry in Superfluid ^3He in W.P. Halperin and L.P. Pitaevskii (Eds.) “HELIUM THREE” (Modern problems in condensed matter science, Volume26, Chapter2, 1990)

超流動 $^3\text{He-A}$ 中における ドメインウォール構造とスピンスーパー流の効果

低温物理学研究室 日野祐哉

Abstract In $^3\text{He-A}$, Spin Supercurrent is magnetic flow without friction and closely connected to the spatial variation of the \hat{d} -vector. Using NMR measurement, we observed the spectrum with asymmetric performance in each side of the \hat{d} -soliton, depending on Spin Supercurrent, and we can determine the rotation direction of the \hat{d} -soliton.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

超流動 $^3\text{He-A}$ 相におけるオーダーパラメーターは、軌道の異方性を表す \hat{l} ベクトルと、スピンの異方性を表す \hat{d} ベクトルによって記述され、それらは壁等の境界条件に従いながら、各種エネルギーを極小とする織目構造 (テクスチャー) を形成する。隣り合った2つの準安定なドメインでは、 \hat{l} と \hat{d} の向きが異なる場合があり、その間には2つのドメインを連続的に繋ぐように \hat{l} と \hat{d} が空間変化するドメインウォールが形成される。

\hat{l} と \hat{d} の空間変化は超流動 ^3He の「流れ」と相互に影響している。 \hat{l} の空間変化は超流動質量流 g_s に寄与し、生貝らによってドメインウォールの傾きとの関連が指摘された[1]。もう一方の \hat{d} の空間変化は A 相を構成する $|\uparrow\uparrow\rangle$ 状態と $|\downarrow\downarrow\rangle$ 状態の対向流である超流動スピン流 (スピンスーパー流) に寄与し、磁化の流れとして現れることが期待される[2]。

本研究では厚さ $100\mu\text{m}$ の平行平板セル (Fig. 1) に閉じ込めた超流動 ^3He に対して NMR 測定を行った。このセルでは \hat{l} と \hat{d} がそれぞれ $+q$ 方向と $-q$ 方向を向く場合で縮退しており、異なるドメイン間にドメインウォールが形成される (Fig. 2)。N 相から A 相に入れて出来たドメインウォールは主に3種類観測され、反転するベクトルに応じて \hat{l} ソリトン

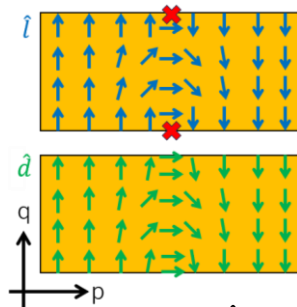


Fig. 2. Texture of \hat{l} -vector and \hat{d} -vector for Fig.3(c)

(Fig. 3(a)), \hat{d} ソリトン (b), \hat{d} - \hat{l} ロックソリトン (c) があった。 \hat{d} - \hat{l} ロックソリトン はパルス NMR による励起直後の MRI では q 方向壁付近でのみ信号強度が落ちるが、観測時間を長くすると、スピンスーパー流によって q 方向全域に広がっていく様子が見られ、スピンスーパー流の効果による時間スケールとおおよそ一致した (Fig. 3(right))。

また、 \hat{d} ソリトンに p 方向磁場勾配をかけて得たスペクトルは、かける磁場勾配の向き (符号) によって Peak-Dip 差が有意に異なった (Fig. 4)。これはスピンスーパー流の効果によって、ドメインウォールの左右の信号に違いが生じた結果であり、スピンスーパー流の式から定性的に説明される。これにより、 \hat{d} ソリトンにおける \hat{d} ベクトルの回転の向きを特定することが出来た。

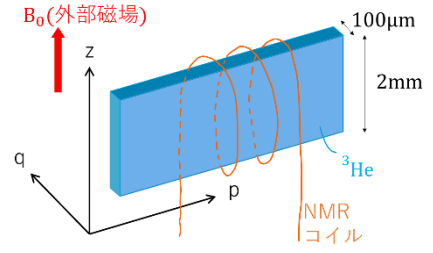


Fig. 1. Illustration of sample cell

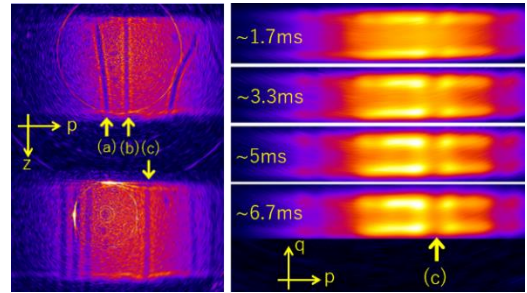


Fig. 3. p-z MRI (left) and p-q MRI (right)

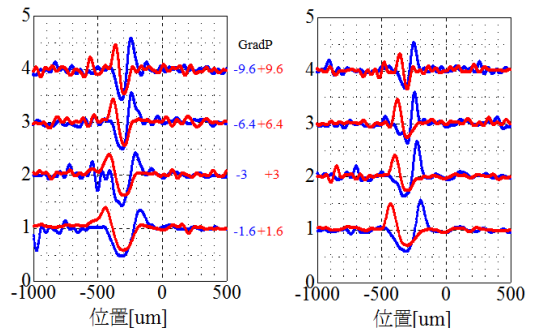


Fig. 4. \hat{d} -soliton spectrums normalized by N-phase spectrum in p-gradient magnetic field. $\Delta f=529\text{Hz}$ (left), 237Hz (right)

References

- [1] Y. Ikegai, M. Sc. thesis, Department of Physics, Kyoto University (2022)
- [2] D. Vollhardt, P. Wölfle, "The Superfluid Phases of Helium 3" (Taylor & Francis, 2002)

純良単結晶 UTe_2 の核磁気共鳴測定による超伝導状態の研究

固体量子物性研究室 松村拓輝

Abstract UTe_2 is a strong candidate for a spin-triplet superconductor. We have performed ^{125}Te -nuclear magnetic resonance measurements on a single crystal with the transition temperature $T_c = 2.1$ K. We determined the superconducting symmetry in the low-field superconducting state and found an anomalous magnetic fluctuation well below T_c .

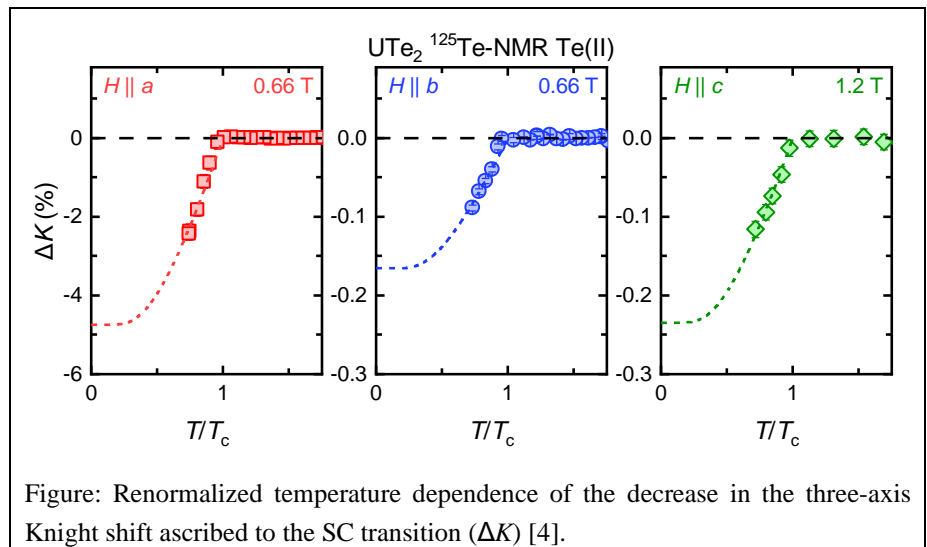
© 2024 Department of Physics, Kyoto University

超伝導は2つの電子が対をなす量子コヒーレントな状態であり、対状態には大別してスピン自由度を持たないスピン一重項とスピン自由度を持つスピン三重項が存在する。スピン三重項超伝導体では、その内部自由度に起因する超伝導多重相や新奇な量子状態が期待され、盛んに研究がなされている。

2018年に超伝導が報告された UTe_2 [1]は、 b 軸高磁場下と圧力下で超伝導多重相を示すことからスピン三重項超伝導が有力視されている[2]。2022年に試料の合成方法に大きな進展があり、超伝導転移温度 T_c が初期の 1.6 K から 2.1 K にまで上昇した[3]。この 2.1 K の試料は残留比熱がほとんどゼロであり、 T_c と残留比熱の関係から $T_c = 2.1$ K は常圧で UTe_2 が示す本質的な T_c と考えられる。そこで我々はこの 2.1 K の純良単結晶試料を用いて、 UTe_2 の本質的な振る舞いを調べるために ^{125}Te 核の核磁気共鳴(NMR)測定を行った。

スピン三重項超伝導の超伝導対称性は秩序変数である \mathbf{d} ベクトルがどの軸方向に成分を持つかで分類することができる。NMR ナイトシフト測定は超伝導状態においてスピン成分を測定することができる数少ない測定手法である。一般に、 \mathbf{d} ベクトルは超伝導スピンに直交するため、ナイトシフトが超伝導転移によって減少する方向には \mathbf{d} ベクトルの成分が存在することが知られている。我々は低磁場超伝導状態において、ナイトシフト測定を行い、すべての結晶軸方向で超伝導転移によるナイトシフトの減少を見出した(Figure)[4]。この結果は UTe_2 の超伝導対称性が、 \mathbf{d} ベクトルが a 、 b 、 c 軸方向すべての成分を持つスピン三重項超伝導 A_1 状態であることを示している。この対称性は最近の熱伝導率測定[5]とも整合的である。

さらに、超伝導状態における軌道成分について調べるため、 b 軸磁場下で核スピン一格子緩和率($1/T_1$)測定を極低温まで行った。その結果、0.4 K 以下において $1/T_1$ の異常な増大を発見した。この振る舞いはナイトシフト測定で明らかになったフルギャップの超伝導ギャップ構造と矛盾しており、低温において非自明なスピンゆらぎが存在することを示唆している。



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. Suetsugu *et al.*, arXiv:2306.17549v1 (2023).

確率的化学反応系の Hopf 分岐点近傍における情報の流れの解析

統計物理・動力学研究室 松本健心

Abstract We study information flow near a bifurcation point of the Brusselator. We first calculate the learning rate of one chemical species by numerical simulations of the chemical Langevin equation. We then theoretically derive the learning rate by applying a singular perturbation method near a Hopf bifurcation.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

物理学は情報理論と深い関わりがある。例えば、決定論的力学系における複雑なダイナミクスは情報理論に基づいて定義される Kolmogorov-Sinai エントロピーによって特徴づけられる[1]。他の例として、情報処理を行う部分系を熱力学系として取り扱うことにより情報量を含めた熱力学第二法則が定式化された[2]。前者はカオス、後者は情報熱力学として発展してきた。

本修士論文では、両者の統合を目指し決定論的力学系に対する情報熱力学を考える。具体的には、Hopf 分岐を示す化学反応系のモデルである Brusselator を用いて情報の流れを解析する。Hopf 分岐は振動を示す分岐現象であり、振動は生体システムの中で普遍的に現れる現象である。そのため、振動現象と情報の流れの関係を明らかにすることは生化学反応を理解する上でも重要であると考えられる。

まず、Brusselator の数値シミュレーションにより情報の流れの計算を行う。情報の流れを定量化する量として、相互情報量の時間微分をそれぞれの変数に対応するように分解して定義される学習率を用いる。具体的な数値シミュレーション方法としては、化学反応式からマスター方程式を書き下し、そのシステムサイズ展開で得られるフォッカープランク方程式に対応する Langevin 方程式を用いて、Euler-Maruyama 法にて数値シミュレーションを行い、定常状態での統計平均から学習率を算出する。分岐点において系のダイナミクスは特異的に変化するが、学習率の分岐前後での特異性の有無は明らかではない。

そこで Brusselator の学習率の分岐点での振る舞いを理論的に解析する。第一に、安定固定点が存在する定常領域で、線形解析から学習率を計算する。この結果は数値シミュレーションで計算される学習率とよく一致する (Fig. 1)。しかし、分岐点に近づくにつれてズレが大きくなり、振動領域では計算できない。

ここで、Hopf 分岐点近傍では一般的な常微分方程式が Stuart-Landau 方程式に縮約されることに着目する[3]。分岐点での学習率の特異性を知るために、単純なノイズの加わった Stuart-Landau 方程式で学習率を計算すると、決定論的極限で非解析的な振る舞いを示すことがわかる。

その結果を踏まえて、特異摂動法により Brusselator からノイズの入った Stuart-Landau 方程式を導き、学習率を計算する。得られた結果は、分岐点直上を除いて数値シミュレーションから得られる学習率と一致している (Fig. 2)。しかし、単純なノイズの加わった Stuart-Landau 方程式の解析結果と異なり、Brusselator で計算される学習率は決定論的極限で非解析的な振る舞いを示さないことが示唆されている。このように、Hopf 分岐点における学習率の変化の仕方は多様であることがわかる。

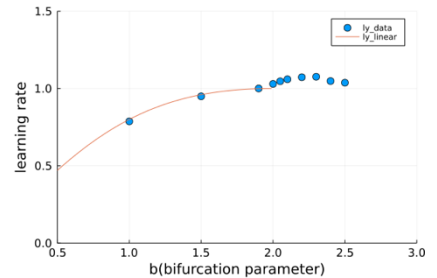


Fig.1 Learning rate in the stationary regime

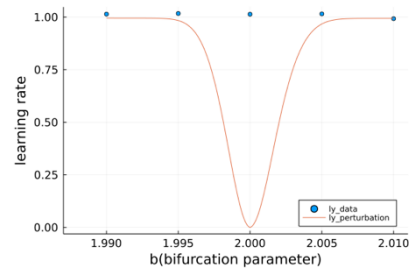


Fig.2 Learning rate near the bifurcation point

References

- [1] E. Ott, Chaos in dynamical systems, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2002).
- [2] J. M. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, Nature physics 11, 131 (2015).
- [3] Y. Kuramoto, Chemical oscillations, waves, and turbulence, (Dover Books on Chemistry, 1984).

エアロジェル中の超流動 3He における渦糸格子

凝縮系理論グループ 涌井真哉

Abstract In the Polar phase of superfluid 3He, which is obtained in anisotropic aerogels in rotating vessel, elementary topological objects are half-quantum vortices(HQVs). We examine the lattice structure of vortices based on the microscopic analysis for the Ginzburg-Landau model. Also, we consider spin current response, which maintains the superfluidity.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

P 波超流動 3He は、等方的なフェルミ面を持ち対状態がほぼ縮退しているために様々なタイプの対称性の破れを実現しうる量子凝縮状態である。この点に着目して、一軸異方性を持つエアロジェルという媒質中で Polar 対状態の出現が理論的に予言され[1]、10 年ほど前に実験的に見出された[2]。このエアロジェル中における超流動 3He の Polar 相では、トポロジカル励起として半整数渦(HQV)対が出現する[3]。HQV は渦一周につき d ベクトルと位相がともに半回転することで一価性を保つ渦構造である。また、この系に Polar 軸方向に平行な磁場をかけていくことで、連続的に β 相と呼ばれる新規超流動相に転移することが理論的に論じられた[4]。

Polar 相で実現しうる渦励起については、渦一周につき位相が 2π 回転する整数渦(SQV)と HQV 対とがエネルギー的に競合する。これまで、1 つの SQV と 1 つの HQV 対との間のエネルギーの比較が行われ、フェルミ液体補正により HQV 対の方が安定化することが示されていた[5]。

本研究では、微視的な計算から導出された Ginzburg-Landau(GL)自由エネルギーを用いて、HQV 渦が構成する渦格子について検討した。準粒子間の斥力相互作用に起因する強結合効果を従来の弱結合近似に含めることにより、回転系で生じる渦格子は[4]で考えられていたものとは異なり、HQV 対が SQV になって単純な三角格子を組む方が安定であり、1 つの HQV 対の安定性を決めていたフェルミ液体補正は格子形成にとっては重要でないことがわかった。次いで、こうしてできたアブリゴゾフ格子型の渦糸格子が外からの流れに対し、どのように応答するのかを考えた。その結果、秩序変数が 1 成分の場合と同様に、通常の一様な流れに対してこの渦格子は、一様変位(スライディング)することによって位相コヒーレンスが壊れて超流動密度が 0 という従来の応答を示すが、HQV 対のそれぞれのスピン成分に異なる速度、すなわちスピン流を加えたときには、自由エネルギーゆらぎがスピン流の 2 乗に比例することになり、有限のスピン超流動密度を持つことがわかった。つまり系全体がスピン超流動状態にあることを理論的に明らかにした。

References

- [1] K. Aoyama and R. Ikeda. Phys. Rev. B 73, 060504 (2006).
- [2] V.V. Dmitriev et al. Phys. Rev. Lett. 115, 165304 (2015).
- [3] S. Autti et al. Phys. Rev. Lett. 117, 255301 (2016).
- [4] G. E. Volovik. JETP Lett. 115 (5), 276-279 (2022).
- [5] T. Hisamitsu and R. Ikeda. Phys. Rev. B 103, 224511 (2021).