

令和元年度

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

2020年2月3日(月)、2月4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）

2020 年 2 月 3 日（月） 9：00～17：50

目 次

1. 空間反転対称性の破れた超伝導体におけるエーデルシュタイン効果の研究
池田 侑平（ 9：00）・・・ 1
2. 定圧振動剪断流下における粉体系の数値的研究
井嶋 大輔（ 9：20）・・・ 2
3. ハロゲン化鉛ペロブスカイトの三次非線形光学応答と電子構造の研究
小原 慧一（ 9：40）・・・ 3
4. PEG 高分子エラストマーの液晶分子による膨潤と粘弾性
神野 裕貴（10：00）・・・ 4
5. 磁気トルク測定による $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ の隠れた秩序相における回転対称性の破れの観測
栗原 遼（10：20）・・・ 5

10：40～10：50 休憩

6. $\text{SU}(N)$ 量子磁性の直接観測に向けた量子気体顕微鏡装置の構築と超狭線幅光源の開発
高田 佳弘（10：50）・・・ 6
7. 超流動 ^3He の異方的 B 相における半整数量子渦
丹下 真希（11：10）・・・ 7
8. 流体力学領域における非従来型輸送応答に関する研究
梶子尾理貴（11：30）・・・ 8
9. 光格子中 $\text{SU}(N)$ 冷却フェルミ気体における量子磁性の観測
西澤 直樹（11：50）・・・ 9
10. 幾何学的ポンプの理論的研究：ゆらぎの関係式，非断熱操作，熱機関の効率
樋野 佑樹（12：10）・・・ 10

12：30～13：30 昼休み

11. エネルギーが保存する決定論的熱伝導系での変分原理
渡邊 雄也（13：30）・・・ 11
12. 液体テルルの X 線コンプトン散乱測定
櫻澤 智大（13：50）・・・ 12

13. モット絶縁体 1T-TaS_2 における高次高調波発生	中野 愛子 (14 : 10) 13
14. 非平衡熱力学と整合するキネシンの確率過程模型	西村 和真 (14 : 30) 14

14 : 50 ~ 15 : 00 休憩

15. 高分子溶液系における粘弾性相分離の構造形成過程	林 佑炫 (15 : 00) 15
16. ファンデルワールス磁性体 CrI_3 薄膜における磁気秩序	大庭 健嗣 (15 : 20) 16
17. リアルタイム分散関係 DLS 測定法の試作と N-I 二次相転移の臨界現象	岡田 知治 (15 : 40) 17
18. 核磁気共鳴による白金ナノ粒子の研究	奥野 友則 (16 : 00) 18

16 : 20 ~ 16 : 30 休憩

19. 格子模型の可解性に対する単体複体と代数を用いた新手法	小倉 将紘 (16 : 30) 19
20. 超伝導体 Sr_2RuO_4 の上部臨界磁場近傍核気共鳴法、および NMR 用一軸圧セルの開発	金城 克樹 (16 : 50) 20
21. $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ における Sn の特異な陰イオン状態と超伝導性	鯉渕 駿 (17 : 10) 21
22. 冷却原子を用いた量子状態の幾何学的構造の研究 : トポロジカル量子ポンプに対する乱れの効果と量子計量テンソル測定	佐久間啓太 (17 : 30) 22

2020年2月4日 (火) 9 : 00 ~ 14 : 30

23. STM を用いた鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Se},\text{S})$ の正方晶相における電子状態の観測	佐野 大樹 (9 : 00) 23
24. 界面 2 次元相分離モルフォロジーとアンカリグ制御	柴 亮太 (9 : 20) 24
25. 磁場勾配下 NMR による液体 ^3He における空間不均一構造の研究	田口 凌 (9 : 40) 25
26. 駆動する高分子による液滴の変形	竹中 亮太 (10 : 00) 26

27. 新奇な乱流の探索と分類

田之上智宏 (10 : 20) 27

10 : 40 ~ 10 : 50 休憩

28. 共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ光検出

土田洸志郎 (10 : 50) 28

29. アゾ混合リオトロピック液晶光誘起 N-I 相転移

徳宿 光子 (11 : 10) 29

30. パルスレーザー堆積法によるキタエフスピン液体候補物質 α -RuCl₃ の薄膜作製

中村 聡史 (11 : 30) 30

31. 単一ペロブスカイトナノ粒子の励起子発光特性の研究

正田宗二郎 (11 : 50) 31

32. 空間反転対称性の破れた 2 次元超伝導体の不純物効果

三吉 賢 (12 : 10) 32

12 : 30 ~ 13 : 30 昼休み

33. 異方的超伝導体 Sr₂RuO₄ を用いた微細構造系の輸送特性

三好 拓人 (13 : 30) 33

34. 冷却原子フェルミ超流動における散逸が誘起する物性の研究

山本 和樹 (13 : 50) 34

35. 2H-NbSe₂ の金属相における高強度電場下のキャリアダイナミクス

下村 耕生 (14 : 10) 35

空間反転対称性の破れた超伝導体における エーデルシュタイン効果の研究

凝縮系理論グループ 柳瀬研究室 池田侑平

Abstract We numerically calculated Edelstein effect in non-centrosymmetric d -wave superconductors and found that the effect in the surface state is about 80 times larger than that in the bulk state. This giant Edelstein effect is come from its unique band structure and non-trivial spin texture of surface Majorana fermion.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

現代のスピンロニクス分野において、電流による磁気モーメントの生成と制御は中心的な課題の一つとなっている。その有効的な手段として、近年研究が進められているものがエーデルシュタイン効果である[1]。エーデルシュタイン効果は、空間反転対称性の破れた金属において、スピン軌道相互作用から Fermi 面が分離しスピン運動量ロッキングが生じ、そこに電流が流れることによって非平衡スピンの蓄積され、有限のスピン磁気モーメントが生じる現象である。しかし、通常エーデルシュタイン効果は小さく、磁区ドメインのスイッチングのためには大きな電流密度が必要であることが知られている[2]。したがって、散逸のある巨大な電流によって生じるジュール熱が応用上問題となっている。

本研究では、効率的な磁気制御を可能にする物質として、空間反転対称性の破れた d 波超伝導体の表面状態が適していると推察した。空間反転対称性の破れた d 波超伝導体の表面 Majorana 状態が存在する[3]。この超伝導体は時間反転対称性を有しているため、広くトポロジカル物質で見られる Dirac 型の線型分散ではなく、フラットバンド状態になっている。さらに、状態密度において表面状態はゼロエネルギーピークを持っている。このことから巨大な輸送応答量が予想される。

以上の理由から、空間反転対称性の破れた d 波超伝導体に対し tight-binding モデルを構築し、数値計算的に超伝導電流が誘起するエーデルシュタイン効果を求めた。そこでは表面状態におけるエーデルシュタイン効果が、バルク状態におけるものに比べおよそ 80 倍も増大していることがわかった。

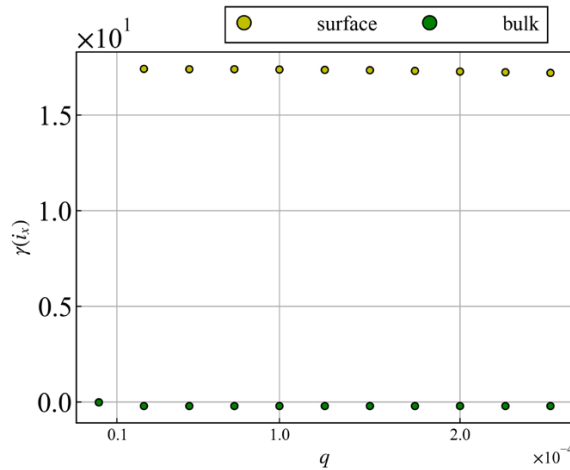


Fig. 1. (Color Online) The coefficient of Edelstein effect in the surface state (yellow) and that in the bulk state (green). Here, q is a center of mass momentum of Cooper pairs.

References

- [1] V. M. Edelstein, Solid State Commun. **73**, 233 (1990).
- [2] A. Chernyshov, *et al.*, Nature Phys. **5**, 656-659 (2009).
- [3] K. Yada, *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 064505 (2011).

定圧振動剪断流下における粉体系の数値的研究

物性基礎論：統計動力学研究室 井嶋大輔

Abstract We numerically study the rheology of a two-dimensional granular system confined by constant pressure under oscillatory shear. We find several scaling laws for the storage and loss moduli against the scaled strain amplitude. We clarify the relationship among shear jamming, dilatancy, and yielding.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

粉体系は剛性と粘性を併せ持つ粘弾性体である。粘弾性を特徴づけるのは外力に対する応答すなわち、レオロジーである。特に高密度粉体系においてはジャミング転移点以上で剛性が発生することが広く知られている[1]。近年、摩擦のある高密度粉体系の場合に微小な歪みを加えることにより、ジャミング転移点以下であっても剛性が生じる“シアジャミング”が発見され、活発な議論が行われている[2]。一方で、定圧下の粉体系に対して剪断を加えた際は密度が変動することが19世紀から知られており、定常剪断の場合は密度が減少するダイラタンシーと呼ばれる現象が重要になる[3]。

この状況を踏まえて、本研究では(1)定圧振動剪断下における摩擦のある粉体系のレオロジーと(2)密度変化とシアジャミングの関係を明らかにすることを目的とし、定圧振動剪断下における摩擦のある二次元粉体系に対し数値的に研究を行った。すると、剛性と粘性にそれぞれ対応する貯蓄剛性率と損失剛性率が圧力によってスケールされた剪断歪みに対するスケーリング則に従うことを発見した。また、同時にこれらで発見されたスケーリング指数を現象論に基づき説明することに成功した。ここで摩擦のある系での降伏の振る舞いをより明確にするために、全粒子の平均二乗変位を用いて降伏転移点を調べた。その結果、平均二乗変位により予知される降伏転移点は圧力に比例し、その降伏歪みは損失剛性率のピークにおける歪みとほぼ一致した。また、シアジャミングはダイラタンシーに対応していることが明らかとなった[4]。

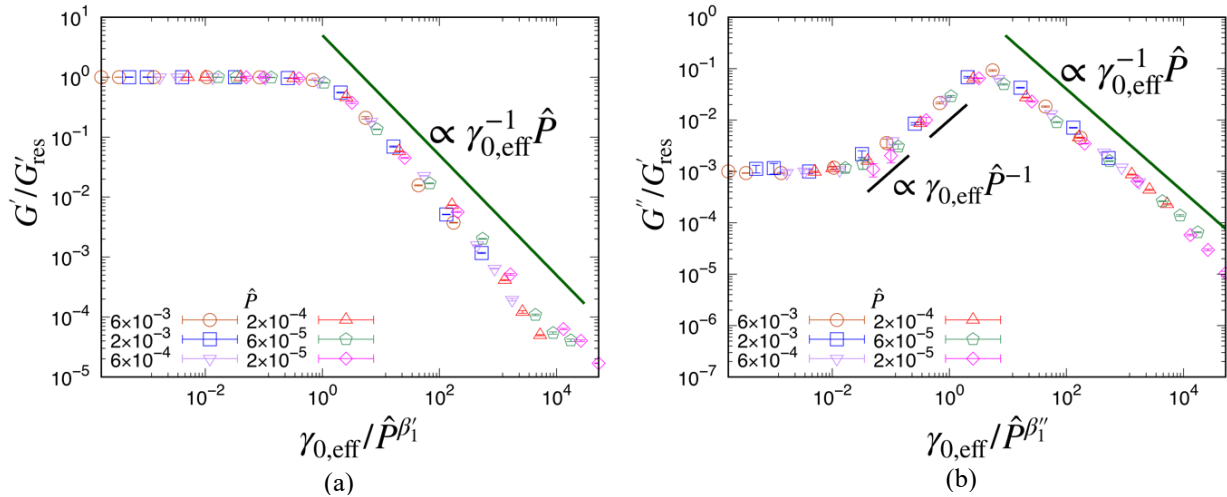


Fig. 1. Scaling plots of (a) storage modulus G' and (b) loss modulus as a function of scaled strain γ/P . The green line and black dashed line are proportional to P/γ and γ/P , respectively.

References

- [1] A. J. Liu and S. R. Nagel, *Nature* **396**, 21 (1998).
- [2] D. Bi, J. Zhang, B. Chakraborty and R. Behringer, *Nature* **480**, 355 (2011).
- [3] O. Reynolds, *Philos. Mag. Ser.* **20**, 469 (1885).
- [4] D. Ishima and H. Hayakawa, arXiv:1902.04759, 2019.

ハロゲン化鉛ペロブスカイトの 三次非線形光学応答と電子構造の研究

ナノ構造光物性研究室 小原慧一

Abstract: Third-order optical nonlinearities in lead halide perovskite single crystals were examined using the Z-scan method. Theoretical analysis of the experimental data revealed that the third-order nonlinear optical coefficients were enhanced by coulomb interactions. Our research sheds new light on the optical nonlinearities and the electronic structures of lead halide perovskites.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

ハロゲン化鉛ペロブスカイトは光電デバイス材料として非常に優れた特性を持つだけでなく、特異な電子構造に起因して、これまでの半導体に見られないユニークな光学現象が観測されるなど、物性物理学の観点からも興味深い物質である。近年、低閾値での二光子ポンプレーザー発振や高効率な光変調[1]が報告され、非線形光学デバイスとして新しい応用が期待されている。さらに、高次高調波発生[2]などの電子構造の特徴を強く反映する非線形光学現象も報告され、ペロブスカイト特有の電子構造と非線形光学特性の関連性にも興味が集まっている。しかし、非線形光学係数が決定されていないなど、この物質の非線形光学特性の理解は全く進んでいないのが現状である。なかでも、基本的な三次非線形光学応答の解明とその電子構造との関連性の理解は、非線形光学デバイス設計において必要不可欠であるだけでなく、高次の非線形光学応答などの複雑な現象を統一的に理解する上で非常に重要である。

本研究では、Z-scan 測定によりハロゲン化鉛ペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$) の三次非線形光学係数(二光子吸収係数と光カー効果誘起非線形屈折率)を決定した。多結晶薄膜試料と異なり、光散乱などの外的要因に左右されにくく、物質本来の三次非線形光学特性を調べることが出来る高品質な単結晶試料を用いた。図1に示すような、非常に S/N の良い Z-scan 測定が可能となった。そして、三次非線形光学応答を励起強度・エネルギー依存性、繰り返し周波数依存性、偏光方向依存性、直線・円偏光二色性などの観点から包括的に研究を行った。これらの実験データを解析するために、ハロゲン化鉛ペロブスカイトの特異な電子構造の特徴を kp 摂動によって取り入れ、この物質特有の三次非線形光学応答に関する理論モデルを構築した。三次非線形光学係数の励起エネルギー依存性(図2)をこの理論モデルで解析することにより、バンド端近傍で起きる三次非線形光学応答は電子正孔間に働くクーロン引力(励起子効果)によって強く増強されていることを初めて明らかにした[3,4]。また、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 単結晶では $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ 単結晶よりも広帯域の二光子吸収スペクトルが観測でき、二光子吸収の偏光依存性、直線・円偏光二色性の励起エネルギー依存性から、バンド構造の対称性やスピン軌道分裂した伝導帯の電子構造を明らかにした[4]。以上の結果から、Kane エネルギーや励起子換算質量、スピン軌道分裂エネルギーなどのハロゲン化鉛ペロブスカイトの電子構造を特徴づける重要な物理量を決定した。

References

- [1] T. Handa *et al.*, Sci. Adv. **5**, eaax0786 (2019).
- [2] H. Hirori *et al.*, APL Mater. **7**, 041107 (2019).
- [3] K. Ohara *et al.*, Phys. Rev. Mater. **3**, 111601(R) (2019).
- [4] K. Ohara *et al.*, 投稿準備中.

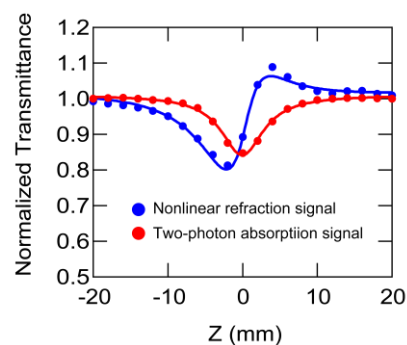


Fig. 1. Z-scan signals at excitation wavelength of 760 nm for $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$. The solid curves are fitting results.

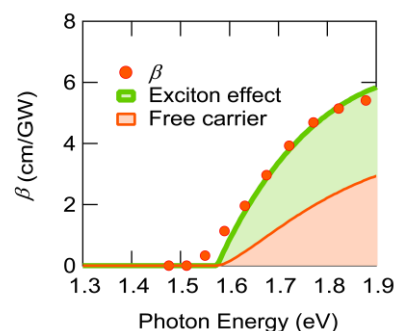


Fig. 2. The two-photon absorption spectrum (red circles). The solid curves are theoretical calculations with (green) and without (red) exciton effects.

PEG 高分子エラストマーの液晶分子による膨潤と粘弾性

ソフトマター物理学研究室 神野裕貴

Abstract We investigated relationship between viscoelasticity and anchoring force of LC molecules on PEG elastomers. We found that elasticity of PEG elastomer and the anchoring force increase as junction points increase. We also found that swelling behaviors of PEG elastomer by LC molecules affects both on elasticity and the anchoring force.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

液晶ディスプレイなどの液晶セルではガラス基板界面に高分子配向膜をコーティングすることによって液晶分子の配向を固定する。当研究室では、強いアンカリング界面とは逆に、弱いアンカリング界面に着目し[1]、界面高分子と液晶のアンカリング機構の解明を研究してきた。本研究では、せん断応力に対する動的粘弾性を測定することができるレオメーターを用いて、アンカリング特性と配向膜の粘弾性との間の関係を明らかにすることを試みた。

Poly ethylene glycol methyl ether acrylate(以下 PEG-M 分子量 454)と poly ethylene glycol diacrylate(以下 PEG-D 分子量 700)の質量比 ϕ を 0~1 まで変化させ、光重合した試料を PEG エラストマーと呼ぶ。この PEG エラストマーの動的粘弾性を測定すると、測定周波数領域では歪速度によらずフック弾性体的に振る舞うことがわかった。また、質量比 ϕ を増やして、架橋点密度を増加させると弾性率は単調に増加した(Fig. 1)。PEG エラストマーの弾性率の ϕ 依存性を、先行研究におけるアンカリング強度の ϕ 依存性と比較すると、両者とも、 ϕ の増加とともに単調に増加する傾向を示した(Fig. 1)が、その上昇の仕方は PEG エラストマーの弾性率の上昇の仕方とは異なった。

そこで次に、液晶分子による PEG エラストマーの膨潤現象を考えた。 $\phi=0.5$ で重合した PEG エラストマーの小片を、E44 に浸して断面積の変化から膨潤度を見積もると、PEG エラストマーの液晶吸収量は温度とともに増加し、その吸収量は温度や液晶種(E44 および LC39)によって異なることがわかった(Fig. 2)。液晶ディスプレイの配向膜として用いられた PEG エラストマーは、配向膜/基板界面において常に液晶分子に接触していることから、同様に液晶を吸収して膨潤していると考えられる。すなわち、配向膜である PEG エラストマーの液晶の吸収と配向膜の膨潤現象は、そのアンカリング特性に重要な役割を担っていることが推測される。

そこで最後に、重合前の PEG モノマー試料($\phi=0.5$)にあらかじめ液晶分子として E44 を混合して光重合した試料の動的粘弾性を 80℃の温度下で測定した。この結果、液晶を含まない試料(E44 0wt%)のものと比べた時に液晶混合による弾性率の低下が見られた(Fig. 3)。このことから、界面アンカリング力は、液晶分子吸収と高分子の膨潤による弾性率変化と密接に関係していることが示された。

References

- [1] 高本幸希.修士論文.(2018)

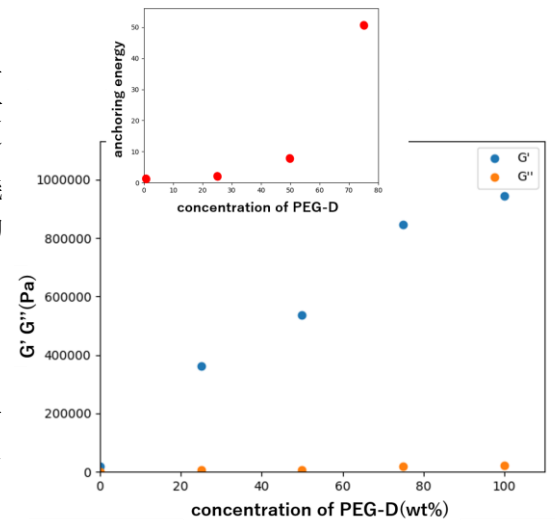


Fig.1. ϕ dependence of dynamic viscoelasticity. (T=30°C)

Inset: ϕ dependence of anchoring energy. (T=30°C)

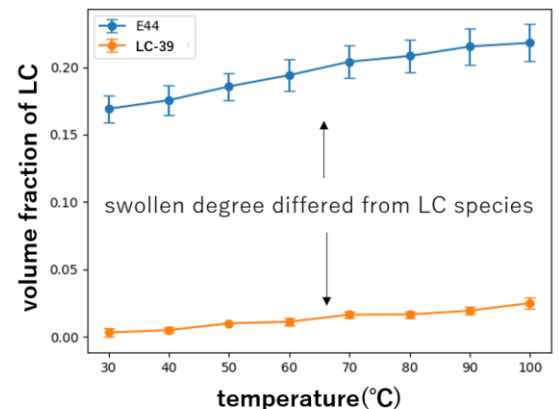


Fig. 2. Temperature dependence of swelling degree

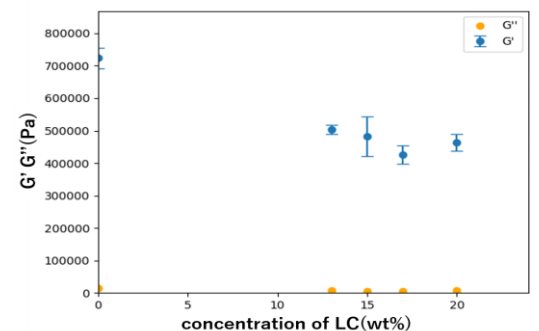


Fig. 3. LC concentration dependence of dynamic viscoelasticity (T=80°C).

磁気トルク測定による $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ の 隠れた秩序相における回転対称性の破れの観測

量子凝縮物性研究室 栗原遼

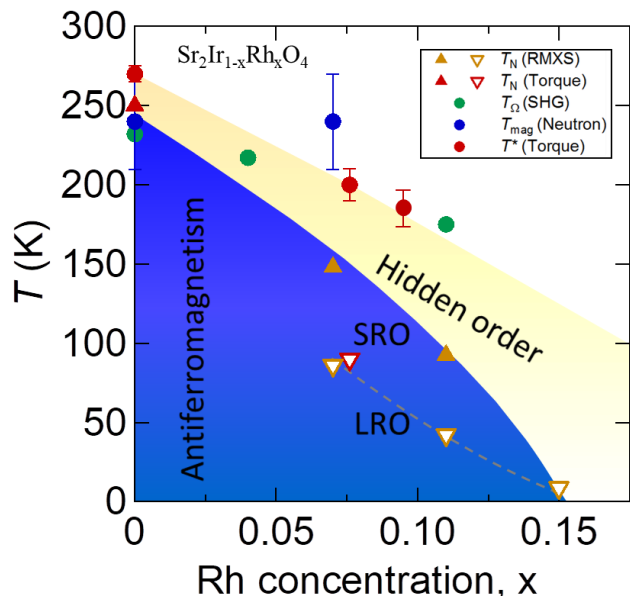
Abstract We report in-plane torque magnetometry of $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$, in which a hidden ordered state has been reported above the antiferromagnetic transition temperature. Emergence of two-fold in-plane anisotropy is found on entering the hidden order state. This provides thermodynamic evidence for a nematic phase transition, which breaks the rotational symmetry of the underlying lattice.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

5d 系遷移金属酸化物である Sr_2IrO_4 は、銅酸化物高温超伝導体の母物質である La_2CuO_4 と非常に類似した結晶構造・電子構造・磁気構造を持つ。 Sr_2IrO_4 の表面に K を堆積させ、電子ドープした試料においては角度分解光電子分光測定により、擬ギャップに似た電子構造も報告されている[1]。近年、 Sr_2IrO_4 の Ir サイトを Rh に置換した $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ において、反強磁性相よりも高温で「隠れた秩序」と呼ばれる未知の電子状態の存在が指摘されている(Fig. 1)。隠れた秩序相では様々な対称性の破れが議論されており、光学応答による第二高調波の実験では空間反転および回転対称性の破れが、偏極中性子散乱の実験からは時間反転対称性の破れが報告されている[2, 3]。隠れた秩序状態と、銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態との類似性から、両者の関連に興味をもたれている。

これまで我々のグループでは、銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ および $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ について、面内磁気トルクの超高感度測定を行うことで、擬ギャップ状態において回転対称性の破れた電子ネマティック状態が実現していることを明らかにしてきた[4, 5]。磁気トルクは磁化率の異方性を直接反映する熱力学量であり、ピエゾ抵抗式微小カンチレバーを用いることにより、一般的な SQUID 磁束計と比較して数千倍の高感度で磁気異方性を測定することが可能である。したがって、この手法は電子系の回転対称性の変化や、相転移の有無を調べるのに有効である。

このような背景を受け、本研究では、正方晶構造を有する様々なドープ量の $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ について、面内磁気トルクの精密測定を行った。試料は、コロラド大学ボルダー校の Gang Cao 氏から提供していただいた。その結果、ネール温度 T_N より高温の T^* 以下において、有限の二回対称振動が磁気トルクの面内角度依存性に現れることが明らかになった。これは T^* において、面内 4 回回転対称性の自発的な破れを伴ったネマティック相転移が起きていることを示している。当日は、 $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ の隠れた秩序状態における異方性と結晶軸方向の関係について議論する。



References

- [1] Y. K. Kim, *et al.*, *Science*. **345**, 187-190 (2014).
- [2] L. Zhao, *et al.*, *Nat. Phys.* **12**, 32-36 (2017).
- [3] J. Jeong, *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 15119 (2017).
- [4] Y. Sato, *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 1024 (2017).
- [5] H. Murayama, Y. Sato, R. Kurihara, *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 1038 (2019).

Fig. 1 Phase diagram of $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$, containing antiferromagnetic and hidden order states.

SU(N)量子磁性の直接観測に向けた 量子気体顕微鏡装置の構築と超狭線幅光源の開発

量子光学研究室 高田佳弘

Abstract We are developing a quantum gas microscope for the research of SU(N) quantum magnetism. We achieved optical transport, compression, and optical-lattice loading of atoms to the surface of the solid immersion lens used for the high-resolution imaging. We also developed an ultranarrow-linewidth diode-laser system for studying two-orbital SU(N) physics.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、光格子中にトラップされた冷却原子によるハバード模型量子磁性の研究が盛んに行われている。特に目覚ましい成果を上げているのが、量子気体顕微鏡による量子磁性研究である。量子気体顕微鏡とは、高分解能イメージング系によって格子点単位で原子位置を測定する装置であり、原子スピン測定と組み合わせることで量子磁性の直接観測をすることができる[1]。最近ではドーピングされたハバード模型におけるストリングも測定されており[2]、量子磁性研究の強力なツールになっている。

一方で、物理的に大変興味深く多くの理論的な研究が行われているが、固体による実現が難しいモデルの一つが SU(N)ハバード模型である。SU(N)ハバード模型とは、ハバード模型において相互作用の対称性を保ったまま粒子のスピン成分の数を 2 個($\pm 1/2$)から N 個に拡張したモデルであり、スピン自由度増加による秩序の喪失と量子磁性秩序の競合によって多様な新奇量子相が現れると考えられている[3]。SU(N)ハバード模型は核スピン $I = 5/2$ を持つ ^{173}Yb 原子を光格子に導入することで実現され、Singlet-Triplet Oscillation による隣接格子間の磁性相関の観測がなされている[4]。

本研究ではSU(N)量子磁性の長距離相関の直接観測に向け、Yb 量子気体顕微鏡装置の構築を行った。我々は分解能の向上のために固浸レンズを使用するが、固浸レンズによる高分解能を得るためには、レンズ直下への原子の輸送および圧縮が必要である。この原子の輸送と圧縮を移動光格子とアコーディオン光格子[5]によって実現した(Fig.1)。

また本研究では、SU(N)系のスピン観測で必要となるスピン観測手法についても新たな手法を考案した。

上記の量子気体顕微鏡では Yb 時計遷移を利用した 2 軌道 SU(N)系量子磁性の研究も行うことを考えている。本研究では Yb 時計遷移に共鳴する超狭線幅光源の開発についても行った[6]。機械的な振動に対して安定な干渉フィルタを利用した構造を採用し、レーザー線幅の狭窄化において重要である LD 電流変動に対する発振周波数の応答を測定した。そして LD 電流へのエラー信号のフィードバックによる線幅の狭窄化に成功し、魔法波長光格子中フェルミ縮退 ^{171}Yb 原子の高分解能分光から、レーザー線幅は 320Hz 以下と見積もられた(Fig.2)。これは上記の研究には十分な性能である。

References

- [1] A. Mazurenko *et al.*, Nature **545**, 462 (2017)
- [2] C. S. Chiu *et al.*, Science **365**, 251 (2019).
- [3] M. Hermele *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 174441 (2011)
- [4] H. Ozawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 225303 (2018)
- [5] M. Miranda *et al.*, Phys. Rev. A **91**, 063414 (2015)
- [6] Y. Takata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90** 083002 (2019)

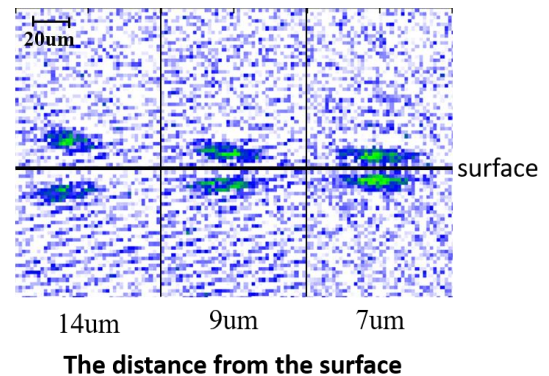


Fig. 1. Compression of atoms to the surface of the solid immersion lens by the accordion optical lattice.

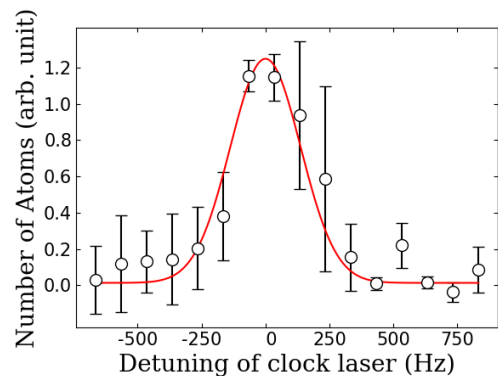


Fig. 2. Spectrum of clock transition spectroscopy for ^{171}Yb atoms in an optical lattice with a magic-wavelength.

超流動 ^3He の異方的 B 相における半整数量子渦

凝縮系理論研究グループ 丹下真希

Abstract In superfluid ^3He in anisotropic porous media, the half-quantum vortices (HQVs) have been discovered in not only the novel polar phase but also the anisotropic B phase lying at lower temperatures. We have numerically studied to what extent the HQVs can be stabilized in the polar-distorted B phase.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

超流動ヘリウム3の新奇超流動相として多孔質媒質での実現が理論的に提案されていたポーラー対状態[1]が、近年ネマティックエアロジェルと呼ばれる異方的多孔質媒質中の液体ヘリウム3で実現していることが確認された[2]。次いで、回転系のポーラー対状態で実現する量子渦は半整数渦(HQV)であることが実験的[3]にも、理論的[4]にも明らかにされた。さらに近年、ポーラー相のさらに低温下で実現する異方的な A 相や B 相でも HQV の実現が NMR 実験により見出された[5]。単独の HQV の実現は B 相ではトポロジカルに禁止されるため、これは奇妙な結果である。実験ではポーラー相で実現した HQV 対(ペア)が昇温、降温でも位置を変えないため、実現した HQV 対がエアロジェルの線状の構造により強くピン止めされたためと結論された[5]。そこで本研究では、異方的 B 相 (polar-distorted B (PdB) 相) で HQV が本質的にどの程度安定なのかを理論的に研究した。

数値計算を実行するにあたって、ネマティックエアロジェルの強い異方性をモデル化するために不純物散乱の異方性が弱いモデル[1]を異方性が十分強い場合を包含する内挿モデルを導入した。そして、フェルミ液体補正も考慮した形に GL 自由エネルギーを微視的計算により導出し、数値的に異方性の強い不純物散乱下で起こるポーラー相と PdB 相での渦の安定性を渦糸がエアロジェルの一軸異方性の異方軸に沿って伸びていると仮定して解析した。その際に、バルクの超流動ヘリウム3の B 相で安定な量子渦の芯構造が HQV 対とみなせる事実を用いた。解析の結果、異方性が弱く、バルクのヘリウム3での量子渦に近い芯構造(下左図)とは異なり、異方性が増大すると、HQV 対を形成する秩序変数はロンドン極限でよく記述されることが分かった(下右図)。さらに、異方性が増大すると 2 つの HQV はより離れ、特にポーラー相と PdB 相の間の転移温度に近づくとき HQV 間の分離は巨視的になる。しかし、転移温度から温度を下げていくとプラナースtringの張力の増大を伴ってこのサイズは急速に縮んでしまう。これは PdB 相の十分低温下では巨視的な HQV 対は本質的に安定ではなく、エアロジェルの線状欠陥によるピン止めで安定化するという描像[5]を正当化することを意味している。

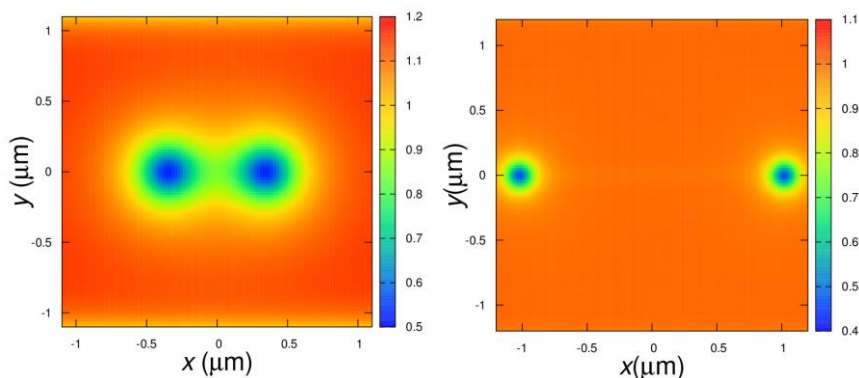


Fig. 1. Spatial profiles of the order parameter amplitude in (a) weakly anisotropic and (b) strongly anisotropic cases.

References

- [1] K. Aoyama and R. Ikeda, Phys. Rev. B **73**, 060504(R) (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] N. Nagamura and R. Ikeda, Phys. Rev. B **98**, 094524 (2018).
- [5] J. T. Makinen et al., Nature Communication **10**, 237 (2019).
- [6] M. Tange and R. Ikeda, arxiv:1912.00897.

流体力学領域における非従来型輸送応答に関する研究

凝縮系理論研究室 兎子尾理貴

Abstract Motivated by the recent observation of noncentrosymmetric hydrodynamic metals, we formulate an emergent hydrodynamic theory for them, which reveal a variety of anomalous hydrodynamic transport, such as anomalous edge current and asymmetric Poiseuille flow, quantum nonlinear Hall effect. We also propose several experimental setups to observe them.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、「流体力学物質 (hydrodynamic materials)」と呼ばれる新しいクラスの物質群が、様々な超純良金属 (graphene, PdCoO₂, WP₂ 等) において実現していることが明らかになった[1-3]。これらの系では、不純物・フォノン散乱などの運動量緩和散乱が強く抑制された結果、電子系のダイナミクスにおいて電子-電子散乱が最も支配的な散乱プロセスとなり、その時間発展は流体力学理論によって有効的に記述されるようになる。実際、このような兆候がメゾ系での「負の非局所抵抗・磁気抵抗」[3, 4]や電荷中性点近傍の graphene での「Wiedemann-Franz 則の破れ」[5]などを通して実験的に確認されており、実験と理論の両面から多くの注目を集め始めている。特に、近年実現した Noncentrosymmetric な電子流体物質 (bilayer-graphene, WP₂, GaAs 等) は空間反転対称の破れに伴う有限の Berry 曲率に起因して、これまでにない異常な電子ダイナミクスが実現すると予想されるが、これらの結晶対称性・幾何学的性質の効果が電子流体力学にどのような修正を及ぼすのかは未だ明らかになっていない。

そこで、本研究では空間反転対称が破れた金属における流体力学理論の定式化し、電子流体力学と結晶対称性・Berry 曲率との関係性を初めて明らかにした。そこでは、ミクロな Bloch 波動関数をもつ幾何学的性質が流体スケールにおいて異常な駆動力として現れ、これまでにない様々な異常輸送現象 (異常エッジ電流、非対称性 Poiseuille flow、量子非線形 Hall 効果) を創発させることが予言される。特に興味深いのは、これらの系において (Quark-gluon plasma 等の Chiral 流体で起こるとされている) “カイラル渦効果” が一般化された特殊な輸送応答 (Generalized vortical effect: GVE) が発現する点であり、これは「Noncentrosymmetric な金属中の電子流体」と「真空中の Chiral 流体」との間に非自明なアナロジーが成り立つことを示している。本発表では、これらの現象に対して直観的な説明を与えると同時に、点群的な議論を通して、これらを実験的に観測するためのセットアップを提案する。

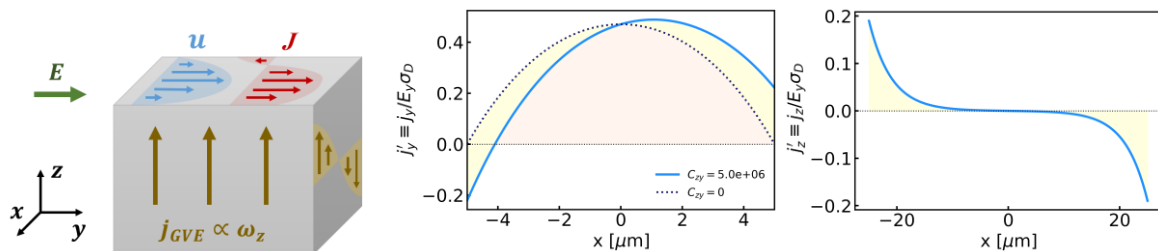


Figure. 1: (Left) Schematic picture of the asymmetric Poiseuille flow and anomalous edge current induced by the GVE in a 3D samples with finite width. (Middle) Plot of the normalized current profiles $j_y'(x)$ in “asymmetric Poiseuille flow”. (Right) Plot of the normalized z -directed current profiles $j_z'(x)$, so-called “anomalous edge current”.

References

- [1] P. J. W. Moll, et al., Science **351** 1061 (2016).
- [2] R. K. Kumar, et al., Nat. Phys. **13** 1182 (2017).
- [3] J. Gooth, et al., Nat. Comm. **9** 4093 (2018).
- [4] P. S. Alekseev, Phys. Rev. Lett. **117** 166601 (2016).
- [5] J. Crossno, et al., Science. **351** 6277 (2016).

光格子中 SU(N)冷却フェルミ気体における量子磁性の観測

量子光学研究室 西澤直樹

Abstract We investigated the quantum magnetism of an ultracold fermi gas with SU(N) symmetry trapped in optical lattices. In particular, we successfully observed the short-range spin correlation of SU(N = 2,4,6) spin system in uniform lattices and superlattices. We also measured the dynamics of spin correlation under 2-body loss.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

強相関電子系に関わる重要な問題の一つに量子磁性がある。ハバード模型の2次摂動として導かれるスピン交換相互作用によってカップルした量子スピン多体系において、磁性がどのように発現するかということについて長く研究されてきた。こうした量子多体問題は次元が上がると厳密に解くことが難しく、また数値計算においても計算量がサイト数に応じて指数的に増加するため解析が困難であることが知られている。その一方で、光格子中の冷却原子系でハバード模型を精度よくシミュレートできることから、量子磁性は冷却原子実験における重要なテーマの一つとなっている。近年では量子気体顕微鏡を用いた反強磁性長距離秩序の直接観測が報告されている[1]。

また我々の研究グループでは ^{173}Yb が核スピン $I = 5/2$ に由来したSU(6)対称な斥力相互作用をもつことに着目し、 ^{173}Yb 冷却原子気体を光格子に導入した高いスピン自由度を持つ系を用いて研究を行っている。最近ではSU(N = 2,4)スピン系を二重井戸光格子に導入し、短距離量子磁性に対しスピン自由度が及ぼす影響について報告した[2]。

本研究ではSU(N)スピンを持つ ^{173}Yb フェルミ縮退気体を光格子に導入し隣接サイト間のスピン相関を測定した。具体的には、スピンに依存したポテンシャル勾配を加えることによってspin singlet - triplet状態間にコヒーレントな振動(Singlet-Triplet Oscillation, STO)を誘起し、その振動を解析することでスピン相関を定量的に評価した(Fig. 1)。

1次元および3次元の一様系におけるスピン相関をエントロピーや相互作用を変えて系統的に測定した実験では、エントロピーが大きくなるにつれて相関が消失していく振る舞いが明瞭に観測された。また3次元系に比べ1次元系ではより大きな反強磁性相関が得られた。これは1次元系では結合の弱いリンクが系のエントロピーを担うことで、1次元方向に沿った結合の強いリンクにおける相関が強められたからだと解釈できる。

また、plaquette光格子(Fig. 2)と呼ばれる光超格子にSU(N = 2,4,6)スピン系を導入した場合、単位胞のplaquetteにおける基底状態はSU(2)ではs波RVB状態である一方、SU(N = 4,6)の場合はSU(4) singlet状態である。この差に起因し、観測されるスピン相関にも差が生じることが期待される。本研究では孤立したplaquetteにおけるハバード模型に対して厳密対角化計算を行い、実験結果との比較を行った。

さらにごく最近、散逸のあるフェルミ・ハバード模型では励起状態が長い寿命を持つことによって強磁性的相関が安定化するという理論的指摘があった[3]。そこで我々は二重井戸格子に対し光会合による2体ロスを導入してスピン相関の測定を行った。その結果、ロスを入れるに伴ってスピン相関が反強磁性的から強磁性的へと変化するダイナミクスを観測することに成功した。

References

- [1] A. Mazurenko *et al.*, Nature **545**, 462 (2017).
- [2] H. Ozawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 22 (2018).
- [3] M. Nakagawa *et al.*, arXiv: 1904.00154 (2019).

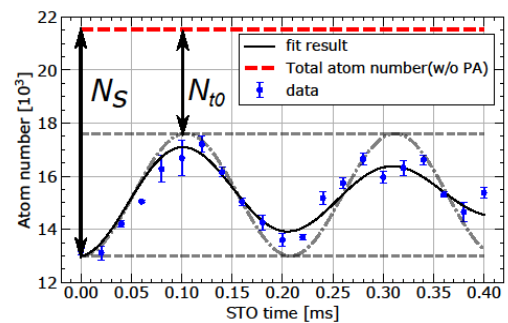


Fig. 1 Typical STO signal of SU(2) spins. The solid curve is a fit result. N_S (N_{t0}) means the number of atoms which form spin singlet ($S_z = 0$ triplet) states.

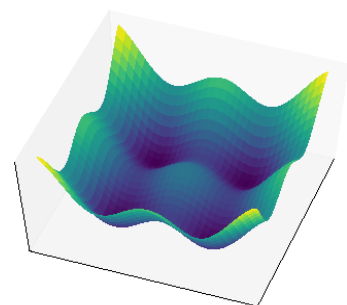


Fig. 2 Unit cell of an optical plaquette lattice.

幾何学的ポンプの理論的研究： ゆらぎの関係式，非断熱操作，熱機関の効率

物性基礎論：統計動力学研究室 樋野佑樹

Abstract We study geometrical pumping processes. First, we derive two types of fluctuation relations for an adiabatic pumping. Second, we develop the analysis of non-adiabatic pumping. Third, we extend the geometrical formulation of a heat engine driven by adiabatic pumping and derive a trade-off relation between power and efficiency.

微小系の非平衡現象に幾何学ポンプという輸送現象がある。幾何学ポンプとは系のパラメータを周期的にゆっくりと操作することによって，平均バイアスがなくても正味のカレントが生じるというもので，Thouless が孤立量子系で提案した [1]。また彼は，ポンプのメカニズムはパラメータ空間のベリー位相という幾何学的な位相に起因することも示した。この理論は後に量子および古典開放系に拡張された[2]。このような幾何学的ポンプについて，古典マスター方程式に従う系において3種類の研究を行なった。

(1) **ゆらぎの関係式** [3] 幾何学的ポンプにおいては，幾何学的位相の存在によってゆらぎの定理が破れることが Ren らによって指摘された [4]。本研究では完全計数統計とマスター方程式を用いてカレントの分布を計算することで，二種類のゆらぎの関係式を導いた。また得られた結果をスピنبソンモデルに適用することで分布が非ガウス性を持つこと，さらにこの非ガウス性によって揺動散逸定理などに補正項が現れることを示した。

(2) **非断熱制御** [5] 幾何学的ポンプは断熱近似，つまりパラメータ操作が非常に遅いと仮定して定式化された。従って有限速度で操作した際に断熱近似がどの程度有効かは非自明ではない。また摂動展開を用いて非断熱へと拡張する研究は行われてきたが，断熱の時のような幾何学的な定式化はなされていなかった。本研究ではマスター方程式の非断熱解を導出し，それを用いて非断熱カレントが幾何学的にかかることを示した。また有限速度の操作でも大きなカレントを得るために断熱ショートカットを用いてカレントを制御する方法を構成した。

(3) **熱機関の効率** [6] Brandner and Saito は単一の熱浴に接する微小な熱機関を幾何学的に定式化することでパワーと効率のトレードオフを示した[7]。本研究ではこれを二つの熱浴に接する系に拡張することで，幾何学的ポンプを熱機関として用いる際のパワーと効率の不等式を示した。

References

- [1] D. J. Thouless, Phys. Rev. B **27**, 6083 (1983).
- [2] N. A. Sinitsyn and I. Nemenman, Europhys. Lett. **77**, 58001 (2007).
- [3] Y. Hino and H. Hayakawa, arXiv:1908.10597(2019)
- [4] J. Ren, P. Hänggi, and B. Li, Phys. Rev. Lett. **104**, 170601 (2010).
- [5] K. Fujii, H. Hayakawa, Y. Hino and K. Takahashi, arXiv: 1909.02202(2019)
- [6] Y. Hino and H. Hayakawa, in preparation.
- [7] K. Brandner and K. Saito, arXiv:1907.06780 (2019).

エネルギーが保存する決定論的熱伝導系での変分原理

非線形動力学研究室 渡邊雄也

Abstract We study energy-conserving deterministic heat conduction in one-dimensional classical systems driven by fictitious forces. We specify the forces by assuming the form of the entropy production, and derive the steady-state distribution. Moreover, by employing Fourier's law, we extend the principle of maximum entropy to steady heat conduction.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

「大自由度決定論的古典力学系により時間発展が記述される断熱系に対して、その部分系のエネルギーの最も確からしい値は何か。」という問を考える。系が平衡状態にある場合は、等重率の原理によって系の力学変数がミクロカノニカル分布に従うと仮定される。そしてこの帰結として、部分系のエネルギーの最も確からしい値は、系のエントロピーを最大にする値として決定される。この結果は平衡熱力学におけるエントロピー最大原理そのものであり、熱力学の基本法則により導出される。非平衡系でも上記の問を考えたい。エネルギーが保存する孤立ハミルトン系において平衡状態のエントロピー最大原理が定式化されることを踏まえて、本研究ではエネルギーが保存する決定論的熱伝導定常状態における変分原理を定式化する。

1 次元格子上的の各サイトに定義されたスカラー変数と運動量が決定論的に時間発展する古典力学系を考察する。境界に仮想的な外力を導入することで、エネルギーが保存する熱伝導定常状態を実現させる。そして、エントロピー生成率の力学表現と熱力学表現が一致するという条件を課すことにより、具体的な外力の形を決定する。その結果、格子上決定論古典力学系において、境界で熱流を一定にする条件を課す設定と定まる。

系のダイナミクスが定まったので、初期時刻にて系の力学変数の確率分布を与えた下での定常分布の表現を求める。ある有限時刻における系の力学変数の確率分布は、系のエントロピー生成を用いて表すことができる。この表現はゆらぎの定理[1]と密接な関係にあり、Zubarev[2]や McLennan[3]による古典ハミルトン系の解析においても同様の表現が得られている。また、確率過程においてはこの表現の明晰な定式化が可能である[4]。しかし、一般に決定論的力学系ではエントロピー生成の長時間極限が存在しないことから、確率分布の長時間極限は存在しない。本研究においては、物理量の期待値の長時間極限が一致する確率分布の存在と一意性を仮定し、これを定常分布とする。

定常分布の表現に基づいて、部分系のエネルギーの最も確からしい値を計算する。まず、線型応答領域においてはエントロピーに修正項を付加した関数を最大化するように部分系のエネルギーの最も確からしい値が決定される。以下、エントロピーに修正項を付加した関数を修正エントロピーと呼ぶ。ただし、修正エントロピーがエントロピー生成率の時間積分を含むことから、一般に修正エントロピーの関数形を明示的に求めることはできず、このままでは部分系のエネルギーの最も確からしい値を計算することは困難である。しかし、本研究の設定の下では、エントロピー生成率が局所的に定義された温度の差で表されることから、フーリエの熱伝導則を導入してエントロピー生成率を変形することができる。更にエネルギーの連続方程式も用いると、エントロピー生成率を局所的に定義されたエネルギーの時間微分を用いて表すことができるので、修正エントロピーから時間積分を消去することができる。以上のように、エネルギーが保存する系での決定論的熱伝導における変分原理を定式化した。

References

- [1] D. J. Evans, E. G. D. Cohen, G. P. Morriss, Phys. Rev. Lett. **71**, 2401 (1993)
- [2] D. N. Zubarev, *Nonequilibrium Statistical Thermodynamics* (Consultants Bureau, New York, 1974)
- [3] J. A. McLennan, Phys. Rev. **115**, 1405 (1959)
- [4] G. E. Crooks, Phys. Rev. E. **60**, 2721 (1999)

液体テルルの X 線コンプトン散乱測定

不規則系物理学研究室 櫻澤智大

Abstract X-ray Compton scattering measurements of liquid tellurium (Te) were performed using synchrotron radiation. Narrowing of the valence Compton profile (VCP) was observed with increasing temperature. The analysis assuming the VCP consists of conduction and non-conduction electron contributions revealed that metallic nature in liquid Te was enhanced as the temperature increases.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

テルル(Te)とセレン(Se)はカルコゲンに属する元素であり、固体状態では共に半導体的な電気伝導性を示す。結晶構造も類似しており、2 配位らせん鎖が規則的に並列して三方晶をなしている。しかし液体 Te は金属的な電気伝導度を示し、融解しても半導体的性質を示す Se とはその性質が大きく異なる。さらに通常の金属と異なり、温度上昇に伴って電気伝導度は増大し、融点付近で熱膨張率が負の値を取るなど、特異な性質を示す。Cabane らは液体 Te 中では非金属的な 2 配位 Te と、金属的な 3 配位の Te が均一に混在するモデルを提唱し、温度上昇とともに 3 配位 Te の割合が増大するとして、その特異的な性質を説明した[1]。さらに Tsuchiya らは 2 配位、3 配位 Te は不均一に混在するとしたモデルを提唱し、液体 Te の熱力学特性を説明した[2]。

液体の配位数は、動径分布関数の第 1 ピークの面積から求められる。しかし液体 Te の中性子散乱実験[3]から得た動径分布関数は第 1、第 2 ピークの重りが著しく、配位数を正確に見積もることが困難とされている。Bichara ら[4]はモンテカルロシミュレーションを行い、配位数を見積もったが、結果は実験とは異なっている。構造研究例が多い一方で、液体 Te の電子状態に着目した実験的研究は少ない。そこで本研究では、液体 Te の X 線コンプトン散乱を通じて、電子状態およびその結果に基づく構造に関する知見を得ることを目的とした。

X 線コンプトン散乱測定では、物質中の電子の運動量分布を 1 次元投影したコンプトンプロファイル(CP)が得られる。実験は SPring-8 の BL08W において行った。エネルギー 115.6 KeV の X 線を入射し、散乱角 165° に出射した 70–90 KeV の X 線を検出した。融点付近の 500°C から 800°C の液体 Te に対して測定を行った。

Fig. 1(a) は実験から得た各温度の価電子 CP (VCP) を示し、(b) は 500°C の CP を基準とした差分である。VCP は温度上昇に伴って徐々に逆パラボラ形状(自由電子ガスモデルの CP) に近づくことが判明した。我々は液体 Te の VCP を、伝導電子(自由電子)と非伝導電子の寄与に分離できると仮定し、自由電子ガスと固体 Te の CP の線形結合によって液体 Te のモデル CP を求めた。実験の VCP を、このモデル CP でフィッティングし、価電子中の伝導電子の割合を求めた。1 つの伝導電子が 3 配位 Te から生じるとする仮定のもと、液体 Te の金属化における重要な因子である配位数を見積もった。発表では先行研究の中性子散乱実験やシミュレーションから求めた配位数との比較による議論を行う。

References

- [1] B. Cabane and J. Friedel: Journal de Physique **32** (1971) 73.
- [2] Y. Tsuchiya and E. F. W. Seymour: J. Phys. C: Solid State Phys. **18** (1985) 4721.
- [3] A. Menelle: Europhys. Lett. **4** (1987) 705.
- [4] C. Bichara, J. Raty, and J. Gaspard: Phys. Rev. B **53** (1996) 206.

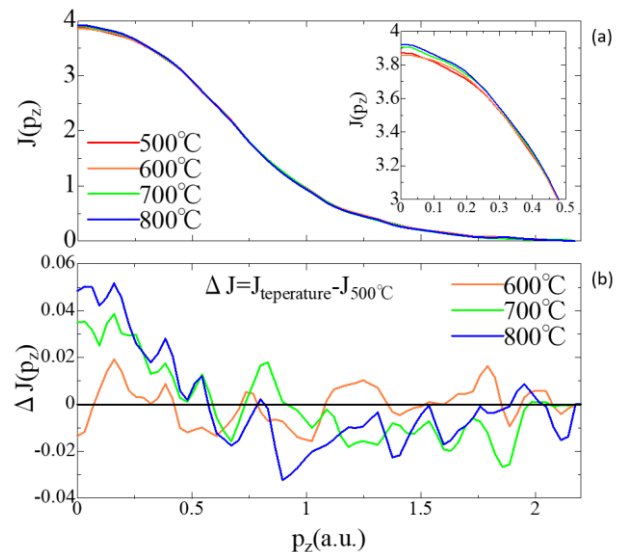


Fig. 1. (a) Experimental valence Compton profiles (VCPs) of liquid tellurium. (b) Difference between VCPs at elevated temperature and VCP at 500°C .

モット絶縁体 1T-TaS₂における高次高調波発生

光物性研究室 中野愛子

Abstract We observed high-harmonic generation from 1T-TaS₂ both in metallic nearly-commensurate CDW state and Mott-insulating commensurate CDW state in addition to the thermal emission from hot carriers. We found the enhancement of 5th harmonic intensity in the Mott-insulating state.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

高次高調波発生 (HHG) は高強度レーザー光を物質に照射すると励起光の整数倍の振動数をもつ光が発生する非線形光学現象であり、原子系や分子系について研究され、アト秒パルスの光源に応用されてきた。固体における HHG には原子系では見られないようなバンド構造や電子状態を反映した特異な偏光選択則[1]や異方的な応答[2]を示すことが報告されており、電子状態を解明する有用な手法として、半導体や金属などの固体における HHG が研究されている[3]。理論的には電子間相互作用が小さいと仮定して一電子近似を用いて電流や分極の時間変化から放射スペクトルを計算する方法が用いられている。

本研究は、一電子近似が成り立たない強相関電子系の電子状態を解明する手法として HHG を応用した。強相関電子系における HHG のメカニズムについて理論モデルは提案されているが[4]、実験研究はほとんど行われていない。本研究では、モット絶縁体における HHG の発生機構の解明を目的とする。

我々は、モット絶縁体の中から遷移金属ダイカルコゲナイドである 1T-TaS₂ に着目した。1T-TaS₂ の基底状態は格子整合な電荷密度波(CDW)が生じることにより電子が局在しモット絶縁相 (MI) となる。温度を変えながら HHG を測定することにより、金属相とモット絶縁相の HHG スペクトルを比較した。

Fig. 1 に赤外の超短パルスによる強励起下でのスペクトルを示す。1.3eV 付近に 5 次高調波のピークがあり、高エネルギー側にブロードな放射が存在することがわかった。Fig. 2 に 5 次高調波強度の温度依存性を示す。金属相からモット絶縁相に転移する領域でヒステリシスを伴う HHG 強度の変化が見られ、MI 相で 5 次高調波の強度が約 2 倍に増加することがわかった。これらの実験結果から、強電子相関系である 1T-TaS₂ における HHG のメカニズムについて議論する。

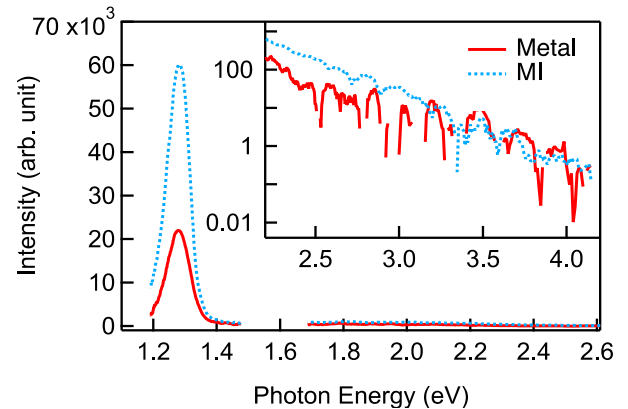


Fig. 1 Emission spectra from metallic state (red solid line) and Mott-insulating state (blue dotted line) under excitation with intense infrared laser (photon energy: 0.26 eV, peak intensity: 600GW/cm²).

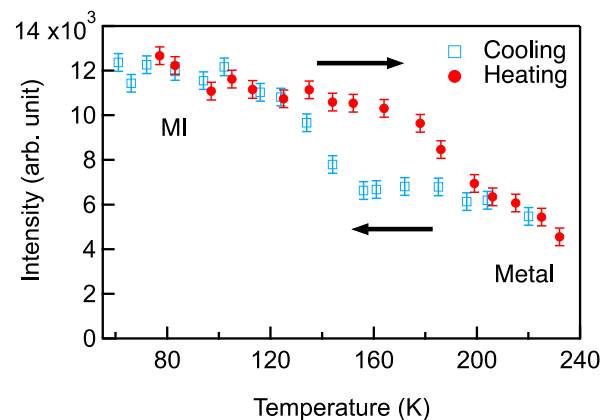


Fig. 2 Temperature dependence of 5th harmonic intensity from 60K (Mott insulating state) to 230K (metallic state.)

References

- [1] N. Yoshikawa *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 1, 3709 (2019).
- [2] Y. S. You *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 345 (2016).
- [3] Ghimire S *et al.*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys* **47** 204030 (2014).
- [4] R. E. F. Silva *et al.*, *Nat. Photonics.* **12**, 5, 266 (2018).

非平衡熱力学と整合するキネシンの確率過程模型

非線形動力学研究室 西村和真

Abstract In order to understand the design principle of molecular motors, we propose a stochastic model describing the motion of kinesin. By numerical simulation, we find that kinesin moves to the opposite direction when a parameter value is changed. We also discuss how the extent of internal dissipation depends on parameters.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

分子モーターとは生体中に存在するタンパク質の一種で、アデノシン三リン酸（ATP）加水分解反応やイオン濃度勾配からエネルギーを得て細胞内輸送・ATP合成など生命活動に不可欠な役割を担う。キネシンはそうした分子モーターの一種であるが、近年の実験[1]によりATP分解反応によって得られる自由エネルギーの約80%はキネシン内部の構造変化などによって環境に散逸されていることが分かった。このように一見してエネルギーの無駄遣いをしているようなキネシンであるが、現在の姿に至るまでになにかしらの目的に最適化しようとして進化を重ねてきたはずである。また細胞内物質で混雑しているはずの生体内環境で、生体外と比べキネシンの速度が大きいという実験結果[2]もある。こうした事実を踏まえキネシンの設計原理を理解することを最終的な目標に、キネシンの確率過程模型の性質を調べた。

これまでキネシンは様々な数理モデル[3]で議論され、実験との定量的な比較もされている[1]。しかしいずれのモデルもATP合成反応が考慮されていない、また考慮されていても熱力学的な要請がなされていないなどキネシンの運動・エネルギー論の両方を議論できるものではなかった。そこで本研究では[1]で議論されているモデルに局所詳細釣り合いを要請したモデルを提案する。キネシンモーターの座標 x_m は連続時間マルコフ連鎖、キネシンにつなげられたプローブの座標 x_p はランジュバン方程式に従うとする。モーターはキネシンの内部状態の遷移に伴い移動し（FIG.1）、それぞれの遷移率の組に局所詳細釣り合いを要請する。これによって内部状態の遷移に伴い熱浴に散逸される熱 Q_m を議論することができる。モーターとプローブの相互作用 $U(x_m, x_p)$ はばね定数 k の調和振動子ポテンシャルとした。このモデルの定常状態での物理量の各パラメータ依存性を調べるため数値計算を行った。

数値計算の結果、パラメータ値を実験結果と整合するようになると、インプットエネルギーのうち Q_m が占める割合は約91%となり、ほとんどがキネシンの内部で散逸されていることが分かった。ただし、 k を大きくすると Q_m の割合は約21%まで小さくなり、先程とは逆にインプットエネルギーの大部分がプローブの運動によって散逸されるようになる。また、 k がある値を超えるとモーターが微小管の向きと逆方向に進みはじめる現象を見出した（FIG. 2）。これはストールフォースが k に依存することを意味し、実験に対する新しい予言を与える。

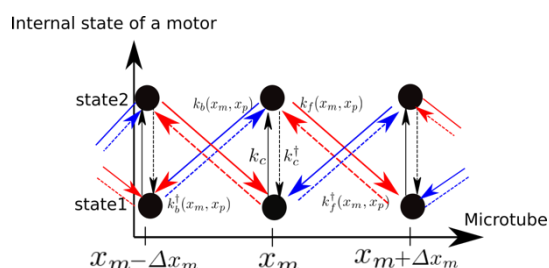


FIG. 1 Schematic of Kinesin's internal state

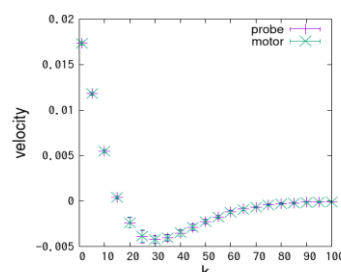


FIG. 2 k dependence of steady-state velocity

References

- [1] T. Ariga, M. Tomishige and D. Mizuno, Phys. Rev. Lett. **121**, 218101 (2018).
- [2] J. L. Ross, Biophys J. **111**, 111909 (2016).
- [3] S. Liepelt and R. Lipowsky, Phys. Rev. Lett. **98**, 258192 (2007).

高分子溶液系における粘弾性相分離の構造形成過程

相転移動力学研究室 林 佑炫

Abstract The dynamics of viscoelastic phase separation in polymer solutions is studied by means of molecular dynamics simulations. Immediately after quench, several blobs are created inside each chain as intra-chain interaction dominates. Then, the transient gel is formed by aggregation of these blobs while weak inter-chain contacts are disconnected. © 2020 Department of Physics, Kyoto University

流体系の相分離は一般的に model H [1]によって説明できると考えられていたが、高分子溶液系を代表とする複雑流体系において深くクエンチした時に、従来の理論で説明できない相分離現象が発見された。その起源は、成分間の大きな動的性質の違いであると考えられ、粘弾性相分離と呼ばれている[2]。ネットワーク構造や相分離が一時的に停止する Moving droplet phase (MDP), 相分離初期の過渡的ゲル状構造の形成など、特異な相分離構造が確認されたが、その粗大化ダイナミクスや過渡的ゲル状構造の形成過程、高分子の絡み合いや引力の効果など、未解明の部分も多いことが現状である。

本研究では、分子動力学シミュレーションによって、高分子溶液系における粘弾性相分離の構造形成と粗大化ダイナミクスなどを調べた。高分子の分子モデルは bead-spring model (Kremer-Grest model) を用いた[3]。セグメント数 $N = 200$, モノマー数密度 $\rho = 0.02 - 0.2$ の範囲とし、全粒子数密度は 0.8 とした。相分離は、同成分間に引力を与えることで開始させた。

Fig. 1. (a) に相分離の様子を示す。高分子密度が大きい場合、高分子鎖間の相互作用が激しく、ネットワーク構造が形成した。低密度においては、ドロップレット構造が形成され、独立したドロップレットたちは衝突しても簡単には一つのドメインに集合しない現象を見せた。これは希薄溶液でより顕著になり、相分離が停止する MDP が観測された。Fig. 1. (b) は高分子鎖の平均慣性半径の時間変化である。相分離開始直後、高分子鎖は鎖内の相互作用によって鎖内部に複数の blob を形成しながら縮み、慣性半径が急激に減少している。続いて、異なる高分子鎖間の blob たちがかたまりを作ることで過渡的ゲル状構造が形成される。ここで、複数のかたまりに属する高分子は、高分子鎖間の相互作用によって大きく引き伸ばされ、平均慣性半径の増加を引き起こす。慣性半径の分布を調べた結果、高分子密度が高い系において、高分子鎖が引き伸ばされる現象が顕著になっていることが確認できた。次に、相分離初期の過渡的ゲル状構造の形成過程における高分子間の接触の振る舞いを調べた。絡み数 (linking number) が高いほど、そして接続間の距離が短く大きい引力が働いているほど、接続が存続する割合が高くなっていることから、強い接触が形成されていると言える(Fig. 1. (c))。本研究における長さ・時間スケールを現実のスケールに換算すると、最大の相分離構造は約 35 – 85nm, 相分離の進行時間は約 120 μ s 以下であり、本研究は実験的なアクセスが難しいミクロな領域に対応していると考えられる。今後、より大きなスケールのシミュレーションやミクロな構造の実験の研究などが期待される。

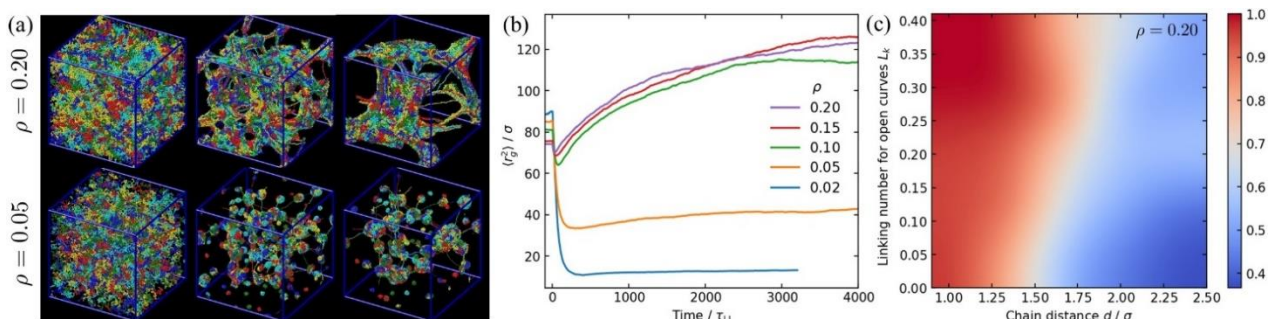


Fig. 1. (a) Snapshots of phase separation at $t = 0, 800, 2400 \tau_{LJ}$ from the left. (b) Mean-squared gyration radius. (c) Percentage of chain contacts that continue to exist between $t = 0 - 8 \tau_{LJ}$.

References

- [1] C. Hohenberg and B. I. Halperin, Reviews of Modern Physics **49**, 435 (1977).
- [2] H. Tanaka, Journal of Physics: Condensed Matter **12**, R207 (2000).
- [3] Kremer and G. S. Grest, The Journal of Chemical Physics **92**, 5057–5086 (1990).

ファンデルワールス磁性体 CrI₃ 薄膜における磁気秩序

光物性研究室 大庭 健嗣

Abstract We investigated magnetic order in thin-film CrI₃ by magneto-optical Kerr effect microscopy and polarized Raman microscopy. We revealed the coexistence of ferromagnetic and antiferromagnetic interlayer spin coupling in 25 – 30 nm thickness region due to thinning effect in contrast to the bulk limit which has only ferromagnetic interlayer coupling. © 2020 Department of Physics, Kyoto University

ファンデルワールス層状物質はシート状の原子層がファンデルワールス力により積層した物質群であり、単一原子層状態では次元性の変化によりバルク状態とは大きく異なる物性を示すことが知られている[1,2]。近年、それらの一つの物質群であるファンデルワールス磁性体において、単一原子層から数層の原子層薄膜における磁気秩序の観測が報告されている。中でも CrI₃ は、バルク状態では原子層内、層間ともにスピンの強磁性的に結合したキュリー温度 61 K の強磁性体であるのに対し、原子層薄膜においては層間の結合が反強磁性的となる特異な薄膜化効果が報告された[3]。しかし、原子層薄膜とバルク状態の中間領域における磁気秩序については未解明であり、先述の薄膜化効果がどの程度の膜厚で起こるのかは非自明である。そこで本研究では、原子層薄膜とバルクの中間領域にあたる膜厚 25 – 30 nm 程度の薄膜における磁気秩序の解明を目的とした。測定には機械剥離により作製した複数の CrI₃ 薄膜を用いた。試料サイズが数十ミクロン四方であるので、磁気特性の評価手法としては顕微磁気 Kerr 回転 (以下 MOKE) を用いた。また、同一測定点において顕微偏光分解ラマン測定を行うことにより層間の結合状態を調べた。

代表的な試料として、Fig. 1 に試料 a (膜厚 28.5 ± 2.5 nm)、試料 b (膜厚 27.5 ± 1.5 nm) における MOKE 信号を示す。試料 a においては磁場 ± 0.2 T 以内におけるヒステリシスが確認された。したがって、試料 a では原子層内および原子層間の強磁性的な結合によって強磁性秩序を形成していると考えられる。一方試料 b においては、 ± 1 T 以内における軟磁性的なヒステリシスおよび ± 2 T における磁化の跳びが観測され、試料 a とは大きく異なる磁気秩序が示唆される。Fig. 2 に各試料の偏光分解ラマンスペクトルを示す。Cross、Parallel はそれぞれ偏光子と検光子が直交配置、平行配置であることを示す。CrI₃ は 129 cm^{-1} においてラマン活性であるフォノン (A_g モード) が存在し、常磁性相において平行配置では許容、直交配置では禁制であるが、磁気秩序が生じると時間反転対称性の破れによりラマン選択則が変化する。層間が強磁性的に結合している場合は平行配置だけでなく直交配置においても A_g モードが許容となる一方で、層間が反強磁性的に結合している場合は空間反転対称性の破れにより、常磁性相・強磁性相において禁制であった 126 cm^{-1} におけるパリティ奇のフォノンモードがラマン活性となる[4]。したがって、試料 a (0 T) の結果は層間の強磁性的結合、試料 b (0 T) の結果は層間の反強磁性的を示唆する。また、試料 b (2.1 T) における結果は試料 a (0 T) における選択則と一致している。これは磁場誘起の層間反強磁性－強磁性転移が起きたことを示唆している。さらにラマンスペクトルの磁場依存性を調べることで、MOKE 信号における 2 T の磁化の跳びがこの磁気相転移に対応すること、試料依存性を調べることで膜厚 25 – 30 nm の薄膜において強磁性相と反強磁性相が共存することを明らかにした。

References

- [1] K. S. Novoselov *et al.*, Nature **438**, 197 (2005). [2] A. Splendiani *et al.*, Nano Lett. **10**, 1271 (2010). [3] B. Huang *et al.*, Nature **546**, 270 (2017). [4] Y. Zhang *et al.*, Nano Lett. **20**, 729 (2020).

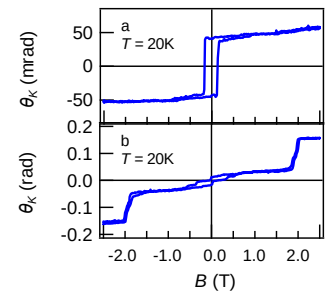


Fig. 1 Magnetic field dependence of polar MOKE signals of sample a and b.

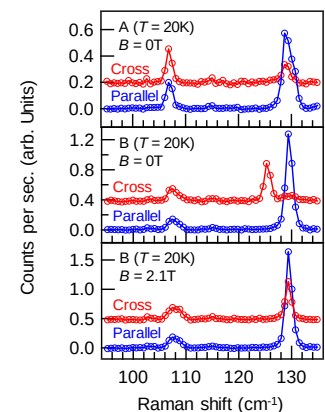


Fig. 2 Polarized Raman spectra of sample a ($B = 0$ T), b ($B = 0$ T) and b ($B = + 2.1$ T).

リアルタイム分散関係 DLS 測定法の試作と N-I 二次相転移の臨界現象

ソフトマター物理学研究室 岡田 知治

Abstract -We design and construct the real-time multi-angle dispersion relation DLS measurement system. We succeed in measuring the director fluctuation and local order parameter fluctuation. Furthermore, we measure the dispersion relation near second order N-I phase transition, and investigate the cross-over behavior between the director and the order parameter fluctuations.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

動的光散乱法を用いて、ネマチック相の配向揺らぎなどによる散乱光の揺らぎの散乱角依存性、つまり、分散関係を測定すると、内部の自由度の運動に関するスピード（時間）とスケール（空間）関係を知ることができる。分散関係を実験的に観測するとき、従来の動的光散乱の装置では、散乱ベクトルを変化させながら、複数回の測定を繰り返す必要がある。このため、多大な測定時間を要するとともに、観測の同時性が失われてしまいます。そのため、本研究では、散乱光の時間相関の角度依存性を、同時に観測可能な光散乱光学系と検出系を設計・試作し、リアルタイムに分散関係を計測する装置を完成させ、その原理の検証を行った。また、Nematic (N)-isotropic (I) 二次相転移を示す、新奇なリोटロピックネマチック相において、二次相転移近傍の臨界現象のメカニズムの解明を試みた。

試作した装置を Fig. 1 に示す。試料からの散乱光が CCD カメラのイメージセンサー上で波数空間における像を結ぶように、光学系が設計されている。装置の検証は 5CB、7CB の配向揺らぎの観察によって行った。Fig. 2 に 5CB の分散関係を示す。その結果、新しく設計・開発したリアルタイム分散関係測定装置は、正しく 5CB、7CB の配向揺らぎの分散関係を計測できていることが確かめられた。

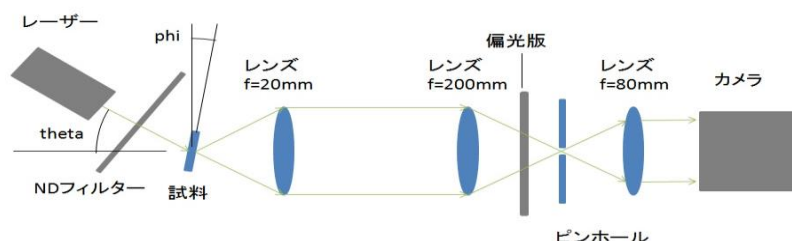


Fig.1 Optical setup of the real time multi-angle DLS

さて、ネマチック相における光散乱は主に配向揺らぎによって引き起こされ、緩和周波数は波数の -2 乗に比例する拡散モードの揺らぎである。一方、等方相による光散乱は主にオーダーパラメータの揺らぎによって引き起こされ、揺らぎが極小領域に局在するため波数依存性を持たない。一般のサーモトロピック液晶では N-I 相転移は一次であるため、上記 2 つの揺らぎを同時に観測することは難しい。しかしアニオン界面活性剤である SDS とカチオン界面活性剤である DTAB の混合水溶液が形成するリोटロピックネマチック相は、温度に依存して N-I 二次相転移を起こす。このため二次相転移近傍では、両者が結合した特異な臨界現象の存在が期待される。そこで、開発した、リアルタイム分散関係測定装置を用いて相転移点近傍で測定を行った。ネマチック相での分散関係を Fig. 2 に、等方相の分散関係を Fig. 3 にともに青丸で示す。両図から、ネマチック相による光散乱は波数依存性を持ち、等方相による光散乱は波数依存性をほとんど持たないことを確認した。また、N-I 二次相転移点近傍では配向揺らぎとオーダーパラメータの揺らぎが同時に観察される温度領域があることが分かった。

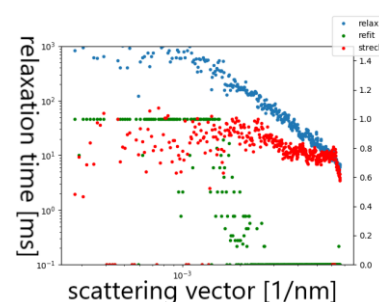


Fig.2 Dispersion relation in nematic phase

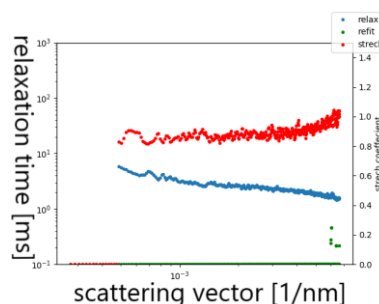


Fig.3 Dispersion relation in isotropic phase

核磁気共鳴による白金ナノ粒子の研究

固体量子物性研究室 奥野友則

Abstract In metallic nanoparticles, the energy levels become discrete because of quantum size effects (QSE). QSE has been investigated until now, but has not been distinguished from surface effects. In this study, we performed ^{195}Pt -NMR measurements on Pt nanoparticles. Surface-interior separation was succeeded and clear results suggesting QSE were obtained.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

単純なバルク金属の電子物性は連続的なエネルギーバンドで記述される。粒径の小さなナノ粒子においてはこのバンド描像は破れ、量子力学的な離散的な電子エネルギー準位が現れる。この離散的エネルギー準位により、物理量は低温でバルクと異なる振る舞いを示す。これを量子サイズ効果(QSE)、或いはこのことを初めて指摘した久保亮五[1]に因んで、久保効果と呼ぶ。QSEに関する実験は数多く行われてきたが[2]、我々の知る限り表面効果と直接的に区別された実験はない。ナノ粒子は表層の反応性がよいので劣化しやすいことや接触測定が不可能なことが原因の一部と考えられる。

核磁気共鳴(NMR)は原子核サイトごとの情報を得ることができる非接触かつ微視的な測定手段であり、ナノ粒子表層と内部の情報の分離が可能である。白金(Pt)はFermiエネルギーに d 電子に由来する大きな状態密度を持つ。 ^{195}Pt 核は核スピンの大きさが $I = 1/2$ であるため電氣的な結合をしないので、 ^{195}Pt -NMR測定は磁氣的性質を調べるのに適した測定である。さらに核磁気回転比が大きいのでNMR信号の観測が容易である。

我々は平均粒径 2.5, 4.0, 7.4, 9.8 nm のPtナノ粒子及びPtバルク(粒径数 μm)試料に対して、NMR測定を行った。試料表面はポリビニルピロリドン(PVP)という有機物で覆われており、酸化及びナノ粒子同士の接触を防いでいる。

Figure 1はPtナノ粒子のNMRスペクトルをナイトシフト K に対して表示したものである。ナイトシフトは局所的磁化率と関係し、 $K = 0$ からのシフトが局所磁化率の大きさに比例する。バルクの試料では鋭い信号が観測され、PVPで覆った影響は見られなかった。ナノ粒子では幅の広いスペクトルが観測され、粒径を小さくすると $|K|$ の小さな信号が強くなり、 $|K|$ の大きな信号は弱くなった。ここから、それぞれの信号はナノ粒子の表層、内部に由来すると考えられ、表層と内部の信号の分離に成功した。

表層内部それぞれの核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ を測定すると、 $1/T_1$ が低温で増大した後減少するバルクと異なる異常な振る舞いを示した。この異常の特徴的温度は表層内部にかかわりなく同じであり、異常が表面効果でないことを示す。さらに特徴的温度はナノ粒子のサイズに依存し、その依存性は理論的から予言されるQSEのエネルギーとよくスケールした。

References

- [1] R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn. **17**, 975 (1962).
- [2] W. P. Halperin, Rev. Mod. Phys. **58**, 533 (1986).
- [3] T. Okuno *et al.*, submitted to Phys. Rev. B.

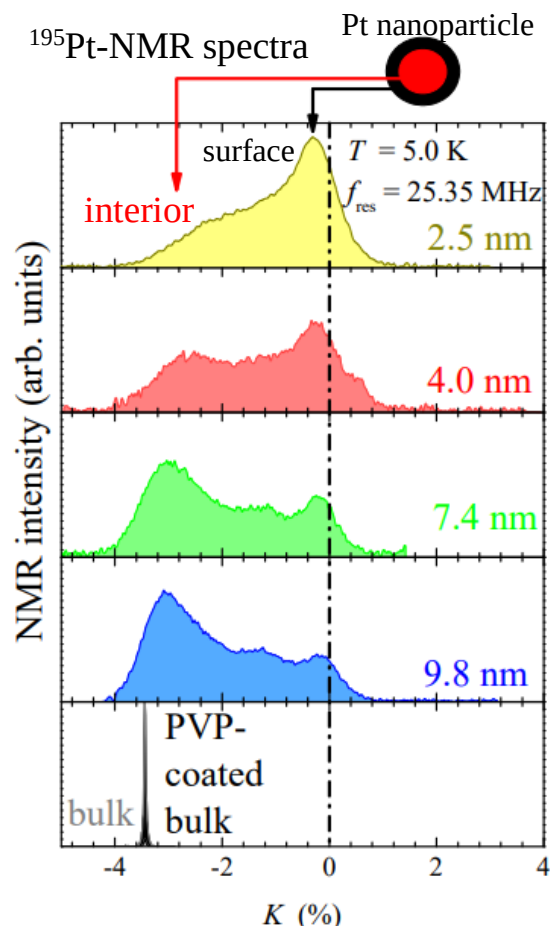


Fig. 1. ^{195}Pt -NMR spectra of the Pt nanoparticles with various diameters and bulk sample measured at 5.0 K. The black and red arrows show the site assignment of spectra: signal from surface and interior regions of the nanoparticles, respectively.

格子模型の可解性に対する単体複体と代数を用いた新手法

物性基礎論：凝縮系物理 小倉将紘

Abstract We develop a new method for exactly solvable lattice models including the transverse field Ising model, Kitaev's honeycomb lattice model and many other examples. This method is organized by algebraic structures and the theory of simplicial complexes.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

オンサーガーによる2次元イジング模型の厳密解の発見以来、可解な格子模型が数多く発見され、その厳密解や基底状態が計算されてきた。特に、横磁場イジング模型[1]やKitaevハニカム格子模型[2]などはハミルトニアンがマヨラナ演算子の二次形式の形に変換され、その可解性がわかっている。これらの模型はトポロジカル物性や誤り耐性量子計算などの応用が知られており、重要な模型である。

これらの事実に基づいて、本研究ではマヨラナ演算子の二次形式へと変換が可能な格子模型の研究を行った。まず、格子模型のハミルトニアンから **Bond Algebra** という代数[3]を作る。この代数が特定の条件を満たすとき、代数から **Commutativity Graph**[4]というグラフを作ることができる。このグラフと単体複体の理論を用いて、格子模型の可解性について以下の結果を得た[5]。

1. グラフがある種の単体複体とうまく対応しているとき、マヨラナ演算子の二次形式に変換可能であることを見つけた。この条件を単体複体の「単純点連結」と呼んでいる。
2. 上の条件の下で単体複体、**Bond Algebra**、及び物理的概念の対応表を作った(Table.1.)。特に、単体複体の1次ホモロジー群、ハミルトニアンの保存量、及び格子内のフラックスの3つが対応し、更に、マヨラナ演算子とこのフラックスから非可換な統計性が現れることを示した。
3. この理論から、マヨラナ演算子の二次形式に変換可能な新しい模型を提示することができる。3次元(以上)の模型やフラクタル的な格子を持つ模型を構成した。
4. **Commutativity Graph** からトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類計算の簡単な方法を考案した。

今回の発表では、主に1の内容を軸にし、Kitaevハニカム格子模型を例として本研究の解説を行う。

幾何	代数	物理
0 単体	$\mathcal{A}$ の生成子	マヨラナ粒子の飛び移り
1 単体	反可換	反可換
単体 S_i	クリフォード代数の生成子	マヨラナ粒子
$H_1(K(S_1, \dots, S_m))$	保存量	フラックス

Table.1. Relations among geometric, algebraic, and physical concepts.

References

- [1] K. Minami, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 024003 (2016).
- [2] A. Kitaev, Ann. Phys., **321**, 1 (2006).
- [3] Z. Nussinov and G. Ortiz, Phys. Rev. B **79**, 214440 (2009).
- [4] Z. Wang and K. Hazzard, arXiv:1908.03997.
- [5] M. Ogura, *et al.*, in preparation.

超伝導体 Sr_2RuO_4 の上部臨界磁場近傍の核磁気共鳴法、および NMR 用一軸圧セルの開発

固体量子物性研究室 金城克樹

Abstract Sr_2RuO_4 has been attracted much interest because of its complex superconducting (SC) properties. To investigate the SC properties of Sr_2RuO_4 , we performed nuclear magnetic resonance (NMR) measurement and developed uniaxial-cell for NMR measurement. The anomalous SC behaviors were observed in high-field SC region near H_{c2} .

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

超伝導体 Sr_2RuO_4 は 1994 年前野らによって発見された超伝導体であり[1]、銅を含まない初めての酸化超伝導体として非常に注目されてきた。常伝導状態ではフェルミ温度が 1000 K 程度のフェルミ液体でよく記述され、フェルミ面のキャラクターも同定された電子状態のもと超伝導転移を起こす。しかしながら、超伝導状態の物性は非常に複雑である。超伝導状態における面内スピン磁化率の減少の有無、超伝導オーダーパラメータが縮退しているか否か、超伝導ノードの方向など、様々な実験が行われてきた。

最近でも新しい結果が報告されており、 Sr_2RuO_4 の超伝導において興味深い性質として、(1)上部臨界磁場近傍では 1 次転移が観測されており[2]、その領域における磁場角度回転比熱測定から指摘されている特異な超伝導相の存在[3,4]、(2)[100]方向への一軸圧下における超伝導転移温度の上昇[5]があげられる。我々はこれら 2 つの特異な振る舞いの理解を目指して上部臨界磁場近傍における NMR 測定、および NMR 用一軸圧セルの開発を行っている。

Figure 1 は 0.07 K、 H_{c2} 近傍での ^{17}O -NMR スペクトルの磁場依存性を示す。低磁場ではナイトシフトの明確な減少が確認され、2019 年の A. Pustogow らの報告[6]と整合する結果である。1 次相転移領域の NMR スペクトルは 2 つに分裂した。そのうちの 1 つは常伝導状態よりも磁化率が大きく、もう 1 つは磁化率が小さい。この振る舞いは単純な 1 次相転移では説明できず、電子密度が「濃い」部分と「薄い」部分が空間的に分離した特異な超伝導状態が実現していることを示す。

また、一軸圧下における超伝導転移温度上昇の起源を微視的に調べるため、NMR 用一軸圧セルの開発も行った。このセルは低温下で加圧可能であるため、サンプルへのダメージを軽減が期待できる。

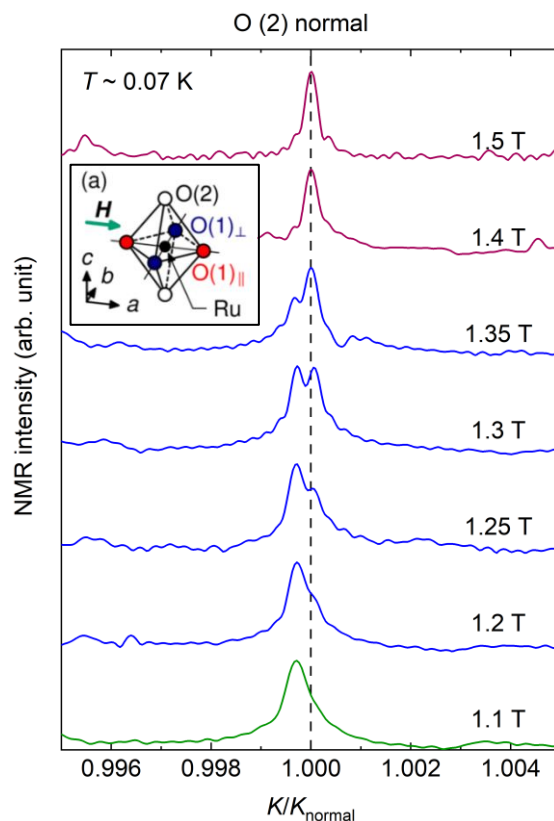


Figure 1 頂点(O(2))サイトの ^{17}O -NMR スペクトルの 0.07 K での磁場依存性。赤は常伝導、緑は BCS 的な超伝導の振る舞いを示す。青はスペクトル分裂がみられた磁場領域のスペクトル。(挿入図) RuO_6 八面体における O サイトの位置。

References

- [1] Y. Maeno *et al.*, Nature **372**, 532 (1994).
- [2] S. Yonezawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083706 (2014).
- [3] K. Deguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 047002 (2004).
- [4] S. Kittaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 093703 (2018).
- [5] A. Steppke *et al.*, Science **355**, eaaf9398 (2017).
- [6] A. Pustogow *et al.*, Nature **574**, 72 (2019).

Sr_{3-x}SnO における Sn の特異な陰イオン状態と超伝導性

固体量子物性研究室 鯉渕駿

Abstract The antiperovskite Sr₃SnO is predicted to be a topological crystalline insulator. Furthermore, Sr-deficient Sr_{3-x}SnO is found to be the first antiperovskite oxide superconductor. We improved sample quality and conducted Mössbauer spectroscopy to reveal unusual anionic states of Sn and μ SR to investigate superconducting properties.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

逆ペロブスカイト酸化物 A₃BO (Fig. 1)では、B 金属が特異な陰イオン状態をとっており、バルクの電子状態は線形分散を持つディラック半金属であると第一原理バンド計算から予言されている[1]。加えて、スピン軌道相互作用によりディラック点付近に小さなギャップが開くと、これらの物質はトポロジカル結晶絶縁体になると指摘されている[2]。我々は Sr_{3-x}SnO が、逆ペロブスカイト酸化物の中で初めて超伝導を示すことを発見した[3]。欠損のない Sr₃SnO は上述のようにギャップの開いたディラック半金属であり、超伝導は示さない。従って Sr_{3-x}SnO の超伝導の発現に関しては、Sr の欠損によるホールドープが重要であると考えられる。ディラック点付近では *p* 軌道と *d* 軌道が混成するため、電子が異なる軌道間で Cooper 対を形成すれば、トポロジカル超伝導体になると理論的に予想されている[3, 4]。

我々は Sr_{3-x}SnO についてより理解を深めるため、単結晶育成[5]をはじめとする試料の合成方法の改良に取り組んだ。粉末試料に関しても様々な方法で合成を試みた。その一つとして新たな前駆物質を用いた方法で、欠損のない Sr₃SnO で以前よりも安定して均質な試料を得られた。またフラックス法の結果 1 mm 程度の単結晶が得られた。

次に、我々は Sr_{3-x}SnO における Sn の異常な陰イオン状態を明らかにするために、¹¹⁹Sn のメスバウアー分光測定を行った[6]。とりわけ、欠損のほとんどない試料と欠損のある超伝導試料での比較から、Sn の電子状態と超伝導の関係について調べた。結果として、どちらの試料でも Sn が異常な Sn⁴⁻状態をとっていることを実験的に明らかにした。また欠損があると、Sn⁴⁻状態の γ 線吸収とは別に、サテライトの吸収が顕著に見られ、特に低温でサテライトの吸収強度が増大する振る舞いが見られた。また空气中で意図的に分解させた試料についても同様に測定を行い、吸収スペクトルを比較した。この比較から Sr_{3-x}SnO のスペクトルの吸収位置は、サテライトも含めて Sn 単体金属の吸収位置とは明確に異なっており、サテライトの吸収が分解により生じる Sn 単体由来ではないことも確かめられた。加えて、第一原理計算により電子密度などを計算し、実験結果との比較も行った。これらの結果からサテライトの吸収は Sr_{3-x}SnO 構造中の Sr 欠損に隣接した Sn サイト由来であることを確かめた。

さらに、我々はミュオンスピン回転 (μ SR) 実験を行い、Sr_{3-x}SnO の超伝導性について調べた。その結果、超伝導がバルク由来であることを確かめた。また、ゼロ磁場下での測定から時間反転対称性が保たれた超伝導状態であることを確かめた。そして、同程度の超伝導転移温度もつ従来型超伝導体と比較して、磁場侵入長が顕著に長いことを明らかにした[7]。これらの結果は、Sr_{3-x}SnO で理論的に提案されているトポロジカル超伝導相の BW 状態と矛盾しない。

本発表では主に試料合成の結果とメスバウアー分光の結果について報告する。

References

- [1] T. Kariyado and M. Ogata, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 083704 (2011); **81**, 064701 (2012).
- [2] T. H. Hsieh *et al.*, Phys. Rev. B. **90**, 081112 (2014).
- [3] M. Oudah *et al.*, Nat. Commun. **7**, 13617 (2016).
- [4] T. Kawakami *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 041026 (2018).
- [5] Y. Obata *et al.*, Mat. Res. Bulletin **106**, 1 (2018).
- [6] A. Ikeda, S. Koibuchi *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 245145 (2019).
- [7] A. Ikeda, S. Koibuchi *et al.*, Phys. Rev. B *submitted*

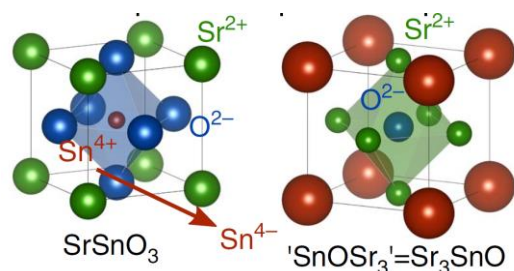


Fig. 1: Crystal structures of perovskite SrSnO₃ and antiperovskite Sr₃SnO.

冷却原子を用いた量子状態の幾何学的構造の研究： トポロジカル量子ポンプに対する乱れの効果と 量子計量テンソル測定

量子光学研究室 佐久間啓太

Abstract We studied the geometrical structure of quantum states using ultracold atomic gases. First, we experimentally investigated the robustness of topological quantum pumps against disorder, and discovered a novel phenomenon of disorder-induced pumping. Second, we successfully demonstrated an experimental protocol for measuring the quantum metric tensor.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、量子状態の幾何学的構造に関する研究が広く行われている。量子状態の幾何学的構造とは、量子状態で定義されるゲージ不変で非自明な量のことであり、以下の量子幾何テンソルにすべての情報が含まれている[1]。

$$\chi_{ij}(\lambda) = \langle \partial_{\lambda_i} \psi | \partial_{\lambda_j} \psi \rangle - \langle \partial_{\lambda_i} \psi | \psi \rangle \langle \psi | \partial_{\lambda_j} \psi \rangle$$

(ψ はパラメータ $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots)$ に依存する量子状態) この量の虚部は Berry 曲率に比例している。Berry 曲率の積分量である Chern 数はトポロジカル不変量であり、トポロジカル量子現象を議論する上で重要な役割を担っている。また、実部は量子計量テンソルと呼ばれる量で、量子状態の局在性と密接な関係があることが知られている[2]。我々は、これらの物理量に関する研究として、優れた制御性を有する冷却原子系の利点を生かして以下の2つのテーマで実験を行った。

(1) トポロジカル量子ポンプに対する乱れの効果

1次元周期系のポテンシャルを時間周期的に変化させた系は(1+1)次元の周期系とみなすことができ、1周期あたりの粒子輸送はこの系で定義された Chern 数に比例し量子化される。この現象はトポロジカル量子ポンプ(Thouless pump[3])とよばれ、我々は光格子中の Yb 冷却原子を用いて輸送量が量子化されることを確認している[4]。本研究では、ポンプ方向から 45° 傾けた軸に波長 776nm-820 nm の光格子を入れることで、先行研究[4]で用いた光超格子に対して準周期的な乱れポテンシャルを構築し、トポロジカル量子ポンプが持つトポロジカルな堅牢性に対する乱れの効果を系統的に調べ、特に、励起バンドへの原子の励起の振舞いからトポロジカル相転移の実験的兆候を得ることに成功した。この知見をもとに、異なるパラメータを持つ2つの量子ポンプを組み合わせることで、乱れないときにポンプのない自明なポンプシーケンスを構築し、そこに乱れを加えることで、乱れによって誘起される量子ポンプを観測することに成功した。

(2) 量子計量テンソル測定

近年、量子計量テンソルの冷却原子系における観測手法が理論的に提案された[2,5]。ある量子状態に準備した冷却原子に対して、時間周期的に変調する勾配ポテンシャルを一定時間印加し、変調による他状態への遷移確率を測定する。その遷移確率を変調周波数について積分することで量子計量テンソルを得ることができる。本研究では、この提案に基づき量子計量テンソルを測定するための新たな実験手法を開発し、光格子の Bloch 状態などの様々な状態に対して量子計量テンソルに関連する量の測定を行った。測定結果と理論計算との比較の結果、良い一致が得られた。

References

- [1] M. Kolodrubetz *et al.*, Phys. Rep. **697**, 1 (2017).
- [2] T. Ozawa and N. Goldman, Phys. Rev. Research **1**, 032019(R) (2019)
- [3] D. J. Thouless, Phys. Rev. **B 27**, 6083 (1983)
- [4] S. Nakajima *et al.*, Nat. Phys. **12**, 296 (2016).
- [5] T. Ozawa and N. Goldman, Phys. Rev. **B, 97**, 201117(R) (2018)

STM を用いた鉄系超伝導体 Fe(Se,S)の 正方晶相における電子状態の観測

量子凝縮物性研究室 佐野大樹

Abstract The iron-chalcogenide superconductor Fe(Se,S) has been suggested to locate in the BCS-BEC crossover regime. Here, we performed the scanning tunneling spectroscopy (STS) measurements on Fe(Se,S). Our STS spectra reveals the absence of pseudogap in tetragonal Fe(Se,S). We discuss these results in terms of the crossover in multiband systems.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

通常の超伝導物質では、フェルミエネルギーが電子対の引力相互作用よりも圧倒的に大きい (BCS 状態)。一方で引力相互作用が大きな極限では、強く束縛された電子対が分子のように振る舞いボース凝縮した BEC 状態が実現する。引力相互作用がフェルミエネルギーと同程度となる中間状態は BCS-BEC クロスオーバー領域と呼ばれ、この領域では電子間の平均距離と超伝導電子対の大きさを表すコヒーレンス長が同程度となるため、興味深い超伝導状態が実現する。このような BCS-BEC クロスオーバー領域はこれまで冷却原子系に限られており、超伝導体では実現されていなかった。

近年、鉄系超伝導体 FeSe は、超伝導ギャップと同程度の非常に小さなフェルミエネルギーを持ち、BCS-BEC クロスオーバー領域にある可能性が指摘されている[1]。クロスオーバー領域では、超伝導転移温度よりも高い温度で、クーパー対が形成され (preformed pair)、擬ギャップが形成されることが理論的に予測されている。実際 FeSe においては、 T_c 以上で巨大な超伝導揺らぎが観測され preformed pair の形成を示唆する結果も報告されている [2]。しかしながら、走査トンネル顕微鏡/分光 (STM/STS) の測定では擬ギャップは観測されていない。

ごく最近、FeSe の Se を S に置換し構造相転移を完全に抑制した正方晶相の Fe(Se,S) において、超伝導状態は BEC 極限に近づくことが報告された[3,4]。そこで本研究では、正方晶相の Fe(Se,S) に対して STM/STS の測定を行った。Fig.1 は STM 測定から得られた Fe(Se,S) 表面のトポグラフィ像である。原子像からは暗点として S 原子が確認され、その数から用いた試料が正方晶相にあることが確認された。Fig.2 にコンダクタンススペクトルの温度依存性を示す。その結果、 $T_c = 5$ K 以下でゼロバイアス付近でのコンダクタンスが減少し、超伝導ギャップ形成は確認できるものの、 T_c 以上でコンダクタンスの減少は観測されなかった。

以上の結果は、正方晶 Fe(Se,S) においても FeSe 同様、擬ギャップが明確に観測されないことを示している。これらの結果を、マルチバンド系における BCS-BES クロスオーバーの観点から議論する。

References

- [1] S. Kasahara *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **111**, 16309 (2014).
- [2] S. Kasahara *et al.*, Nat. Commun. **7**, 12843 (2016).
- [3] 水上雄太 *et al.*, 日本物理学会第 73 回年次大会, 25aK505-8 (2018).
- [4] 橋本崇広 *et al.*, 日本物理学会第 73 回年次大会, 25aK505-9 (2018).

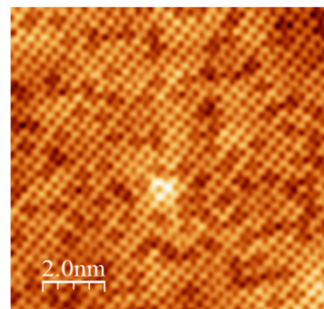


Fig.1. Topographic image of FeSe_{0.75}S_{0.25} at 10 K.

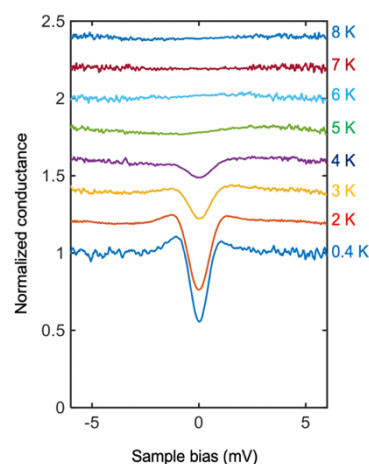


Fig.2. Normalized conductance Spectra measured on the surface of FeSe_{0.75}S_{0.25}.

界面 2 次元相分離モルフォロジーとアンカリング制御

ソフトマター物理学研究室 柴亮太

Abstract: We designed new types of the slippery alignment film to control the anchoring energy W using the two-dimensional phase separation morphology. The film consists of the immiscible polymers: PMMA has large W , whereas PS has small W . We success to arbitrary tune W by changing the mixing ratio PMMA/PS.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

【序】アンカリングエネルギー(W)は、液晶分子をガラス界面上で任意の方向に配向強制させる力であり、液晶ディスプレイ(LCD)の表示原理においてとても重要な役割を担う。多くの LCD が、大きな W を有し液晶分子の配向を強く強制する高分子配向膜に着目する中、当研究グループは W が小さく、高い運動性を保っている Slippery 配向膜に着目してきた。本研究では、 W の大きさを任意に制御するため、大きな W と小さな W を持つ 2 種類の高分子を混合した配向膜を作製し、界面上の 2 次元的なミクロ相分離構造によって、大きな W と小さな W を持つ界面が同時に共存した状態を利用することを思いついた(Fig.1)。その結果、2 種類の高分子の混合比を変えることで任意の W を持つ界面を設計・実現することに成功した。

【実験と結果】 W の小さい高分子として PS、大きな高分子として PMMA、さらに PS と PMMA のジブロック共重合体 P(S-b-MMA)を用いた。ここで P(S-b-MMA)は PS と PMMA の界面を活性化する。 $\alpha = [\text{PS}]/[\text{PMMA}]$ 、 $\beta = [\text{ジブロック}]/[\text{PMMA}]$ とする。 α を変えることで PMMA ドメインの密度が、 β を変えることで PMMA ドメインの大きさが制御できると考える。試作した 2 次元相分離界面の物性(W と表面粘性(γ_s))の測定には、回転磁場装置^[1](Fig.2)を用い、回転磁場下での透過光強度を測定し次式で解析を行った。

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

t は時間、 ω はステージの角速度を表し、 r および Φ は以下の式で表される。

$$r = \frac{W}{\sqrt{K_{22}\mu_0^{-1}\Delta\chi}} \frac{1}{B}, \quad \Phi = \left(\frac{\gamma_1}{K_{22}} \xi^2 + \frac{\gamma_s}{K_{22}} \xi \right) \omega$$

$\Delta\chi$ は磁気感受率異方性、 γ_1 は液晶の回転粘性係数、 μ_0 は真空の透磁率、 K_{22} はツイスト弾性定数、 ξ は磁場コヒーレンス長を表す。異なる磁場強度 B で測定を行い、解析によって得られた $r \propto 1/B$ の傾きからアンカリングエネルギー W を求めた。また、異なるステージ角速度 ω で測定を行い、 $\Phi \propto \omega$ の傾きから界面の回転粘性係数 γ_s を求めた。混合比を変えた各界面で、アンカリングエネルギー W と界面回転粘性係数 γ_s をそれぞれ求めた。ネマティック液晶は E44 と T15 を 9:1 で混合したもの(T_{NI} = 約 120°C)を用いた。 $T=60.0^\circ\text{C}$ 、 $\omega=2\pi/240[\text{rad/sec.}]$ での混合比ごとの傾きを示したのが Fig.3 である。前式からわかるように、各直線の傾きは W に比例する。 α が小さくなることにより、傾きが増加することから、PMMA 混合比の上昇とともに W が増加していることを表している。本研究では、小さい W を持つ PS と大きい W を持つ PMMA の混合界面で、PMMA 分率の増加とともに、確かに W が増加することがわかった。さらに、AFM を用いてミクロ相分離構造を観測・評価することにも成功した。

References

[1] P. Oswald: EPL 107.2 (2014): 26003.

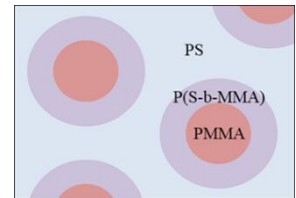


Fig.1: Schematic image of pseudo 2 dimensional phase separation morphology in the slippery alignment film

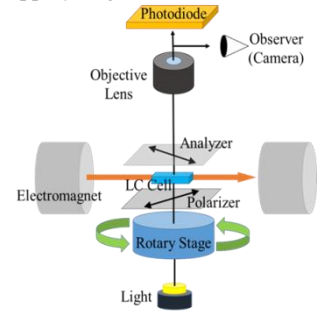


Fig.2: Schematic image of the rotating magnetic field measurement system

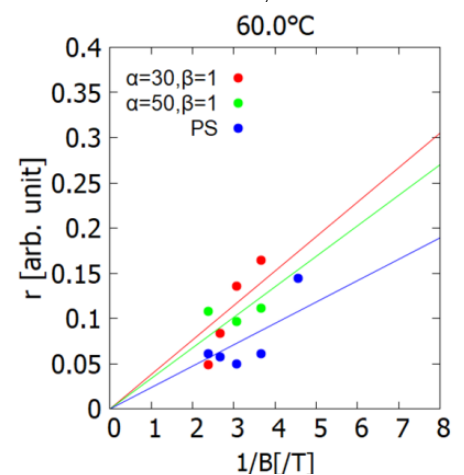


Fig.3: r vs $1/B$

磁場勾配下 NMR による 液体 ^3He における空間不均一構造の研究

低温物理学研究室 田口凌

Abstract Using NMR measurement under a field gradient, we observed the spatial distribution of spin relaxation and spin diffusion with Hole Burning method in a cylinder of normal ^3He . Based on the results, we found that the mechanism of spin relaxation throughout the sample cell was described by the combination of surface relaxation and spin diffusion.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

超流動 $^3\text{He-B}$ 相は、秩序変数がスピン空間と運動量空間の相対回転を表す行列 $R(\hat{n}, \theta)$ で特徴付けられる等方的超流動状態である。回転軸方向単位ベクトル $\hat{n}$ 、回転角 θ の空間変化を texture と呼び、系に存在する各種自由エネルギーや境界条件の競合によって決定される。例えば、有限磁場下で回転軸ベクトルは、 $\hat{n} = \pm \hat{H}$ という 2 つの状況に縮退している。このような 2 種類の異なる基底状態の domain が存在した場合、間に "soliton" と呼ばれる面欠陥が生じる。当研究室の笠井らは、平行平板中の超流動 $^3\text{He-A}$ において chirality の異なる domain 間にできた soliton の MRI、ならびに MRSI 測定による可視化と構造特定に成功した[1]。この手法を用い、円筒容器中の超流動 $^3\text{He-B}$ にできる立体構造 texture、および $\hat{n}$ -soliton の観測を行うため、新たなサンプルセルを設計製作した。しかし、超流動 $^3\text{He-B}$ が実現される温度 (1.5mK 程度以下) に到達するための冷凍機に不測のトラブルが発生し、この実験を行うことができなかった。

そこで、常流動 ^3He においても発生すると考えられる空間不均一なスピン緩和の様子を観測することを試みた。バルクの液体 ^3He の緩和時間 T_{1L} は低温で T^{-2} に比例する形で非常に長い ($\sim 10^3\text{s}$) ことが知られている。しかし、制限空間内に閉じ込めたとき状況は異なる。円筒容器の壁面では、Van der Waals 力により固体 ^3He が固着し、液体 ^3He との間で磁化情報の高速交換 (Rapid Exchange) が行われている。また、固体 ^3He の緩和時間 T_{1S} は T_{1L} に比べて桁違いに短い。そのため、壁面に近く Rapid Exchange の影響を受ける液体 ^3He は T_{1L} よりも短い時間で熱平衡状態に向かう。従って、系全体を均一に $\frac{\pi}{2}$ パルスで飽和させておき、適切な待ち

時間の後で磁場勾配下 NMR 測定により磁化の空間分布を取得すると、壁際から緩和が進行し、内部へ伝達することが期待される。しかし実際は、系全体が $T_1 \sim 6\text{min}$ の時間スケールでほぼ均一に回復する様子が観測された。

これは、円筒容器の断面内におけるスピン拡散が磁化の緩和の時間スケールと比べて十分高速であることが原因だと考えられる。スピンの選択的励起で空間不均一構造を人工的に作り出す Hole Burning 法を用いて、拡散現象を観測し (Fig1)、拡散定数 D を測定した。この結果からセル内の磁化が数秒程度の短い時間で拡散によって均一になることが確認された。さらに、系全体の緩和機構が上記の拡散現象と壁面に固着した固体 ^3He の表面緩和により説明されることがわかった。

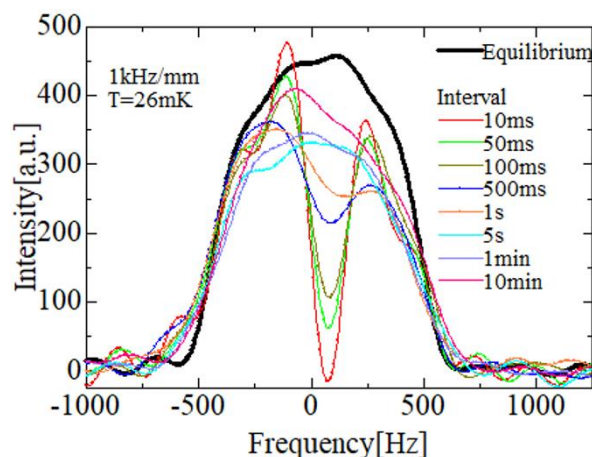


Fig1. Hole Burning

References

[1] J. Kasai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 205301 (2018).

駆動する高分子による液滴の変形

時空間秩序・生命物理研究室 竹中亮太

Abstract In the process of the cytokinesis, some specific proteins localize at the cleavage furrow. We reconstruct the cytokinetic conditions with the proteins encapsulated in cell-sized droplets to observe dynamical properties. In a certain condition, a cortex formed underneath the droplet surface showed the deformation.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

真核細胞は、高度に特異的な生物学的機能を実行するためのさまざまな形状を示す。さらに、それらの形状は静的ではなく、通常の生物学的現象における内部および外部の環境要因に応じて連続的に変化する。細胞分裂の最終過程では細胞質が2つに分かれるプロセスが起こるが、このとき細胞膜直下アクチンのリングが形成され、それが収縮して分裂溝をつくり、細胞をくびり切る様にして細胞質分裂へと至る事が知られている。この際、くびれとして観察される分裂溝にはアクチンも含めて複数種類のタンパク質が局在しており、細胞分裂の関連因子と認識されている[1][2]。

分裂溝の形成におけるミニマルな要素を構成論的に調べるため、主要な構成因子である actin, myosin と共に分裂溝で見られるタンパク質を共に油中水滴に封入して液滴の様子を観察した。その結果、いくつかの条件で変形をするものが得られ、*in vitro* で機能が確認出来たほか、有力なストーリーの一つを支持する結果が得られた。

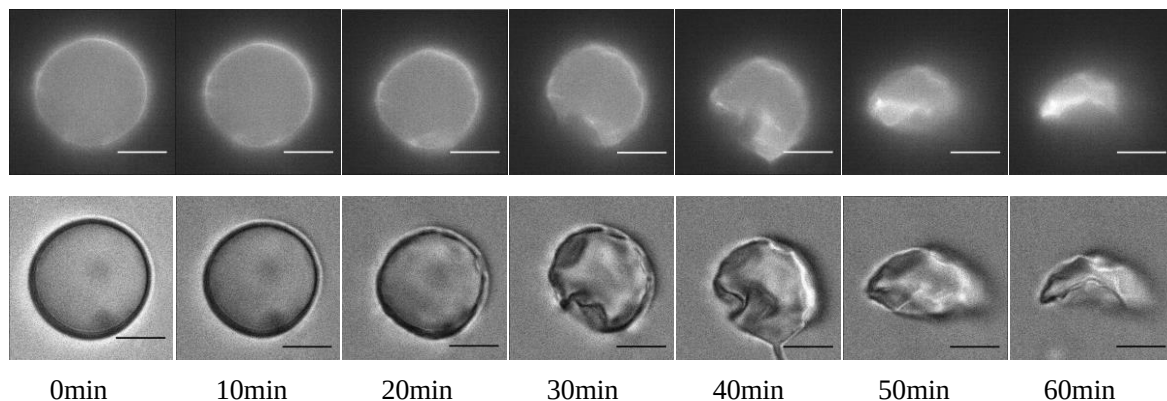


Fig. 1. Time series for the droplet's deformation process. The upper images are fluorescence images and the bottom ones are transmitted light images. Scale bars, 10 μ m.

References

- [1] M. Miyazaki, M. Chiba, H. Eguchi, T. Ohki, and S. Ishiwata, "Cell-sized spherical confinement induces the spontaneous formation of contractile actomyosin rings in vitro," *Nat. Cell Biol.*, vol. 17, no. 4, pp. 480–489, 2015.
- [2] T. Takeda *et al.*, "Drosophila F-BAR protein Syndapin contributes to coupling the plasma membrane and contractile ring in cytokinesis," *Open Biol.*, vol. 3, no. 8, pp. 130081–130081, 2013.

新奇的な乱流の探索と分類

非線形動力学研究室 田之上智宏

Abstract We study the dynamics of quantum turbulence using Onsager's theory of 'ideal turbulence'. It is found that there exists a crossover in the energy cascade. Moreover, we speculate that quantum turbulence is regarded as a special case of 'van der Waals turbulence'.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

十分発達した乱流の核心は Kolmogorov の統計理論[1]と Onsager の理想乱流理論[2]によって捉えられる。これらの理論によれば、乱流では外力によって注入された運動エネルギーがより小さいスケールへと連続的に輸送されるエネルギーカスケード現象が生じ、それに伴いエネルギー Spektral が $E(k) \propto k^{-5/3}$ なる Kolmogorov Spektral を示す。近年、量子乱流も古典乱流と同様のエネルギーカスケード・エネルギー Spektral を示すことが数値的・実験的に見出された[3]。この事実は 'Kolmogorov 普遍クラス' なる数理構造の存在を示唆しているように思える。しかし量子乱流は古典乱流とは異なる一面も併せ持つ。例えば Kolmogorov Spektral を示す波数領域よりも高波数側において Kelvin 波カスケードという量子乱流特有のエネルギーカスケード現象が存在することが指摘されている。この Kelvin 波カスケードに伴うエネルギー Spektral はやはり冪則を示すが、その指数に関しては現在複数の候補が乱立しており、明晰な理論的解析が待たれる。

以上を踏まえて本研究では(a)量子乱流の理論的解析と(b)新奇的な乱流現象・モデルの探索を行った。具体的には、(a)では絶対零度近傍での量子乱流を記述する Gross-Pitaevskii 方程式から Madelung 変換によって得られる量子 Euler 方程式を扱った。量子 Euler 方程式は通常 Euler 方程式と形式的に類似の構造を有するため、Onsager の理想乱流理論を援用することができる。このようなアプローチで Kelvin 波カスケードの機構や対応するエネルギー Spektral の指数を明らかにすることがここでの目的である。一方(b)では量子 Euler 方程式の一般形ともいえる Navier-Stokes-Korteweg (NSK)方程式を扱った。この方程式で記述される乱流の性質は我々の知る限りこれまで調べられてこなかったが、素朴には量子乱流と同様の振る舞いを示すと期待される。本研究の目的はこの NSK 方程式で記述される新奇的な乱流の振る舞いを理論的に調べ、Kolmogorov 普遍クラスに対する量子乱流の位置づけを明確にすることである。本研究ではさらに Kolmogorov 普遍クラスやその他の普遍クラスを特徴づける数理モデルをできるだけ多数構成し、究極的にはそれらの種々の乱流を分類することを目指す。

(a)に関しては次の結果を得た:(i)量子乱流には2種類のスケール間エネルギーフラックスが存在する。1つは古典乱流と同じものであり、もう1つは量子乱流特有のものである。(ii)低波数領域においては古典乱流と同様のエネルギーフラックスが卓越し、エネルギー Spektral は Kolmogorov Spektral $E(k) \propto k^{-5/3}$ を示す。(iii)高波数領域においては量子乱流特有のエネルギーフラックスが卓越し、エネルギー Spektral は $E(k) \propto k^{-3}$ となる。これが Kelvin 波カスケードに対応するエネルギー Spektral であると考えられる。

(b)に関しては次の結果を得た: NSK方程式で記述される乱流—van der Waals乱流と呼ぶことにする—は量子乱流と同様のダブルカスケードを示す。このことから量子乱流がvan der Waals乱流なる新奇的な乱流の特殊な場合として位置づけられることが示唆される。さらに、2次元XYモデルを変形することにより、これらの乱流とは全く異なるカスケード機構・エネルギー Spektral を示す数理モデルを構成することにも成功した。

References

- [1] A. N. Kolmogorov, Dokl. Akad. Nauk SSSR 32, 16 (1941).
- [2] L. Onsager, Nuovo Cimento 6, 279 (1949).
- [3] M. Kobayashi and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 94, 065302 (2005); J. Phys. Soc. Jpn. 74, 3248 (2005).

共鳴トンネルダイオードを用いた テラヘルツ光検出

光物性研究室 土田洸志郎

Abstract Resonant tunneling diode (RTD) is a candidate for the continuous-wave terahertz detector. However, performance and principle of the detection has been still unclear. In this paper, we evaluated linearity of sensitivity and noise equivalent power of RTD under continuous wave irradiation. Furthermore, to investigate RTD detection operation under strong electric field, we measured response for picosecond THz pulsed light.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

共鳴トンネルダイオード (Resonant Tunneling Diode; RTD) はバイアス電圧を印加するだけでテラヘルツ帯の超高速発振が可能な半導体デバイスであり、イメージングや分光分析などへの応用が実証されている[1,2]。また RTD はテラヘルツ波光源としてのみではなく連続テラヘルツ波検出器としても動作することが知られている。テラヘルツ検出器には光吸収による素子の温度上昇を利用したものや、電流-電圧特性の非線形性による二乗検波を利用したものがある。後者の電子デバイス型ではショットキーバリアダイオードが主流であるが、金属と半導体の間のショットキー障壁を用いているために、均一性や再現性に乏しいという問題があった。RTD も電子デバイス型のテラヘルツ検出器であるが、量子井戸構造を用いているため安定な動作が期待され、実用面に優れている。また、RTD は入射光強度が高くなると Photon-Assisted Tunneling (PAT) の効果が優勢になり、感度のバイアス依存性にサイドバンドが立つことが知られている[3]。

本研究では、RTD の連続テラヘルツ波検出器としての性能を精密に評価し、検出動作原理を明らかにすることを目的とした。Fig. 1 はバイアス電圧を固定した時の電流値変化の入射光強度依存性である。強度に対して線形な応答をしていることから二乗検波であることがわかる。感度とノイズレベルの交点より雑音等価電力が $54.6 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ であることがわかった。これはショットキーバリアダイオードと同程度以上の感度である。また、バイアス電圧依存性から動作原理に関する考察を行った。

また、強電場下での RTD 検出動作を調べるために、未だ行われていないパルステラヘルツ光検出を行った。モードロック Ti:Sapphire レーザー (パルス幅 100 fs、繰り返し 81 MHz) と光伝導アンテナによりピコ秒テラヘルツパルスを生じ、RTD に照射して印加バイアスを掃引した(Fig. 2)。入射強度が弱いときは連続波の電流値変化と同じ構造をしているが、強度が十分強い時にディップの低電圧側に新たなディップ (破線) を観測した。最初のディップから光子エネルギーに相当する分だけシフトしていることから、この構造は PAT によるものであると考えられる。

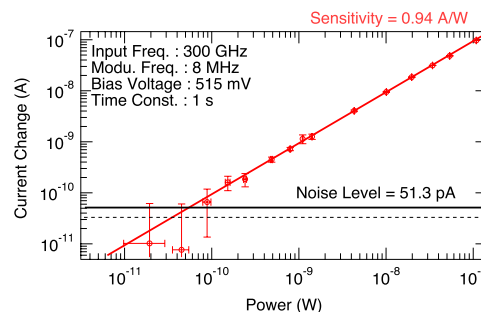


Fig. 1. Incident intensity dependence of the current change

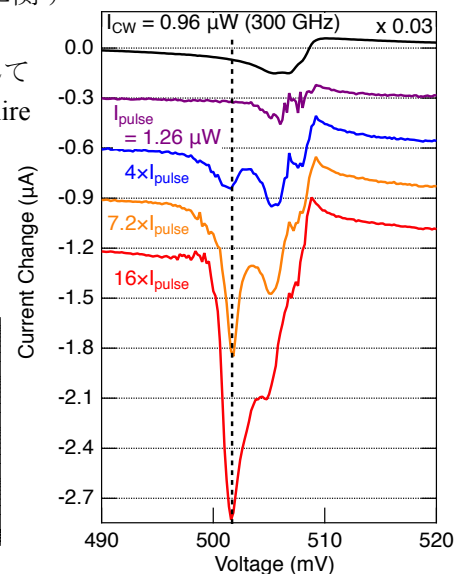


Fig. 2. Current change under picosecond THz pulse irradiation

References

- [1] T. Miyamoto, et al., Japanese Journal of Applied Physics **55**, 032201 (2016).
- [2] S. Kitagawa, et al., Japanese Journal of Applied Physics **56**, 058002 (2017).
- [3] H. Drexler, et al., Appl. Phys. Lett. **67**, 2816 (1995).

アゾ混合リオトロピック液晶光誘起 N-I 相転移

ソフトマター物理学研究室 徳宿光子

Abstract We investigate the photo-induced nematic-isotropic transition of azo-doped lyotropic liquid crystals due to the trans-cis isomerization of the azo-molecules. We measure the change of the relaxation time of the orientation fluctuation during illumination of blue light and try to understand mechanism of transition.

© 2020 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においてもネマチック(N)相を発現し、さらに温度に依存して高温では、等方(Iso)相に相転移することが分かっている。この系は温度・濃度・界面活性剤のアニオンカチオン混合比を状態変数として起こる会合体形状の変化を主な起源として相転移する。本研究ではこの SDS/DTAB 界面活性剤水溶液 N 相をホスト試料とし、ゲスト試料としてさらにアゾ化合物である Methyl Red(MR)を混合した。アゾ分子を光により trans-cis 異性化させ、光誘起の N-I 相転移の可能性を検証し、そのメカニズムに迫ることを目的とした。

【試料・実験】 試料は SDS と DTAB をモル比 $\alpha=2.7$ (=SDS/DTAB) として混合し、精製水をくわえて 9.0wt%の水溶液を作成した。さらにこの水溶液に対してアゾ化合物である Methyl Red(MR)を 0.003wt%混合した。まず、アゾ化合物を含む試料と含まない試料を一定温度下でそれぞれ、励起光を 120 秒間照射したのち偏光顕微鏡カメラで観察した。さらに、アゾ化合物を含む試料を光励起した際のネマチック-等方相転移の過程を、励起光照射開始時刻から 9 秒ごとに DLS 測定(Dynamic Light Scattering)を行い、配向揺らぎの緩和時間 τ の励起光照射時間依存性をもとめた。試料は 36°C の N 相で安定化させ、励起光は(波長 500nm)、110mW/cm² (100%)及び、78mW/cm² (70%) の二種類での強度で測定を行った。加えて、比較のために、緩和時間の温度依存性も求めた。

【結果と考察】 Fig.1 に偏光カメラの観察結果を示す。励起光照射前はアゾ分子の有無にかかわらず N 相であることが分かる。励起光照射後は、アゾ分子を含む試料のみ暗視野(写真 d)に変化し、アゾ化合物の trans-cis 異性化によって N-I 相転移がおこることが確認できた。Fig.3 に光励起による N-I 相転移点近傍における配向揺らぎの緩和時間の光照射時間依存性を、2 つの励起光強度(110mW/cm² (赤印*)と 78mW/cm² (緑丸印●)) で示す。Fig.2 の緩和時間の温度依存性のグラフと比較することで、光誘起 N-I 相転移は、温度変化 N-I 相転移と同様の機構で起こることが定量的に示された。またこのことから、会合体表面に存在するアゾ分子のシス体化が表面曲率を増加させているものと考察した。すなわち、光官能性を有するゲスト試料を混合することで、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ことを示した。

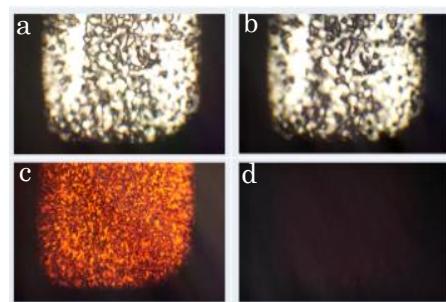


Fig.1: Observation result of polarized camera. a),b) is without Azo compound before and after excitation light irradiation, respectively. c),d) is with Azo compound before and after excitation light irradiation, respectively.

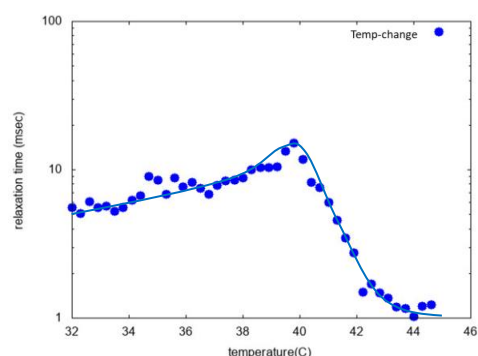


Fig.2: Temperature dependence of the relaxation time of director fluctuation.

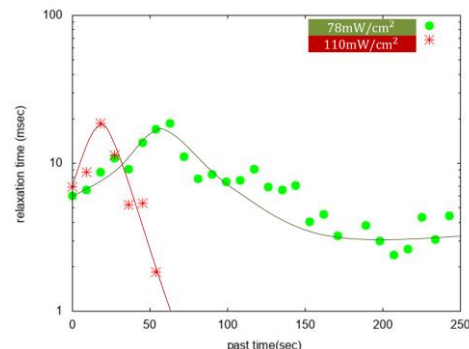


Fig.3: Change of the relaxation time after excitation light irradiation under different intensity (110mW/cm²(100%)(*), 78mW/cm² (70%)(●))

パルスレーザー堆積法による キタエフスピン液体候補物質 α -RuCl₃ の薄膜作製

量子凝縮物性研究室 中村聡史

Abstract It has been theoretically predicted that non-Abelian anyons can be detected and visualized by scanning tunneling microscope measurements of α -RuCl₃ monolayer on a metallic substrate. However, thin film growth of α -RuCl₃ by deposition technique has never been reported so far. Here, we fabricate α -RuCl₃ thin films by pulsed laser deposition.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

2006 年、A. Kitaev により二次元ハニカム格子における量子スピン模型が提案された[1]。このキタエフ模型において、基底状態は厳密解を持つ量子スピン液体状態である。キタエフスピン液体状態の励起状態では、電子スピンが分裂し遍歴マヨラナ粒子と局在マヨラナ粒子によって構成される Z_2 渦が現れる。

キタエフスピン液体の候補物質として、強いスピン軌道相互作用を持つモット絶縁体 α -RuCl₃ が注目を集めている。 α -RuCl₃ はゼロ磁場において $T_N = 7\text{K}$ でジグザグ型の反強磁性秩序を示すが、面内磁場によりこの反強磁性秩序は完全に抑制されスピン液体状態が実現する[2]。この磁場誘起スピン液体領域における熱ホール効果測定から、熱ホール伝導度がプラトーを示し、その値が整数量子ホール効果で期待される値の半分になる「半整数熱量子ホール効果」が観測された[3]。これは、遍歴マヨラナ粒子のカイラルエッジ流ならびに非可換エニオンとして振る舞うマヨラナ粒子と Z_2 渦の複合粒子の存在を示す強力な証拠である。

非可換エニオンはトポロジカル量子計算における基本粒子であり、応用の観点からその直接観測が最重要課題である。最近、導電性基板上の単層膜における走査型トンネル顕微鏡/分光(STM/STS)測定により非可換エニオンを直接検出し、可視化できる可能性が理論的に指摘されているが、これまでにこの検出実験の報告は全くない。その理由として、単層膜の作製技術が確立していないことが挙げられる。

今回我々は、パルスレーザー堆積法による α -RuCl₃ 薄膜作製を試みた。この手法を用いることで、STM 測定に用いることができ、かつキャリアドーピングのための電界効果デバイスなどに適用できる大面積の薄膜の作製を目指した。元素分析の結果、Ru と Cl の原子数比は単結晶 α -RuCl₃ とほぼ同じ 1:3 であった。また、X 線回折では α -RuCl₃ の結晶構造から期待される位置とほぼ同じ角度に(001)ピークが確認された。これらの結果は、 α -RuCl₃ の薄膜が成長したことを示している。

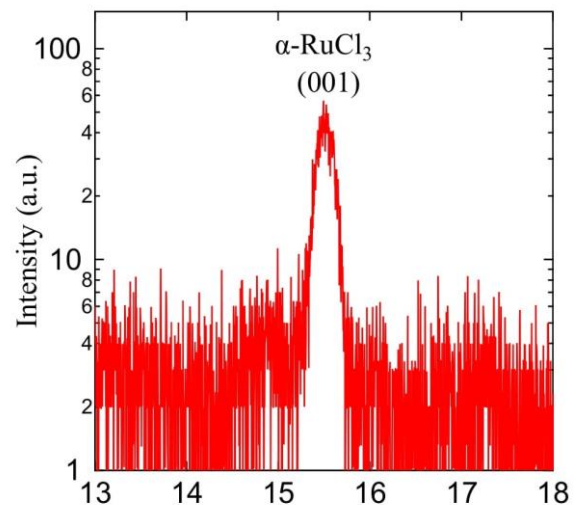


Fig. 1. Cu $K\alpha_1$ x-ray diffraction pattern for α -RuCl₃ thin film. The peak at 15.5 deg. indicates the (001) peak of α -RuCl₃.

References

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
- [2] A. Banerjee *et al.*, npj Quant. Mater. **3**, 8 (2018).
- [3] Y. Kasahara *et al.*, Nature, **559** 227-231 (2018).

単一ペロブスカイトナノ粒子の励起子発光特性の研究

ナノ構造光物性研究室 正田宗二郎

Abstract We investigated the impact of the A-site cation on the photoluminescence (PL) properties of lead halide perovskite nanocrystals by single dot spectroscopy. The temperature dependence of the PL spectrum shows that the A-site cation influences the low-energy tail of the PL spectrum and the Urbach energy of nanocrystals.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体 APbX_3 ($A = \text{Cs}^+$, CH_3NH_3^+ (MA), $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$ (FA); $X = \text{Cl}^-$, Br^- , I^-) は、太陽電池や発光デバイスで高い光電変換効率を実現しており、新しい光学デバイス材料として期待されている。特にそのナノ粒子は、ハロゲン置換および粒子サイズ制御によってバンドギャップエネルギーを幅広い範囲で操作できるため、非常に活発に研究されている[1]。しかし、ナノ粒子の A サイトカチオンの役割についての研究は少なく、A サイトカチオンはナノ粒子の化学的安定性や熱的安定性において重要な役割を担っていることが報告されている[2, 3]。ナノ粒子において A サイトカチオンが発光などの光学特性に与える影響は明らかになっていない。

そこで本研究では単一ドット分光を用いて、三種類の A サイトカチオンの異なる CsPbBr_3 , MAPbBr_3 , FAPbBr_3 ナノ粒子の発光特性を研究した。単一ナノ粒子からの発光を比較することでナノ粒子のサイズ分散や表面トラップの有無などの外的要因を排除し、本質的な発光特性の議論が可能となる。はじめに、室温下での単一 CsPbBr_3 , MAPbBr_3 , FAPbBr_3 ナノ粒子の時間分解発光、発光スペクトルを測定し、その特性を比較した。 FAPbBr_3 ナノ粒子の発光スペクトルは、他の二種類のナノ粒子に比べて低エネルギー側にブロードな裾を示した (Fig. 1)。さらに、小さなサイズのナノ粒子では、よりその傾向が大きくなった。スペクトル形状の物理的起源を明らかにするために、 FAPbBr_3 ナノ粒子のスペクトル分解発光寿命測定を行った。実験から発光エネルギーにかかわらず一定の発光寿命を持つことが分かった。これは低エネルギー側に現れる裾の起源がトリオンやトラップ準位からの発光、さらには量子閉じ込めシュタルク効果などではないことを示唆している。発光スペクトルの温度依存性 (20~190 K) から、それらのアーバックエネルギーを求め、その温度依存性が励起子-フォノン相互作用によるモデルで説明できることを明らかにした。

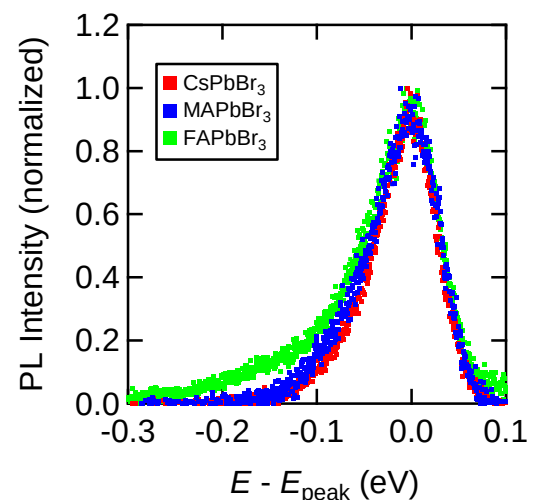


Fig. 1. PL spectra of CsPbBr_3 , MAPbBr_3 and FAPbBr_3 single nanocrystals at room temperature. The horizontal axis is the energy difference between the PL emission energy E and the PL peak energy E_{peak} .

References

- [1] L. Protesescu *et al.*, Nano Lett. **15**, 3692-3696 (2015).
- [2] L. Protesescu *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **138**, 14202-14205 (2016).
- [3] N. Yarita *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **8**, 6041-6047 (2017).

空間反転対称性の破れた 2次元超伝導体の不純物効果

凝縮系理論研究室 三吉賢

Abstract We explore impurity effects on superconducting monolayer MoS₂ and transition metal dichalcogenides (TMD) lacking inversion symmetry. We demonstrate the experimental data is reproduced by impurity effects on monolayer MoS₂. In a model for generic monolayer TMD with Rashba spin-orbit coupling we show upper critical field increase by impurity effects.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

2004年の結晶構造に空間反転対称性を持たない物質CePt₃Siにおける超伝導の発見[1]をきっかけに、近年空間反転対称性の破れた超伝導が注目されている。空間反転対称性の破れは反対称スピン軌道相互作用を発現させ、それは超伝導状態において様々な興味深い現象が引き起こされる。その一つの現象として、空間反転対称性の破れた2次元超伝導体における、Pauli 極限を大きく越える上部臨界磁場が知られている。例としては、MoS₂単層やNbSe₂単層などの遷移金属ダイカルコゲナイド単層における電場誘起超伝導[2, 3]が挙げられる。これらではZeeman型反対称スピン軌道相互作用が大きな上部臨界磁場を誘起していることが分かっている[2, 3]。しかし、MoS₂単層においてZeeman型反対称スピン軌道相互作用のみを考慮しただけの理論計算は、高温領域で実験結果を定量的に再現するものの、極低温領域では発散的な上部臨界磁場を示し[2]、これは実験事実と矛盾する。この原因としてこの先行研究では不純物効果を扱っていないことが挙げられる。またMoS₂単層において不純物効果を扱い、実験に近い上部臨界磁場を計算した先行研究[4]はあるが、これは解析的に解くためにモデルが格子の形状を反映したものではなく、ミクロな視点から現実の物質をモデル化したものではない。

またRashba型反対称スピン軌道相互作用が強く作用する2次元超伝導体Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Tl, Pb)で非従来型超伝導が観測された[5]。そして、Rashba型反対称スピン軌道相互作用のみある2次元超伝導体の系について、不純物濃度が濃くなるほど上部臨界磁場が大きくなる理論が知られている[6]。この結果はZeeman型とRashba型の間で不純物効果が定性的に異なることを示唆しているが、現実的なモデルで両者を系統的に調べた理論研究は存在しない。

そこで本研究では、(i)MoS₂単層に対する第一原理計算から導出したモデルで、上部臨界磁場に対する不純物効果を計算した。また(ii)遷移金属ダイカルコゲナイド単層の一般的なモデルを用いZeeman型とRashba型反対称スピン軌道相互作用とを統一的に扱い、上部臨界磁場に対する不純物効果を計算した。これにより、(i)不純物効果により実験結果に近い形の上部臨界磁場(Fig. 1)が得られ、(ii)現実の物質に即したモデルでもRashba型反対称スピン軌道相互作用のみの2次元系では不純物効果により上部臨界磁場が上昇する(Fig. 2)ことが示された。

References

- [1] E. Bauer, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 027003.
- [2] Y. Saito, *et. al.*, Nat. Phys. **12** (2016). 144
- [3] X. Xi, *et. al.*, Nature Physics **12** (2015) 139 EP
- [4] S. Ilić, J. S. Meyer, and M. Houzet Phys. Rev. Lett. **119** (2017) 117001
- [5] T. Nakamura, *et. al.*, Phys. Rev. B **98** (2018) 134505
- [6] Ol'ga Dimitrova, M. V. Feigel'man, Phys. Rev. B **76** (2007) 014522

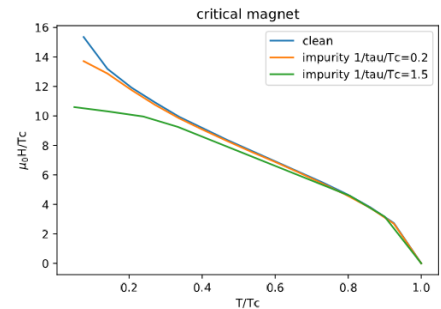


Fig.1 Critical magnet of MoS₂

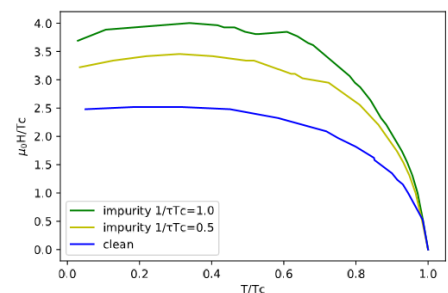


Fig.2 Critical magnet of Rashba ASOC SC

異方的超伝導体 Sr_2RuO_4 を用いた微細構造系の輸送特性

固体量子物性研究室 三好拓人

Abstract We investigated microstructures including the unconventional superconductor Sr_2RuO_4 to understand its superconducting symmetry. First, we studied the properties of superconducting junctions between Sr_2RuO_4 and other superconductors. Second, we investigated the magnetoresistance of FIB (focused ion beam)-fabricated Sr_2RuO_4 and observed 2-fold anisotropic H_{c2} depending on current direction.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

超伝導体 Sr_2RuO_4 の発見以来[1], この物質がスピン三重項カイラル p 波超伝導体であることを支持する実験結果がいくつか得られてきた[2][3]. しかし最近行われた低エネルギーパルスを用いた核磁気共鳴ナイトシフト測定の結果は, この推定に反する可能性が高く[4], ab 面内での上部臨界磁場の抑制や[5], 熱磁気効果測定などから明らかになった面内磁場下での超伝導一次転移も[6], スピン三重項カイラル p 波超伝導というシナリオでは説明できない. 以上の事実を踏まえ, 我々は 2 つの手法を用いて超伝導対称性に関するさらなる検証に取り組んだ.

1 つ目は Sr_2RuO_4 と偶パリティ超伝導体との超伝導接合の研究である. 超伝導接合は超伝導対称性の有力な検証手段であり, 例えば $\text{Pb}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Pb}$ 接合においては, Sr_2RuO_4 が p 波超伝導性を持てば非単調な臨界電流温度依存性が現れると予測されている[7]. しかし, Sr_2RuO_4 の ab 劈開面と他物質との界面で高い伝導性を実現するには, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ や $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ など, Sr_2RuO_4 と同じペロブスカイト型の基本構造を持つスピン一重項超伝導薄膜をエピタキシャル成長させるなどの工夫が必要である.

本研究では Sr_2RuO_4 単結晶に, パルスレーザー蒸着法で $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ または $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ 薄膜を成長させて超伝導体のヘテロ構造の作製や微細加工を行い, 輸送特性を測定した. いくつかの試料で界面の高伝導性や超伝導転移に由来する振る舞いが観測されたが, いずれの場合も単結晶の非平坦性などが原因で複雑な特性を示していたため, 超伝導性の解明に向けて, 作製手順の改良が求められる.

2 つ目の研究は面内磁場下での磁気抵抗測定である. 当研究室での先行研究によって, 磁気抵抗測定においても面内磁場下での一次転移が確認されたが, 他の物理量測定で見られた上部臨界磁場の面内 4 回対称性に加え, 100 mK での抵抗測定において 2 回対称性も観測された[8]. この異方性は面内磁場によって誘起された新たな超伝導相が起源となっていると期待される.

そこで我々は電流下での上部臨界磁場の面内 2 回対称性の起源を明らかにするために, 集束イオンビームによって加工した微小試料を用いて輸送特性の測定を行った. この微細加工によって試料の[100]と[010]の 2 方向に電流を印加することができた. 電流方向を変えると 2 回対称性の符号も変化することから, 試料のひずみなどが起源である可能性は排除されたが, 興味深いことに 300 mK 以上で観測された 2 回対称性は先行研究と反対の符号を持っていた. これらの結果から, 渦糸駆動による 2 回対称性が支配的な高温領域と磁場下での対称性の低い超伝導状態による 2 回対称性が支配的な低温領域の間でクロスオーバーが生じている可能性が考えられる.

References

- [1] Y. Maeno *et al.*, Nature **372**, 532 (1994).
- [2] K. Ishida *et al.*, Nature **396**, 658 (1998).
- [3] G. M. Luke *et al.*, Nature **394**, 558 (1998).
- [4] A. Pustogow *et al.*, Nature **574**, 72 (2019).
- [5] K. Deguchi *et al.*, J Phys. Soc. Jpn. **71**, 2839 (2002).
- [6] S. Yonezawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).
- [7] C. Honerkamp and M. Sigrist, Prog. Theo. Phys. **100**, 53 (1998).
- [8] H. Suwa, 修士論文『 Sr_2RuO_4 の電気抵抗測定における超伝導一次転移と上部臨界磁場の面内二回対称性の観測』(2019).

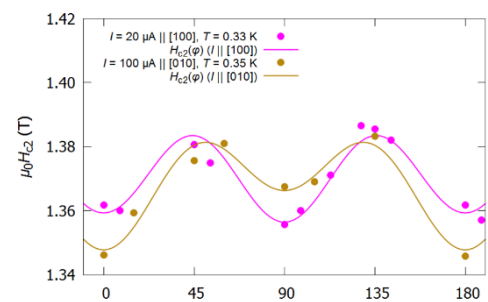


Fig. 1: In-plane angle dependence of the upper critical field; purple: $I \parallel [100]$, yellow: $I \parallel [010]$.

冷却原子フェルミ超流動における 散逸が誘起する物性の研究

凝縮系理論グループ 山本和樹

Abstract We study an ultracold fermionic superfluid with two-body loss of Cooper pairs. We develop a mean-field theory for non-Hermitian BCS superfluid with a complex-valued interaction. By analyzing a gap equation, we find reentrant superfluidity accompanying exceptional manifolds unique to non-Hermitian systems due to the continuous quantum Zeno effect.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

In recent years, non-Hermitian (NH) quantum systems have been actively studied both experimentally and theoretically. It has been revealed that non-Hermiticity drastically alters the properties of a number of quantum phenomena that have been established in the Hermitian physics [1, 2]. Such theoretical predictions have been confirmed experimentally by using optical systems and ultracold atoms. However, since most of the previous studies dealt with single-particle physics, understanding of many-body physics in NH systems is yet in its infancy. Motivated by recent experimental advances in ultracold fermionic atoms, we analyze a non-Hermitian (NH) BCS Hamiltonian with complex-valued interactions arising from inelastic scattering between fermions [3]. We develop a mean-field theory to obtain a NH gap equation for order parameters, which are similar to but different from the standard BCS ones because of the inequivalence of left and right eigenstates in the NH physics. We find unconventional phase transitions unique to NH systems: the superfluidity breaks down and reappears with increasing dissipation, featuring non-diagonalizable (exceptional) points, lines, and surfaces in the quasiparticle Hamiltonian for weak attractive interactions [Fig. 1(a)]. As for strong attractive interactions, the superfluid gap never collapses but is enhanced by dissipation due to an interplay between the BCS-BEC crossover and the quantum Zeno effect [Fig. 1(b)].

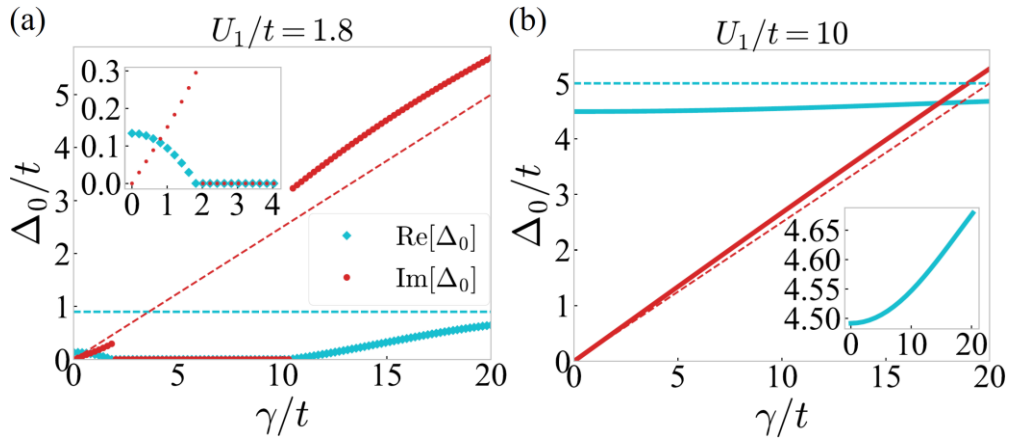


Fig. 1. Numerical solution of the order parameter Δ_0 as a function of dissipation γ obtained from the NH gap equation for (a) $U_1/t = 1.8$ and (b) $U_1/t = 10$, where t is the hopping amplitude and U_1 is the attractive interaction. We assume a cubic lattice.

References

- [1] Yuto Ashida, Shunsuke Furukawa, and Masahito Ueda, *Nature Commun.* **8**, 15791 (2017).
- [2] Masaya Nakagawa, Norio Kawakami, and Masahito Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 203001 (2018).
- [3] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Kyosuke Adachi, Kazuaki Takasan, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 123601 (2019).

2H-NbSe₂ の金属相における 高強度電場下のキャリアダイナミクス

光物性研究室 下村 耕生

Abstract We investigated the nonlinear response of metals under intense mid-infrared excitation. High harmonics up to the 9th order have been confirmed in the metallic phase of 2H-NbSe₂. The results suggest that the main mechanism of the high harmonics are generated from the nonlinear current of free carrier.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、中赤外やテラヘルツ帯域において、半導体・絶縁体の高強度電場(~10 MV/cm)に対する応答が盛んに研究されている[1]。このような状況下では、キャリアが電場によってコヒーレントに大きく駆動されることに由来する応答がみられる。典型的な現象の 1 つに高次高調波発生 (HHG) がある。HHG は試料に高強度のレーザーを照射した際に、入射光の周波数の整数倍の周波数の光が高次まで放射される現象である。半導体・絶縁体における HHG は、(1)高強度電場による価電子帯から伝導帯へのキャリアのトンネリングによる電子正孔対生成、(2)電場による電子正孔対のバンド内加速、(3)電子正孔対の再結合というステップが周期的に繰り返されることにより生じると考えられている[2]。この際にバンド内の非線形電流とバンド間の非線形分極が高調波に寄与する。気体の場合と異なり、バンド構造や原子間結合を反映し、物質ごとに多様な結果が報告されている[3]。一方、金属では、遮蔽効果により高強度電場を印加すること難しいため、高強度電場に対する応答はほとんど調べられてこなかった。特に典型的な実験条件下(電場強度~10 MV/cm)ではトンネリングによる電子正孔対の数よりも自由電子のほうが多いので、非線形電流由来の HHG が観測されることが考えられるが、金属における HHG の報告は全くない。

本研究では、常温で金属状態である 2H-NbSe₂ の超薄膜(~25 nm)に高強度中赤外光(波長 4.8 μm 、内部電場強度~5 MV/cm)を照射し、5 次、7 次、9 次の高調波を金属物質においてはじめて観測した。図 1(a)は、中赤外光強度が 5 MV/cm のときの高調波のスペクトルである。各次数に対応するピーク構造とともに 1.5 eV~4 eV までのブロードな輻射がみられる。これは、中赤外電場のサイクル(~6 fs)と同程度と非常に速い 2H-NbSe₂ のキャリアキャリア散乱時間(~10 fs)により生成したホットキャリアによる熱輻射であると考えられる[4]。図 1(b)は中赤外高強度を変化させたときの 5 次(赤丸)と 7 次(青四角)の高調波の強度変化である。破線は摂動論から予測される振る舞いを示している。実験結果は摂動論的な予測から外れており実際にキャリアがバンド内で広範囲にわたって駆動されていることを示している。また、高調波がバンド内電流に由来すると仮定した数値計算結果と実験結果を比較したところ、スペクトル形状や強度依存性に定性的な一致が見られた。このことから、高強度中赤外電場によって駆動された自由電子由来の非線形電流によって高調波が発生していることが示唆される。

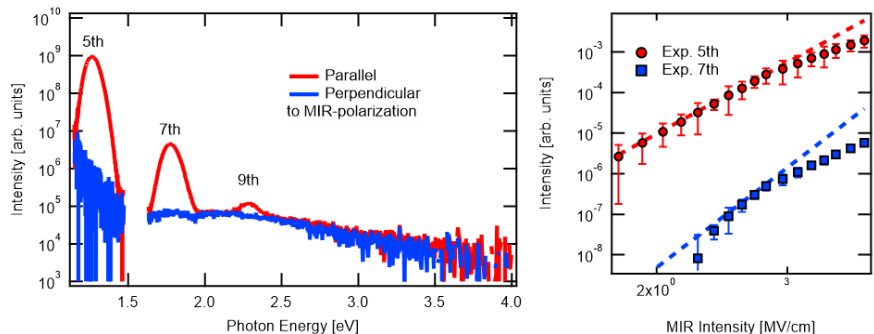


Fig. 1-(a) High harmonic spectra with parallel (red) and perpendicular (blue) polarized condition to the MIR-polarization. (b) MIR-intensity dependences of 5th (red circle) and 7th (blue square) harmonics.

References

- [1] S. Kruchinin, F. Krausz, V. Yakovlev, Review of Modern Physics, 90(2), 021002. (2018).
- [2] G. Vampa, et al., Physical Review Letters, 113(7), 073901. (2013).
- [3] S. Ghimire, D. Reis, Nature Physics, 15(1), 10-16. (2018).
- [4] R. Bachmann, H. Kirsch, T. Geballe, Solid State Communications, 9(1), 57-60. (1971).