

# A-1

## ひねり境界条件を用いたイジング転移の数値計算

九大理

守屋俊志, 野村清英

Numerical calculation of Ising transition using twisted  
boundary conditions

*Dept. Phys, Kyushu Univ.*

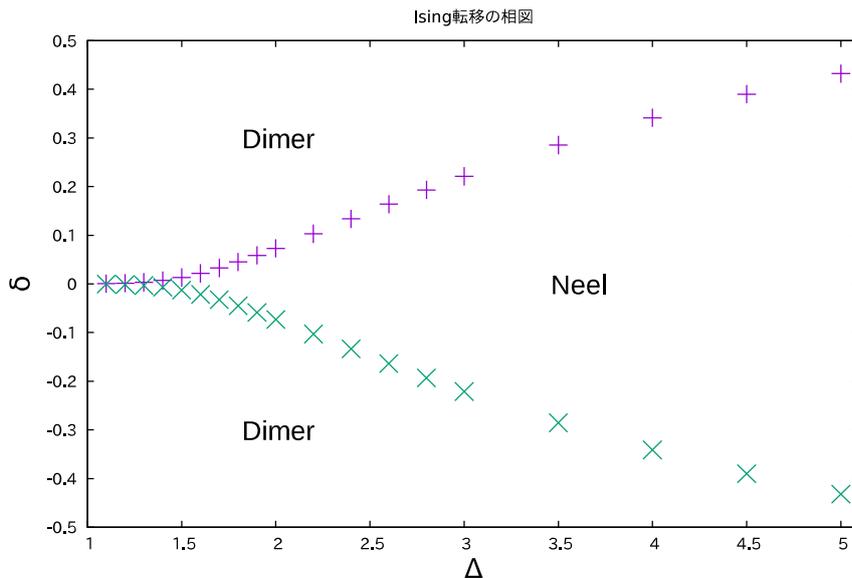
S.Moriya and K.Nomura

**Keywords :** 量子スピン, 相転移, ひねり境界条件, 数値的対角化

イジングモデルは可解であり、有限温度で秩序無秩序転移を起こすことが知られている。本研究では量子スピンモデルが持つイジングユニバーサリティクラスの転移に注目する。先行研究において、イジング転移点を数値的に計算する手法として現象論的繰り込み群法が使われてきたが、サイズ依存性がやや大きく、数値計算が困難な多重臨界点付近などでは転移点の計算ができていなかった [1]。本研究では、サイズ依存性の小さい計算手法として、z 軸ひねり境界条件と y 軸ひねり境界条件を使った方法を提案する。イジングモデルの双対性から [2]、イジング転移点では z 軸ひねり境界条件の第 1 励起状態と y 軸ひねり境界条件の基底状態のエネルギーが等しくなる。この 2 つのエネルギーを用いて転移点を計算する。数値的対角化法を用いて、本研究の方法を S=1/2 ボンド交代 XXZ 鎖

$$\hat{H} = \sum_j [1 + (-1)^j \delta] [\hat{S}_j^x \hat{S}_{j+1}^x + \hat{S}_j^y \hat{S}_{j+1}^y + \Delta \hat{S}_j^z \hat{S}_{j+1}^z] \quad (1)$$

に適応しイジング転移点の計算を行った。この方法は現象論的繰り込み群に比べサイズ依存性が小さく多重臨界点付近でも計算をすることができる。



[1] H.Nishimori, K.Okamoto and M.Yokozawa. J.Phys.Soc.Jpn, 56, 11, 4126, 1987.

[2] G.Cabrera and R.Jullien. Phys.Rev.B, 35, 7062, 1987.

## 光格子中のスピン 1 Bose 凝縮体の Ginzburg-Landau 理論

中央大学理工学部

山鹿汐音, 土屋俊二, 吉井涼輔

Ginzburg-Landau theory of spin-1 BEC in optical lattice

*Department of Physics, Chuo University, 1-13-27**Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo*

Shion Yamashika, Shunji Tsuchiya, and Ryosuke Yoshii

Keywords : 冷却原子気体, 光格子, 超流動状態-Mott 絶縁状態相転移

レーザーの干渉によって作られる周期的ポテンシャル (光格子) 中の Bose 凝縮体は Mott 絶縁 (MI) 状態と超流動 (SF) 状態間の相転移が生じることが知られており, 2002 年には  $^{87}\text{Rb}$  における MI-SF 相転移の観測実験が成功している [1]. また, スピン 1 のアルカリ原子気体を光格子中に閉じ込めることで, スピン自由度が残った強相関 Bose 粒子系を実現することができる. この系はスピンの無い系に比べスピン自由度に起因する豊かな相構造や集団モードの発見が期待できるため, 研究対象として非常に興味深い.

本研究の目的は光格子中のスピン 1 の内部自由度を持つ粒子系の MI-SF 相境界付近における系の振る舞いを理解することである. 上記の系は相互作用のパラメーターによって強磁性, 反強磁性的な振る舞いを示す他, 各格子内の粒子数の偶奇性に対応して異なる基底状態をとる. 今回は系の振る舞いに対するスピン内部自由度の影響がより強くなると予想される, 反強磁性的な相互作用を持つ絶対零度の系に着目し, Ginzburg-Landau 理論の考え方を元に松原形式や摂動論を用いて系の秩序パラメーターの挙動を支配する方程式 (Ginzburg-Landau 方程式) を導いた.

Ginzburg-Landau 方程式の数値解析の結果, 上記の系において MI-SF 相転移の次数がスピン-スピン相互作用の大きさに依存することが明らかとなり, スピンの無い系では見られない新たな相構造が発見された. さらに, 同方程式を一様解周りの揺らぎについて線形化し解くことにより, スピン空間の対称性が自発的に破れることによって生じる, スピン 1 Bose 凝縮系特有の集団モードが見つかった.

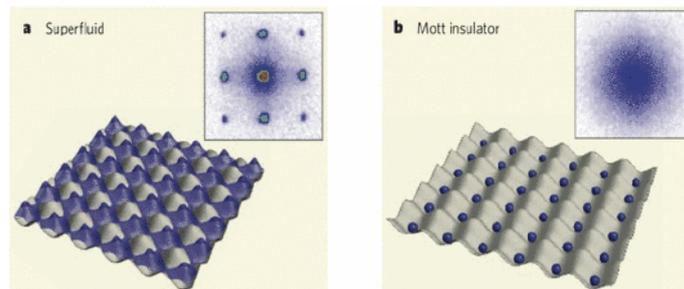


図 1: 超流動状態 (左) と Mott 絶縁状態 (右)

[1] M. Greiner *et al.*, Nature(London) **415**, 918 (2002).[2] S. Tsuchiya, S. Kurihara, and T. Kimura *et al.*, Phys.Rev.A **70**, 043628 (2004).[3] Y. Kato, D. Yamamoto, and I. Danshita *et al.*, Phys.Rev.Lett **112**, 055301 (2014).

## トポロジカル Dirac 半金属における 磁壁誘起電荷蓄積

東北大学 金属材料研究所 金属物性論研究部門<sup>A</sup>  
東北大学 スピントロニクス学術連携研究教育センター<sup>B</sup>  
日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター<sup>C</sup>

渡邊成<sup>A</sup>, 野村健太郎<sup>A,B</sup>, 荒木康史<sup>C</sup>

Charge accumulation induced by magnetic domain wall  
in topological Dirac semimetal

<sup>A</sup> *Theory of Solid State Physics, Institute for Materials Research,  
Tohoku University*

<sup>B</sup> *Center for Spintronics Research Network, Tohoku University*

<sup>C</sup> *Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency*

Jin Watanabe<sup>A</sup>, Kentaro Nomura<sup>A,B</sup> and Yasufumi Araki<sup>C</sup>

**Keywords:** トポロジカル物質, トポロジカル Dirac 半金属, 磁壁,  
ノーダルライン半金属, スピントロニクス, 数値計算

近年、トポロジカル絶縁体や Weyl 半金属といったトポロジカル物質中の、エネルギー損失の少ない相対論的電子が、スピントロニクスデバイスで重要な役割を果たすことが注目を集めている[1]。また強磁性体中の磁壁は、レーストラックメモリー等の磁気記憶デバイスで、情報伝達のキャリアとしての役割を果たすことが理論的、実験的にも示されている[2-3]。そのため、トポロジカル物質に磁壁構造を作ることによって、エネルギー損失の少ない磁気デバイスへの応用が期待される[4-5]。本研究では磁壁構造のあるトポロジカル Dirac 半金属のタイトバインディングモデルを、数値計算によって対角化することで、エネルギー分散と電荷蓄積を計算した。

[1] D.Pesin and A.H.MacDonald, *Nature Materials* {**11**},409-416(2012)

[2] Gen Tatara *et al.*, *Phys. Rep.* {**468**},213-301(2008)

[3] Stuart S.P.Parkin *et al.*, *Science* {**320**},190-194(2008)

[4] Yasufumi Araki *et al.*, *Phys.Rev.B* {**94**},115312(2016)

[5] Yasufumi Araki and Kentaro Nomura, *Phys.Rev.App* {**10**},014007(2018)

# A-4

## 核磁気共鳴法(NMR)の基本的な原理とその応用

名大院理,  
國枝和輝

What is NMR?

*Department physics of Nagoya University*  
*Kazuki Kunieda*

**Keywords: 核磁気共鳴法、NMR、ナイトシフト、電気四重極子相互作用、核磁気緩和率**

核磁気共鳴法(NMR)は物理学だけでなく化学(有機化合物の構造決定等)や医学(MRI:核磁気共鳴画像法)といった多分野でも応用されている。NMR は原子核の磁気モーメントと外部磁場の共鳴現象を観測する手法であり、その共鳴現象には原子核と周囲の電子の電氣的(電気四重極相互作用)および磁氣的な超微細相互作用(ナイトシフト)と呼ばれる相互作用が大きな影響を与える。その相互作用は結晶構造のわずかな対称性の破れや周囲の電子状態の変化をも見逃さず NMR スペクトルに反映される。また、核磁気緩和率は物質の磁気揺らぎを説明する。各秩序状態で、核磁気緩和率は異なる温度依存性を持つため、その測定によって物質の秩序状態や相転移温度を決定することができる。

本分科会では NMR が低温での遷移金属の結晶構造や電子状態を調べる研究にどのように活用されているかを紹介すること最終目的とする。NMR の基本的な原理や観測する物理量の紹介のあとに現在 NMR を用いた研究を発表している論文のレビューを行い、その具体的な応用について説明する予定である。(レビューする論文の内容は未定)

- [1] 瀧川仁、「核磁気共鳴法とその固体物理学への応用」(物性若手夏の学校テキスト)
- [2] 朝山邦輔、「遍歴電子系の核磁気共鳴」(裳華房、2002)
- [3] Charles P.Slichter(原著)、増田義賀(翻訳)「核磁気共鳴の原理」(Springer)

## 強磁性カゴメ格子における電場誘起磁壁駆動に関する理論研究

東北大金研<sup>A</sup>, 理研 CEMS<sup>B</sup>

金 世勲<sup>A</sup>, 紅林 大地<sup>B</sup>, 野村 健太郎<sup>A</sup>

Electrically-driven domain wall motion in a ferromagnetic Kagome lattice

<sup>A</sup>IMR, Tohoku Univ., <sup>B</sup>RIKEN CEMS

Sehoon Kim<sup>A</sup>, Daichi Kurebayashi<sup>B</sup> and Kentaro Nomura

**Keywords: spintronics, spin torque, domain wall, quantum anomalous Hall state, topological materials**

This study investigates an electrically-driven domain wall motion of quantum anomalous Hall states on a ferromagnetic Kagome lattice [1], [2]. The quantum anomalous Hall state has an insulating bulk and less dissipative edge conduction in parallel and is expected to be a new candidate for application to spintronic devices that has low energy consumption, such as the racetrack memory [3].

We calculate the non-equilibrium spin polarization around the magnetic domain wall as a response to an external electric field. As a result, we obtain that the spin-transfer torque [4], [5] in the ferromagnetic Kagome lattice which has an only non-adiabatic contribution, leading to the suppression of the intrinsic pinning effect [6]. We show that the obtained non-adiabatic spin-transfer torque can drive magnetic textures faster than the one in conventional ferromagnetic metals without the intrinsic threshold current. We remind that this phenomenon occurs even in the bulk insulator, which overcomes the Joule heating problems in the conventional metals. Therefore, much more efficient manipulation of magnetic textures can be achieved.

[1] L. Ye *et al.*, Nature **555**, 638 EP (2018).

[2] E. Liu *et al.*, Nat. Phys. **14**, 1125 (2018).

[3] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, Science **320**, 190 (2008).

[4] J. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater. **159**, L1 (1996).

[5] L. Berger, Phys. Rev. B **54**, 9353 (1996).

[6] G. Tatara, H. Kohno and J. Shibata, Phys. Rep. **468**, 213 (2008).

## $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ 薄膜における輸送特性の膜厚依存性

東北大院理<sup>A</sup>, 東北大 AIMR<sup>B</sup>

永田一将<sup>A</sup>, 松下ステファン悠<sup>A</sup>, Kim Khuong Huynh<sup>B</sup>, 谷垣勝己<sup>A,B</sup>

**The thickness dependence of transport properties**

**in  $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$  thin film**

*Dept. of Phys. Tohoku Univ<sup>A</sup>, Tohoku Univ AIMR<sup>B</sup>*

**Kazumasa Nagata<sup>A</sup>, Stephane Yu Matsushita<sup>A</sup>, Kim Khuong Huynh<sup>B</sup>,**

**Katsumi Tanigaki<sup>A,B</sup>**

**Keywords: トポロジカル絶縁体, 輸送特性, 熱電変換**

3次元トポロジカル絶縁体(3D-TI)は、表面のディラック電子系が形成する特異な表面状態が盛んに研究されている。3D-TIは数nmの薄膜にすることで、そのギャップレスな表面状態にギャップが生じる事が知られている[1]。本研究では高いバルク絶縁性を持つ $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ 単結晶を気相成長法を用いて薄膜化する事で[2]、表面状態が支配的な伝導を実現した。電気抵抗・SdH振動に加え、ゼーベック係数等の熱電特性を含んだ多角的な輸送特性の膜厚依存性を測定し、膜厚減少による表面支配的な伝導の実現や表面ギャップによる輸送特性への影響を議論する。

[1] Y. Zhang et al., Nat. Phys. **6**, 584 (2010).

[2] N.H. Tu et al., App. Phys. Lett. **105**, 063104 (2014).

## 超伝導エッジ状態におけるエーデルシュタイン効果

京大理

池田 侑平, 柳瀬 陽一

Edelstein effect in superconducting edge states

*Department of Physics, Kyoto University*

Y. Ikeda and Y. Yanase

**Keywords :** 超伝導体、トポロジカル超伝導体、スピントロニクス

次世代のナノデバイスへの応用の期待から、近年スピントロニクス分野が盛んに研究されている。例えば、空間反転対称性の破れた系においては、Edelstein 効果 (電流誘起磁化) により電流を用いて磁化を制御することが可能であり、実際に強磁性体 [1] や反強磁性体 [2] における磁区反転が実験的に観測されている。だが、少なくとも  $10^5 \text{ Acm}^{-2}$  程の巨大な電流密度が必要となることが知られており、ジュール熱によるエネルギー散逸が大きいことが応用上の課題となっている。そこで、散逸なく電流を流すことのできる超伝導体を利用したスピントロニクスに注目が集まっている。

一方超伝導分野では、超伝導相をトポロジーという側面から理解しようという試みが近年進められ、トポロジカル超伝導という研究分野が誕生した。これまで多くの研究ではフルギャップのトポロジカル超伝導体に現れる Majorana 準粒子が注目されてきたが、申請者はギャップがゼロ点 (ノード) をもつ異方的トポロジカル超伝導体に注目した [3]。後者には Majorana フラットバンドという特異な表面状態が生じることが知られており [4]、状態密度が発散的であることから巨大な輸送応答が期待される。そこで、ノードがある異方的超伝導体のトポロジーに起因する特異な輸送現象を探索した。

解析の結果電流を印加した超伝導では、Majorana フラットバンドが一方向性 Majorana 状態に変化することがわかった。さらに、エーデルシュタイン効果が超伝導体界面において、バルク領域と比較して 1 桁増大することがわかった。

[1] I. M. Miron *et al.*, *Nature Materials* **9**, 230 (2010).

[2] P. Wadley *et al.*, *Science* **351**, 587 (2016).

[3] A. Daido *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 134507 (2017).

[4] K. Yada *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 064505 (2011).

**積層カゴメ格子系強磁性ワイル半金属における磁気輸送特性**

東北大学金属材料研究所 <sup>A</sup>,  
東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター<sup>B</sup>  
小沢 耀弘 <sup>A</sup>, 野村 健太郎 <sup>A, B</sup>

Title

<sup>A</sup>*Institute for Materials Research, Tohoku University*

<sup>B</sup>*Center for Spintronics Research Network, Tohoku University*

Akihiro Ozawa<sup>A</sup> and Kentato Nomura<sup>A, B</sup>

**Keywords:** ワイル半金属, 異常ホール効果, カゴメ格子

ワイル半金属は、そのエネルギーバンド構造に3次元的なギャップレス線形分散を持つゼロギャップ半導体である[1][2]。そのギャップレス分散はワイル点と呼ばれ、ベリー曲率と呼ばれるトポロジカルな性質を持つ仮想磁場を運動量空間で生成する。磁気的な相互作用により時間反転対称性を破った磁性ワイル半金属は、磁気的な自由度と電荷の自由度が強く結合するために多彩な電磁気現象を引き起こすことが理論的に提案されている。中でも異常ホール効果はワイル点が生成するベリー曲率により説明される興味深い現象の一つである。

近年、強磁性積層カゴメ格子系物質  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  が磁性ワイル半金属の有力な候補物質であることが第一原理計算[3][4]および実験[3][4]によって報告された。この物質は20%にも達する異常ホール角  $\theta = \sigma_{xy}/\sigma_{xx}$  を有し、縦伝導率  $\sigma_{xx}$  は小さいが異常ホール伝導率  $\sigma_{xy}$  は大きくなる理想的なワイル半金属として注目されている。

本研究では、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  におけるワイル半金属状態を有効的に記述するタイトバインディング模型[5]を用いた磁気輸送特性について議論する。

[1]X. Wan, et al., Phys. Rev. B **83**, 205101(2011).

[2]A. A. Burkov, et al., Phys. Rev. L **107**, 127205(2011).

[3]E. Liu, et al., Nat. Phys. **14**, 1125-1131(2018).

[4]Q. Wang, et al., Nat. Comm. **9**, 1, 3681 (2018).

[5]A. Ozawa, K. Nomura, arXiv:1904.08148 (2019).

## 空間対称性に注目した

## 単層黒リンのトポロジカルエッジ状態の分類

大阪大学理学研究科物理学専攻<sup>A</sup>人見将<sup>A</sup>, 越野幹人<sup>A</sup>

Topological Edge States of Monolayer Black Phosphorene

<sup>A</sup>Dept. of Physics, Osaka UniversityMasaru HITOMI<sup>A</sup> and Mikito KOSHINO**Keywords: non-symmorphic 対称性、Bloch 状態、エッジ状態、黒リン**

層状物質の物性は理論、実験の双方で注目を集めており、リンの層状物質である単層黒リンは有限なバンドギャップを持つ半導体として広く知られている。黒リンは Fig.1 に示すようにグラフェンに似たよじれた六角構造を持っているが、armchair 切断面(線)、zigzag 切断面(線)の両方でエッジ状態を保つことが指摘されており[1](Fig.2)、zigzag のみでエッジ状態を示すグラフェン[2]と大きく異なっている。

本研究では、単層黒リンの持つエッジ状態をトポロジカルな観点から特徴付け、その起源を Berry 位相により特徴付けられるバルクの物理量である電子分極[3] を用いて明らかにした。計算の中で結晶の nonsymmorphic 対称性に注目し Hamiltonian を再構成し、エッジ状態が異なる軌道由来であることを明らかにした。

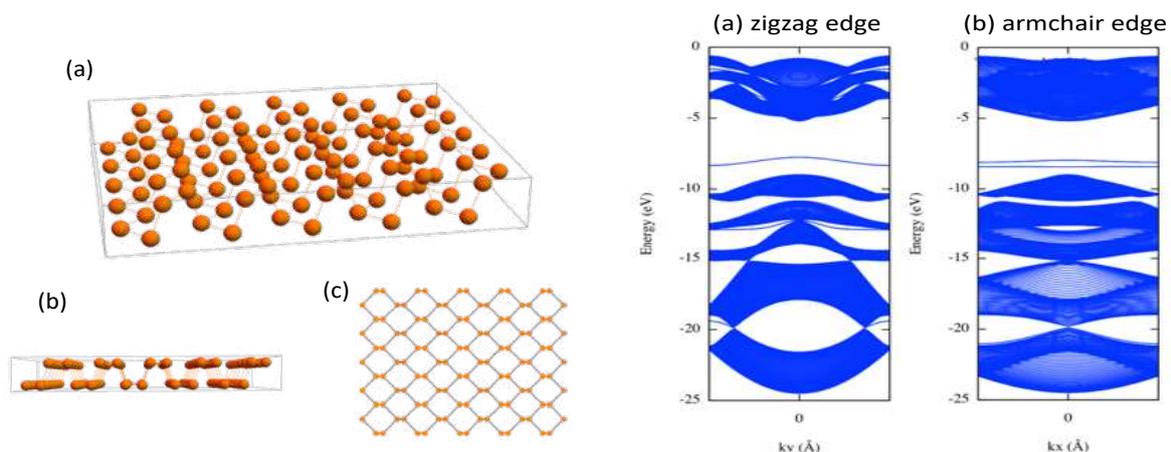


Fig. 1 monolayer black phosphorene

Fig. 2 The band structure

[1] T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 013703 (2015).

[2] K. Nakada, M. Fujita, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. B 54, 17 954 (1996).

[3] S. Coh, D. Vanderbilt, phys. Rev. Lett. 102, 107603 (2009)

# B-1

## 物理量の測定と状態変化における両立不可能性

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

濱村 一航

Quantum Incompatibility between Observables and Channels

*Department of Nuclear Engineering, Kyoto University*

Ikko Hamamura

Keywords : Quantum Incompatibility

量子論においては、物理量の測定や状態変化など様々な操作がある。複数の操作を同時に行なうような操作があるとき、その複数の操作は両立可能であるという [1]。例えば、同時測定可能な物理量の測定の組は両立可能であるが、位置と運動量のように同時に測定できない物理量の測定の組は両立不可能である。

もちろん、物理量の測定と状態変化についても両立可能か不可能かを議論することができる。例えば、何も変化しないという恒等変換と両立可能な物理量は情報を取り出せない物理量の測定である。何も状態を取り出せない物理量とは対照的に、任意の状態を区別することができるような物理量の測定があり、Informationally complete measurement と呼ばれている。この物理量と両立可能な状態変化はある意味でもっとも大きい擾乱をもたらす状態変化である [2]。

本発表では、両立不可能性についてレビューを行ない、情報と擾乱の関係について、定性的に議論し得られた結果を発表する。特に、[2] では、前順序関係を用いて定性的に状態識別能力と擾乱の関係について議論している。

## 参考文献

- [1] T. Heinosaari, T. Miyadera, and M. Ziman, “An invitation to quantum incompatibility,” *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* **49** no. 12, (2016) 123001, [arXiv:1511.07548](https://arxiv.org/abs/1511.07548), <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1751-8113/49/12/123001>.
- [2] I. Hamamura and T. Miyadera, “Relation between state-distinction power and disturbance in quantum measurements,” [arXiv:1610.08814](https://arxiv.org/abs/1610.08814) [quant-ph].

## 2 成分 Bose-Einstein 凝縮体中のレーザーポテンシャル駆動による

## 量子渦の形成

大阪市立大学理学研究科<sup>A</sup>, 大阪市立大学複合先端研究機構<sup>B</sup>, 大阪市立大学  
南部陽一郎物理学研究所<sup>C</sup>

韓俊植<sup>A</sup>, 坪田誠<sup>A,B,C</sup>

**Vortex formation from obstacle potential moving in miscible two-component  
Bose-Einstein condensates**

*Department of Physics, Osaka City University<sup>A</sup>, The Osaka City University  
Advanced Research Institute for Natural Science and  
Technology(OCARINA)<sup>B</sup>, Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and  
Experimental Physics (NITEP)<sup>C</sup>*

**Junsik Han<sup>A</sup> and Makoto Tsubota<sup>A,B,C</sup>**

**Keywords: BEC、量子渦**

一様な流れの古典流体中に円柱が存在すると、円柱後方の流れはレイノルズ数 ( $Re = UL/\nu$ ,  $U$ :流速、 $L$ :円柱の直径、 $\nu$ :粘性率) という無次元量によって特徴付けられる。 $Re \sim 100$  程度では円柱後方に渦列が形成されることが知られている (Karman 渦列)。流れを円柱に垂直な 2 次元系で考えることで、この渦列は渦点モデルを用いて解析的にも調べられている。渦点モデルは古典流体では限られた場合のみに用いられる近侍であるが、渦の循環が量子化される冷却原子気体 Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) では有用なモデルである。そして BEC 系において数値計算[1]、実験[2]の両方で Karman 渦列の形成が確認されている (図 1 は数値計算結果)。ただし、BEC 系では粘性が存在しないので、レイノルズ数は定義できず、凝縮体とポテンシャル (古典流体の例での円柱に対応) の相対速度が臨界速度を超えるかどうかで、量子渦の形成及び渦列の形成が決まる。本研究では系を 2 成分混合 BEC 系に拡張した時の量子渦及び渦列の形成を数値計算によって調べる。特に、多成分系で臨界速度がどのように影響を受けるかに着目し、それによる量子渦や渦列の形成が 1 成分系と比べてどのように変化するかを調べる。

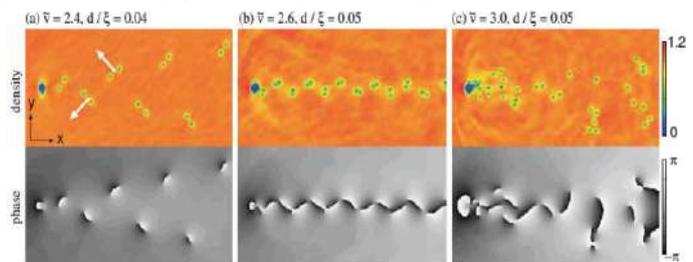


図1: 1成分2次元冷却原子気体BEC系中でのKarman渦列の形成[1]  
(a)異符号の渦対、(b)同符号の渦対 (Karman渦列)、(c)無秩序な渦の放出

[1] K. Sasaki, N. Suzuki, and H. Saito, Phys. Rev. Lett. {104}, 150404 (2010).

[2] W. J. Kwon, J. H. Kim, S. W. Seo, and Y. Shin, Phys. Rev. Lett. {117}, 245301 (2016).

## 光格子中の一次元冷却 Bose 気体系における ダークソリトンの準古典ダイナミクス

近大理工<sup>A</sup>, ハンブルク大<sup>B</sup>

尾崎裕介<sup>A</sup>, 長尾一馬<sup>B</sup>, 段下一平<sup>A</sup>, 笠松健一<sup>A</sup>

Semi-classical dynamics of a dark soliton in a one-dimensional lattice Bose gas

<sup>A</sup>Dept. of Phys. Kindai Univ., <sup>B</sup>ZOQ Hamburg Univ.

Yusuke Ozaki<sup>A</sup>, Kazuma Nagao<sup>B</sup>, Ipei Danshita<sup>A</sup>, Kenichi Kasamatsu<sup>A</sup>

**Keywords:** 冷却原子気体, Bose-Einstein 凝縮, 超流動, 量子多体系, Cold atom, Bose-Einstein condensation, Superfluid, Quantum many body system

超流動状態の一次元ボース気体系におけるダークソリトンはこの系の主要な低エネルギー励起の一つであるため、これまでその性質について実験・理論の両面から広範囲にわたって研究されてきた [1]。粒子数密度や相互作用の強さを調整することで、系の量子ゆらぎの効果を強くすることが可能であり、これまでに、Bogoliubov 理論、Bethe 仮設法、行列積状態などの様々な理論手法を用いて、ダークソリトンに対する量子ゆらぎの効果が調べられている。

一次元ボース気体に光格子を印加すると、古典領域でのダークソリトンの性質が質的に変化することが知られている。具体的には、連続系では動的に安定であったダークソリトンが格子系では動的に不安定になりうる。さらに、ダークソリトンの位相キックが格子点上にある場合と格子接合点上にある場合で動的安定性に顕著な違いが出る [2]。一方、量子ゆらぎが強い領域に関する行列積状態を用いた解析によると、量子ゆらぎによってダークソリトンが不安定化するものの、古典領域とは対照的に、その不安定性は位相キックの位置に依存しない。このことは、この二つの領域（古典領域と量子ゆらぎの強い領域）の間で、ダークソリトンの安定性の描像が切り替わることを示唆している。

本研究では、切断ウィグナー近似法を用いて、光格子中のダークソリトンのダイナミクスを準古典領域において数値的に解析する。古典領域から徐々に量子ゆらぎの強さを変化させることで、弱い量子ゆらぎでさえ、ダークソリトンの安定性に著しく影響を与えることを明らかにする。この結果から、古典的には動的安定性に違いがある二種のソリトンにおけるダイナミクスの違いを見ることで、ダークソリトンの不安定性の起源が古典由来なのか量子由来なのかを区別できるという提案を行う。

[1] D. J. Frantzeskakis, J. Phys. A: Math. Theor. **43**, 213001 (2010)

[2] R. V. Mishmash, *et al.*, Phys. Rev. A **80**, 053612 (2009)

# B-4

## 複数の量子チャンネルの順序の量子重ね合わせ： 量子状態保持への応用

早大理工

前田 豊, 新徳 誠也, 湯浅 一哉

### Quantum Superposition of Orders of Multiple Quantum Channels: Application to Quantum State Preservation

Waseda Univ.

Yutaka Maeda, Masya Shintoku, and Kazuya Yuasa

量子状態の重ね合わせと同様に、量子状態に施す操作の“順序”の量子力学的重ね合わせを考えることができる。これにより、単体では情報を消去してしまうようなチャンネル(操作)であっても、それを2つ用意し、それらの順序を量子力学的に重ね合わせることで、情報を伝送できるようになることが示された [1]。本研究では、 $N$  個のチャンネル ( $N \geq 2$ ) の量子的重ね合わせを考え、量子状態保持への応用の可能性を検討した。

順序の量子重ね合わせは“量子スイッチ”で実現することができる [1]。これは、チャンネルに通す注目系とは別に補助の系(制御系)を用意し、制御系の状態に応じて注目系を通すチャンネルの順序を変えるものである。このとき、制御系の状態を量子重ね合わせ状態にすることで、複数の順序の量子重ね合わせを実現することができる。

本研究では、 $d$  次元の量子系に作用する分極減衰 (depolarizing) チャンネル  $\mathcal{N}_q(\rho) = q\rho + (1-q)I/d$  を考えた。このチャンネルは入力状態を劣化させるチャンネルだが、これを  $N$  個用意し、それらに通す順序を重ね合わせる量子スイッチ  $\mathcal{S}[\mathcal{N}_q, \dots, \mathcal{N}_q](|\psi\rangle\langle\psi| \otimes |\phi\rangle_C \langle\phi|)$  を構成することによって量子状態の劣化を抑制する可能性を探った。 $|\phi\rangle_C$  は制御系の状態であり、この状態が順序の重ね合わせ方を決定する。この量子スイッチの出力状態から制御系を捨ててしまうと、順序の量子重ね合わせの効果は得られない。そこで、制御系を捨てる前に注目系と制御系にまたがってユニタリ操作  $V$  を施すことを考えた。すなわち、注目系の最終的な出力状態は  $\rho_B = \text{Tr}_C\{V\mathcal{S}[\mathcal{N}_q, \dots, \mathcal{N}_q](|\psi\rangle\langle\psi| \otimes |\phi\rangle_C \langle\phi|)V^\dagger\}$  となる。この出力状態  $\rho_B$  と入力状態  $|\psi\rangle$  との間のフィデリティをあらゆる純粋な入力状態  $|\psi\rangle$  に関して平均化した  $F(|\psi\rangle\langle\psi|, \rho_B)$  を状態保持の指標とし、この値を最大化する最適な  $V$  を探索した。その結果、順序の量子重ね合わせによって状態の劣化を抑制できるようになることが分かった。

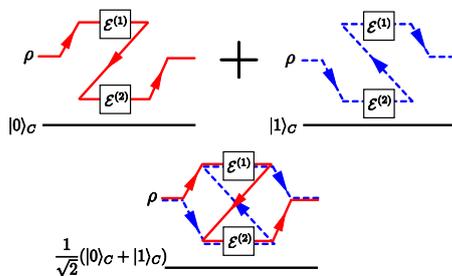


図 1: チャンネルが2個の場合の量子スイッチ。

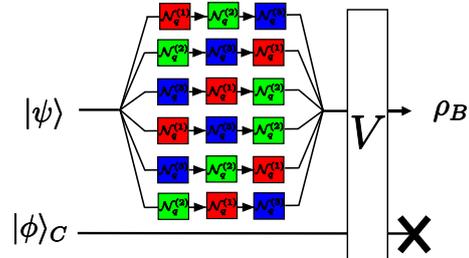


図 2: 量子スイッチを用いた状態保持の模式図 ( $N = 3$ )。

[1] D. Ebler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 120502 (2018).

# B-5

## トポロジカル誤り訂正符号入門

京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻<sup>1</sup>  
高城 翔矢<sup>1</sup>

### A guide to topological error correction code

<sup>1</sup>*Division of Physics and Astronomy, Graduate School of Science,  
Kyoto University*

Shoya Takagi<sup>1</sup>

**Keywords:** トポロジカル誤り訂正, トーリックコード, カラーコード

量子コンピューターは特定の問題を古典コンピューターよりも圧倒的に早く解くことが期待されているが、その実現には多くの課題が残っている。その一つが誤り耐性の実現である。量子コンピューターの基本単位であるキュービットはとても不安定で、そこに書き込まれた情報を保護しながら操作する方法は1995年に発見されたショアの符号をきっかけに、今日に至るまで様々な手法が発見され続け、現在も精力的な研究が続けられている分野である。量子誤り耐性は守りたい情報を多数のキュービットからなる特定の強くエンタングルした状態にエンコードして実現される。特にトポロジカル符号と呼ばれる誤り訂正符号は系のトポロジーがキュービットを保護し、効率的なデコードの手法としてくりこみ群が使えたり、ランダムイジング模型の分配関数を評価する事でエラー閾値が求まるなど、興味深い性質を持つ。トポロジカル誤り訂正は量子コンピューターの実現と物理学の最新の発展の両方に深く関わる概念であり、さらなる発展が見込まれる分野である。

今回の発表では、まず簡単な量子誤り訂正符号を通してそのアイデアを紹介し、スタビライザー符号の一種としてKitaevのトーリックコードを導入する。この符号はトラス上にキュービットを配置したもので、基底状態はそのトポロジー的な性質によって保護されている。その後、トーリックコードに比べて多くの操作を実装できるカラーコードを導入する。この符号に見られる励起は非常に豊富で、様々な励起状態同士をからみ合わせて行う量子計算トポロジカル量子計算への応用などが期待される。しかし、これらの符号は現実的な設定ではエラー閾値がまだまだ低く、実用化に向けて効率的なデコード手法の開発が今後の課題となっている。そこで、この問題に関する最近の研究を紹介し、発表を締めくくる。

# B-6

## 量子測定の繰り返しによる熱流の誘起

早大理工

棚橋 将, 越原 健太, 湯浅 一哉

### Heat Current Induced by Repeated Quantum Measurements

Waseda Univ.

Sho Tanahashi, Kenta Koshihara, and Kazuya Yuasa

量子系の熱力学に関する研究が盛んに行われており、量子熱デバイスが理論、実験の両面から議論されている。なかでも、量子熱機関や量子冷却器が大きな注目を集め、量子測定の役割についても議論されている [1]。本研究では、量子測定の効果によって熱流を誘起できることを示した先行研究 [1] に注目した。測定の仕方を工夫し、エンタングルメントをとらえるような測定を行うことによって、温度の低い熱浴から高い熱浴へと熱が流れているかのような効果を生じさせられることが示された。しかしながら、先行研究 [1] では系の時間発展を記述しておらず、有限時間での熱流を議論できない設定になっている。そこで本研究では、系の状態の時間発展を記述する量子マスター方程式を導出し、量子測定による状態変化に加えて量子マスター方程式に従って熱が流れるサイクルを解析して、定常サイクルにおける熱流カレントを議論した。

図1のように、温度が  $T_1$  と  $T_2$  の熱浴それぞれに2準位系が1つずつ接続されている設定を考える。2つの2準位系間に相互作用はなく、このままでは熱浴間に熱は流れない。しかし、この2つの2準位系に測定を行うと、その影響で2準位系の状態が変化した後、系が緩和する過程で2準位系と熱浴の間に熱が流れる。この量子測定と系の緩和過程までを1サイクルとし、これを有限の時間  $\tau$  の周期で繰り返すことによって、熱浴間に定常的に熱が流れているような状況を実現することができる。

系のハミルトニアン  $H = \sum_{i=1,2} H_i + H_B + H_{\text{int}}$  を次のようにモデル化した:

$$H_i = \frac{1}{2}\epsilon_i\sigma_z^{(i)}, H_B = \sum \int d\omega \omega a_\omega^{(i)\dagger} a_\omega^{(i)}, H_{\text{int}} = \sum_{i=1,2} \int d\omega [g^*(\omega)\sigma_+^{(i)} a_\omega^{(i)} + g(\omega)\sigma_-^{(i)} a_\omega^{(i)\dagger}].$$

ここで、 $\sigma_z^{(i)}, \sigma_\pm^{(i)}$  は2準位系  $i (= 1, 2)$  のパウリ演算子、 $\epsilon_i$  は2準位系  $i$  の2状態間のエネルギー差、 $a_\omega^{(i)}$  は熱浴  $i$  の消滅演算子である。このハミルトニアンから2準位系の状態の時間発展を記述する量子マスター方程式を導出し、量子測定に続いて量子マスター方程式で時間発展する過程を繰り返すサイクルの定常状態を求め、その定常サイクルにおける熱流カレントの表式を導いた。

どのように熱流が流れるかはどのような測定を行うかによって異なるが、一重項状態と三重項状態を測定基底とする測定を繰り返す場合について熱流カレントを解析すると、ボース分布関数  $n_i = (e^{\epsilon_i/k_B T_i} - 1)^{-1}$  の大小によって、 $n_1 > n_2$  のときに量子熱機関、 $n_1 < n_2$  のときに量子冷却器になることがわかった。また、測定間隔  $\tau$  が短い  $\tau \rightarrow 0$  の極限で熱流カレントの大きさが最大となることがわかった。

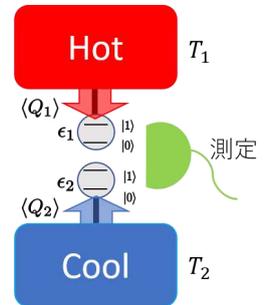


図 1: 設定

[1] L. Buffoni *et al.*, Phys. Rev. Lett **122**, 070603 (2019).

# B-7

## 量子系における情報伝播速度

東京大学 理学系研究科 物理学専攻  
吉永敦紀

Speed of information propagation in quantum systems

*Department of Physics, Graduate school of Science, The University of Tokyo*

Atsuki Yoshinaga

**Keywords:** 量子スピン系、Lieb-Robinson bounds

物理系において情報はどのような速さで伝わるだろうか。古典的な気体であれば、それは音速であるが、非局所的な相関が存在する量子系にも情報伝播速度は存在するのだろうか。相対論を考慮すれば少なくとも光速より遅いことは明らかであるが、実は純粋な量子力学で記述される系において、有限の情報伝播上限速度が存在することが知られている。

この発表では、Lieb-Robinson bounds [1,2] と呼ばれる、格子状の量子系における情報伝達速度に関する不等式を簡単に紹介する。この不等式は、Lieb と Robinson によって 1972 年に短距離相互作用スピン系で示され、現在まで、長距離相互作用系等に対する適用範囲の拡張や、量子系の基本的性質の研究への様々な応用がなされている。特に応用面では、量子系ダイナミクスの理論のみならず、量子多体系の（静的な）性質の理解にも貢献しており [3]、ギャップのある系の基底状態の相関の指数関数的な減衰 [4,5] や、高次元版 Lieb-Schulz-Mattis の定理の証明 [6] 等においても重要な役割を果たしている。

本発表では、Lieb-Robinson bounds とは何かという説明から始め、そこから得られる帰結、最近の関連研究までを紹介し、今後の課題について議論することを予定している。

[1] E. Lieb and D. Robinson, *Commun. Math. Phys.* **28**, 251. (1972).

[2] B. Nachtergaele, and R. Sims, arXiv:1004.2086 (2010).

[3] M. Kliesch, C. Gogolin, and J. Eisert, arXiv:1306.0716 (2014).

[4] B. Nachtergaele, and R. Sims, *Commun. Math. Phys.* **265**, 119. (2006).

[5] M. B. Hastings, and T. Koma, *Commun. Math. Phys.* **265**, 781. (2006).

[6] M. B. Hastings, *Phys. Rev. B* **69**, 104431 (2004)

## 変分量子回路パラメータ最適化のための逐次最小問題最適化法

東京大学大学院理学系研究科<sup>A</sup>, 大阪大学大学院基礎工学研究科<sup>B</sup>, JST さ  
きがけ<sup>C</sup>, 東京大学物性研究所<sup>D</sup>

中西 健<sup>A</sup>, 藤井 啓祐<sup>B,C</sup>, 藤堂 眞治<sup>A,D</sup>

Sequential minimal optimization for quantum-classical hybrid  
algorithms

*Graduate School of Science<sup>A</sup>, Graduate School of Engineering  
Science<sup>B</sup>, JST, PRESTO<sup>C</sup>, Institute for Solid State Physics<sup>D</sup>*

Ken M. Nakanishi<sup>A</sup>, and Keisuke Fujii<sup>B,C</sup>, and Synge Todo<sup>A,D</sup>

**Keywords :** 量子情報, NISQ, quantum information, NISQ

量子コンピュータは近年世界中の大企業や研究室で盛んに開発されており、現在では数十量子ビットの量子コンピュータが開発されています。これらはノイズがありスケールしない量子コンピュータであり、NISQ デバイスと呼ばれています。NISQ デバイスは、量子ゲートの忠実度が十分に高い場合には古典コンピュータではシミュレートできないと考えられています [1-3]。NISQ デバイス上で動くアルゴリズムの多くは、量子コンピュータによる量子状態計算と古典計算機による最適化を組み合わせる計算を行う量子古典ハイブリッドアルゴリズムです。量子古典ハイブリッドアルゴリズムの応用先は量子化学計算や組合せ最適化、量子機械学習など多岐にわたります。これらのアルゴリズムは、変分量子回路を用いて計算されたコスト関数が最小になるように変分量子回路のパラメータを最適化することで計算するアルゴリズムです。

我々は変分量子回路のパラメータ最適化のための最適化手法として、収束が速く、統計誤差に対して頑健で、ハイパーパラメータを持たない逐次最小問題最適化法を提案しました。変分量子回路の最適化問題は、解析的に最小値を求められる部分問題に分割できます。具体的にパラメータの中から1つを選択した場合を考えると、コスト関数は周期  $2\pi$  の単純なサインカーブとなっているので、選択したパラメータに関して最小値を厳密に求めることができます。複数のパラメータを選択した場合は、コスト関数は特定の周期の三角関数の単純な合計によって与えられるため、古典コンピュータだけで最小値を求められます。この部分問題を繰り返し解くことにより、コスト関数を最小化するように変分量子回路を最適化できます。

数値シミュレーションにより、提案手法を既存の最適化アルゴリズムと比較した結果、提案手法は既存の最適化アルゴリズムよりもはるかに優れており、パラメータの初期値にほとんど依らず解に収束することがわかりました。提案手法はあらゆる量子古典ハイブリッドアルゴリズムの高速化の目的で容易に用いることができるため、ノイズのある量子コンピュータの利用において重要なツールとなると期待できます。

[1] S. Boixo *et al.*, Nat. Phys. **14**, 595 (2018). [2] A. Bouland *et al.*, arXiv preprint arXiv:1803.04402 (2018). [3] J. Chen *et al.*, arXiv preprint arXiv:1805.01450 (2018).

# 基底状態量子モンテカルロによるエンタングルメント・エントロピーの測定

東京大学 理学系研究科<sup>A</sup>, 東京大学 物性研究所<sup>B</sup>

近藤 千尋<sup>A</sup>, 藤堂 眞治<sup>A, B</sup>

Measurement of Entanglement Entropy by Ground-State  
Quantum Monte Carlo  
*Graduate School of Science, The University of Tokyo<sup>A</sup>, ISSP,  
The University of Tokyo<sup>B</sup>*  
Chihiro Kondo<sup>A</sup> and Synge Todo<sup>A, B</sup>

**Keywords** : 計算物理, 統計力学基礎論, レニー・エントロピー,  
Rényi entropy

エンタングルメント・エントロピー [1] は量子多体系において, 量子力学由来の非局所な相関を特徴づける物理量であり, 量子相転移やトポロジカル秩序, 統計力学基礎論などの文脈で注目される. 特に基底状態 (絶対零度状態) は系の量子性を強く反映し, そのエンタングルメント・エントロピーの特性は積極的に研究されている.

このように物性分野の広い領域に渡って重要な意味を持つエンタングルメント・エントロピーであるが, その計算は困難であることが知られている. 現在までのところ, エンタングルメント・エントロピーを計算する方法としては厳密対角化, テンソルネットワーク, 密度行列繰り込み群, 量子モンテカルロなどがあるが, それぞれ異なる長所と短所を持つ.

我々はこれらのうち, 量子モンテカルロに基づいた従来手法 [2] に対し, 基底状態量子モンテカルロ [3] を用いることで, 適用範囲が有限温度に限られていた従来手法を絶対零度へ適用できるものにした. 本手法の特徴は, 高次元系への拡張のしやすさなどの量子モンテカルロの長所を持ちつつ基底状態のエンタングルメント・エントロピー, より正確には Rényi エントロピーが計算できる点である.

本分科会では我々の手法の解説と量子ハイゼンベルグ模型

$$\mathcal{H} = J \sum_{\langle i,j \rangle} [S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y + S_i^z S_j^z] \quad (1)$$

における計算結果の紹介を予定している.

[1] Calabrese and Cardy, J. Stat. Mech. P06002 (2004).

[2] Stephen Inglis and Roger G. Melko, Phys. Rev. E **87**, 013306 (2013).

[3] H. G. Evertz and W. von der Linden, Phys. Rev. Lett. **86**, 5164 (2001).

# C-1

## 水素化合物の高圧下での機械学習による構造探査

東北大学 理学研究科

中西建太, 是常隆

Machine learning assisted structure-prediction study for  
hydride superconductivities at high pressures

*Dept. of Phys. Tohoku University*

Kenta Nakanishi and Takashi Koretsune

**Keywords :** 構造探査、ガウス過程、フォノン超伝導

2014年に150GPa下で $\text{H}_3\text{S}$ が203Kの超伝導転移をすることが観測され[1]、さらに2018年には210GPa下で $\text{LaH}_x$ が215Kの超伝導転移することが観測された[2,3]。2019年5月現在では $\text{LaH}_x$ の転移温度は250Kと報告されている[4]。これら水素化合物超伝導物質の発見はフォノン機構超伝導のEliashberg理論をもとに第一原理計算によって予測された。すなわち、 $\text{H}_3\text{S}$ が200GPaで $Im\bar{3}m$ 構造をとり $T_c = 210\text{K}$ をもち、 $\text{LaH}_{10}$ が250GPaで $Fm\bar{3}m$ 構造をとり $T_c = 257 \sim 274\text{K}$ をもつことが予測[5]されたことによりDiamond anvil cellを用いた実験によって観測が行われたという経緯をもつ。

さらなる高圧下超伝導物質の探索のために2元水素化合物の高圧下での安定構造の探査が精力的に行われており、CALYPSOやUSPEXなどの探査ソフトウェアがよく用いられている。しかし、このソフトでは、Potential Energy Surfaceのglobal minimumの探索には何度も結晶構造の最適化を行う必要があり、最安定な構造を得るために10,000~100,000回ものDFT計算が必要である。そこで、機械学習ポテンシャルを導入することで、この最適化プロセスのDFT計算によるコストを削減できないかと考えた。

今回の発表では、機械学習ポテンシャルとしてガウス過程を利用して結晶の局所エネルギーを回帰するGaussian Approximation Potential[6]を利用し、実際に水素化合物の安定構造の探査を行ったので、その結果を紹介する。

[1] A.P. Drozdov *et al.* *arXiv* :1412.0460 (2014)

[2] A.P. Drozdov *et al.* *arXiv* :1808.07039 (2018)

[3] M. Somayazulu *et al.* *arXiv* :1808.07695 (2018)

[4] A.P. Drozdov *et al.* *Nature* **569**, 528531 (2019)

[5] Hanyu Liu *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci.* **114**, 6990 (2017)

[6] A. P. Bartok and G. Csanyi *Int. J. Quantum Chem.* **115**, 1051 (2015)

## 機械学習と液晶の相転移

東北大学 理学研究科 物理学専攻  
山本洋椰

**Machine learning and Phase transition of Liquid crystal**  
*Department of Physics Tohoku University*  
Hiroya Yamamoto

**Keywords:** 統計力学, 機械学習, 相転移, ネマティック液晶, ソフトマター

機械学習を用いて統計物理学の新しい物理法則を導くことを目標にしています。そのために、まずは既に出来上がっているとされている熱平衡の統計力学と熱力学を頼りに、物理法則を導く方法を構築したいと考えています。しかし、学習をさせた機械がどのような物理的な情報を持っているのかは明らかではありません。ただし、系のなオーダーパラメーターが得られることは知られています。そこで、一次相転移と二次相転移の代表として、無極性分子と極性分子でそれぞれネマティック液晶のモデルを作り機械に学習させオーダーパラメーターを調べて、どのような物理的な情報を持っているか、特に熱力学的極限で一次相転移か二次相転移であるかを区別できるかどうかを調べたいと思います。

## ベイズ学習による格子タンパク質デザイン

名大情報<sup>A</sup>, 名大工<sup>B</sup>高橋智栄<sup>A</sup>, 千見寺浄慈<sup>B</sup>, 時田恵一郎<sup>A</sup>

Title

*Graduate School of Informatics, Nagoya University<sup>A</sup>,  
Graduate School of Engineering, Nagoya University<sup>B</sup>  
Tomoei Takahashi<sup>A</sup>, George Chikenji<sup>B</sup> and Kei Tokita<sup>A</sup>*

Keywords : デザイン, 逆問題, ベイズ学習, 統計力学

「望みのタンパク質天然構造のみを熱平衡状態とするようなアミノ酸配列を見つける」という、タンパク質立体構造予測の逆問題をタンパク質のデザインという。この問題はタンパク質天然構造とアミノ酸配列の関係を明らかにする上での立体構造予測とは逆のアプローチであり、また高分子創薬などへの応用のためにも必須であるため、基礎科学的重要性と工学的重要性のどちらも高いテーマである。

我々はこの問題に対し、データサイエンス分野で頻繁に用いられるベイズ学習の方法によってアプローチする。すなわち天然構造（データ） $\mathbf{R}$ とそれを実現するためのアミノ酸配列（パラメータ） $\sigma$ がともに膨大な自由度の中から確率的に生成されたと考え、ベイズの定理  $p(\sigma|\mathbf{R}) \propto p(\mathbf{R}|\sigma)p(\sigma)$  における左辺の事後分布  $p(\sigma|\mathbf{R})$  を求めることによってアミノ酸配列のデザインを行う。タンパク質は天然構造をとっているときに熱平衡状態である [1] ことから、確率モデル  $p(\mathbf{R}|\sigma)$  として統計力学における確率分布を考え、事前分布  $p(\sigma)$  として何らかの分布を仮定する。我々は確率モデルとして、タンパク質が結合する周囲の水分子を含めて安定状態を実現している事実を踏まえ、グランドカノニカル分布を用いる。事前分布としては「進化によって折れたたんだときの自由エネルギーが低くなるような配列が出現する確率がより高くなっているだろう」という仮説を反映し、全構造パターンでグランドカノニカル分布の重みの和をとった量  $\Xi(\sigma)$  と、全構造・配列パターンで重みの和をとった量  $\Xi$  を用いて、 $p(\sigma) = \Xi(\sigma)/\Xi$  という分布を考える。すると [2,3] などに代表される先行研究において計算量的困難となっていた  $\Xi(\sigma)$  がキャンセルするため、非常に効率的なデザインを実現できる。[2,3] などでは、確率モデルとしてカノニカル分布を使い、事前分布は一様分布とし、配列を選ぶ度に折りたたみシミュレーションを行うが、我々は構造を固定し、アミノ酸配列のみを MCMC でサンプルしその期待値を解とする。

上記の方法では、特に二次元の格子タンパク質においてはデザインに成功するケースが多いが、三次元では基底状態はデザインできるものの、縮退した解を出す場合が多い。これは、タンパク質デザインが単なる逆イジング問題などと異なり、デザインした配列が特定の折れたたみ状態を取らなければならないことから生じる問題と思われる。そこで我々は、構造の相互作用グラフ（コンタクトマップのようなもの）の特徴もベイズ学習に取り入れ、縮退しない解をデザインすることを図る。当日はその結果を報告し、議論する。

[1] C. B. Anfinsen, *Science*, **181** 4096, 223-230 (1973).[2] J. M. Deutsch and T. Kurosky, *Phys. Rev. Lett* **76**, 323-326 (1996).[3] F. Seno, *et. al.*, *Phys. Rev. Lett* **77**, 1901 (1996).

## 深層学習におけるニューラルネットワークのコミュニティ構造の変化

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻<sup>A</sup>, 東京大学生産技術研究所<sup>B</sup>  
越智昌毅<sup>A</sup>, 羽田野直道<sup>B</sup>

### Change of Community Structure on Neural Networks for Deep Learning

*Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo<sup>A</sup>, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo<sup>B</sup>*

Masaki Ochi<sup>A</sup> and Naomichi Hatano<sup>B</sup>

**Keywords :** 複雑ネットワーク, コミュニティ検出, 深層学習, Complex network, Community detection, Deep learning

深層学習は、多層ニューラルネットワークのニューロンの重みを誤差逆伝播法などにより最適化することで学習が進行する。このニューロンの重みを枝の重みと見なすことで多層ニューラルネットワークを重み付きの複雑ネットワークと捉えることができる。

複雑ネットワークの解析においてコミュニティ検出は多く研究されてきた。そのひとつに Communicability を用いたコミュニティ検出法がある [1]。ノード間の繋がりや強さを記述する Communicability は複雑ネットワークをバネで繋がれた粒子系と考えることで Green 関数と見なすことができる。

私はこのコミュニティ検出法を用いて深層学習の多層ニューラルネットワークの各層内、また層間のコミュニティを検出し、さらに学習過程におけるコミュニティ構造の変化を調べた。

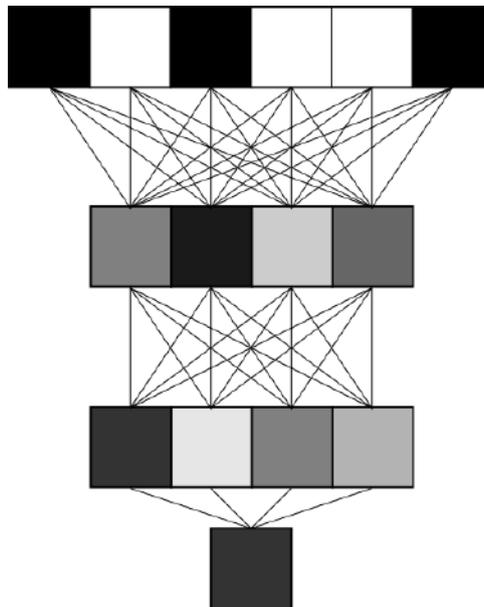


図 1: 多層ニューラルネットワークの概略図

[1] E. Estrada and N. Hatano, Phys. Rev. **99**, 036111(2008).

## 立体的な有機分子を用いた結晶構造の自在な構築

名大院理<sup>A</sup>

後口遼<sup>A</sup>, 珠玖良昭<sup>A</sup>, 阿波賀邦夫<sup>A</sup>

Universal means to construct crystal by 3D-organic molecules

<sup>A</sup> Grad. Sch. Sci., Nagoya Univ.

Ryo Ushiroguchi<sup>A</sup>, Yoshiaki Shuku<sup>A</sup> and Kunio Awaga<sup>A</sup>

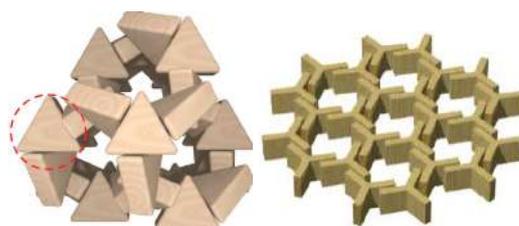
**Keywords:**有機結晶, 特殊なバンド構造, Organic crystal, Exotic band

固体中で発現する物性は、結晶構造と深いかわりがあることが知られている。すなわち、結晶構造から物性を本質的に制御することが可能である。一方で、特定の結晶構造を狙って構築することは至難の業である。

そこで、我々は、立体的な有機分子を用いた結晶構築法を考案した。これまでに物性研究が行われてきた有機分子は、芳香族と呼ばれるカテゴリに属することが多い。TTF や TCNQ に代表される芳香族分子は、その剛直性、平面性から良い結晶性を持ち、広く分子全体に非局在化した $\pi$ 電子が酸化還元能を与えるため、電子物性の研究に非常に適する性質を持つ。一方で、分子間の強い一次元的な相互作用により、結晶構造はほとんど次元カラム状に限定されてしまう問題から、無機系に見られるような多彩な結晶系を思いのままに得ることは難しいと考えられる。しかし、我々は、「分子内に立体構造を取り入れる」ことにより、自在な結晶構造の構築に成功した。

分科会においては実際の研究内容に深く踏み込まず、我々の手法でどのような結晶が得られ、どのような物性が発現するのかを概説する。特に、我々が構築に成功した、ハニカム構造と $K_4$ 構造は、高い対称性を持つことから、バンド構造にディラックコーンが発現することが知られている[1]。加えて、分子内に相互作用が働くことにより、フラットバンドも発現することが

Tight-Binding モデルによるバンド計算により明らかになった[2,3]。さらに、有機ラジカル由来の電子スピンの孤立した場合はスピンプラストレーション系になるような構造でもあり、実際にスピンプラストレーションと考えられる現象を観測することにも我々は成功した[4]。



$K_4$ 構造(左)とハニカム構造(右)

[1] Masahiro Itoh, et. al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 055703

[2] A. Mizuno, K. Awaga, et. al., *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, **137**, 7612–7615

[3] Y. Shuku, K. Awaga, et. al, *Chem. Comm.*, 2018, **54**, 3815 - 3818

[4] A. Mizuno, K. Awaga, et. al, *Phys. Rev. Lett.*, 2017, **119**, 057201

## 異なる時間スケールを持つ複数の短期記憶を同時に維持する際のメカニズム

東京大学総合文化研究科  
市川航平, 金子邦彦

Mechanisms for maintaining short-term memory with different time scales.

*Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo*  
Kohei Ichikawa, Kunihiko Kaneko

**Keywords :** 計算論的神経科学, Working Memory, RNN

人間の記憶には役割やメカニズムが異なる数種類のタイプの記憶があることが知られているが、ワーキングメモリーとも呼ばれる数秒から数十秒の間維持される短期記憶は言語処理などの認知過程において非常に重要な役割を果たしている。

この短期記憶が生成・維持される仕組みとしては多くのモデルが提案されてきたが、複数の記憶を同時に維持する場合の詳細なメカニズム（それぞれのニューロンはどの記憶の維持を担うのか、あるいは全てのニューロンが全ての記憶の維持に平等に貢献しているのか）については注目されてこなかった。発表者はこの問題を RNN(Recurrent Neural Network) を用いたモデルを利用して調べた。

具体的な設定として、「2つの刺激から与えられる入力情報がある期間記憶した後、その2つの情報を統合した値（例えば和など）を出力する」という課題を学習させる。学習後の RNN の1つ1つのニューロンについて、刺激に対する反応性とマスクした時の出力への影響を調べることでどちらの入力情報（あるいは両方）の記憶を担っているのかが分かる。

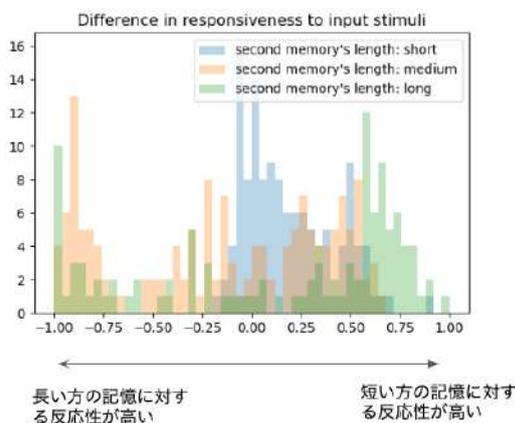


図 1: 各ニューロンの反応性の違いのヒストグラム

様々な条件を変えてこれを調べると、2つの記憶の時間スケール（維持するべき時間）の違いによって、記憶を維持するメカニズムが異なることが分かった。分科会ではモデルの詳細や記憶のメカニズムとネットワーク構造との関係、さらにタスクの設定の違いが短期記憶の形成メカニズムに与える影響などについて報告した上で、分野の垣根を越えて議論したい。

## 時間に依存する2準位系のマスター方程式

早大理工

発表者 今井 友洋, 共同研究者名 中里 弘道

Mater equation for the time-dependent qubit system

Dept.of Phys.WasedaUniv

Name of presenter T.Imai and coworker H.Nakazato

**Keywords** : 量子開放系、マスター方程式、2準位系、時間に陽に依存する系

より現実的な量子系を考えると、孤立系として考えるのではなく開放系として考える必要がある。開放系とは関心のある対象系と環境が相互作用している系のことで、このような系の時間発展を記述するマスター方程式は量子状態を表す密度行列の性質を任意の時間で保つような方程式である必要がある。方程式は対象系のハミルトニアンが時間に依存していないときの導出の仕方はよく知られている。しかし時間に陽に依存するハミルトニアンの場合の導出方法は特定の状況下でしか知られていない [KDH97]。時間依存する系は応用上対象系を制御したいときに使われるので重要である。そのため本研究では時間に依存する2準位系に対するマスター方程式の導出を考える。

また先行研究 [MN14] によって2準位系のシュレディンガー方程式によって関係づけられるハミルトニアンとユニタリー変換

$$H_S(t) = \begin{pmatrix} \Omega(t) & \omega(t) \\ \omega^*(t) & -\Omega(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$U_S(t) = \begin{pmatrix} a(t) & b(t) \\ -b^*(t) & a^*(t) \end{pmatrix}, \quad |a(t)|^2 + |b(t)|^2 = 1 \quad (2)$$

とパラメーター付けすると、次のようなパラメーター  $X(t)$

$$X(t) \equiv \int_0^t dt' \frac{\omega(t')}{a^2(t')} \quad (3)$$

を導入することによってパラメーター  $a(t), b(t), \omega(t)$  は次のように書くことができる。

$$a(t) = \frac{1}{(1 + |X(t)|^2)^{1/2}} e^{-i \int_0^t dt' \Omega(t') - i \int_0^t dt' \frac{\dot{X}(t') X^*(t')}{1 + |X(t')|^2}} \quad (4)$$

$$b(t) = \frac{1}{i} a(t) X(t), \quad \omega = a^2(t) \dot{X}(t) \quad (5)$$

つまり  $\Omega(t), X(t)$  を決めると、厳密に解くことができる2準位系を見つけることができる。

この方法によって見つけることができる可解な2準位系に対してボソンの環境と相互作用した開放系と考える。相互作用が存在しないときのユニタリー変換を用いて定義する相互作用描像を用いることによってマスター方程式の導出を明示的に考えることができる。本発表では  $X(t)$  と  $\Omega(t)$  が時間に対して周期的な場合にはフーリエ級数展開を使い、 $X(t)$  と  $\Omega(t)$  の時間変化が十分遅い場合に対し時間に依存した場合にはテイラー展開を用いることで時間に依存する Lindblad 型

$$\frac{d\rho_s(t)}{dt} = -i [H_S(t) + H_{LS}(t), \rho_s(t)] + \sum_i \gamma_i(t) \left( A_i(t) \rho_s(t) A_i^\dagger(t) - \frac{1}{2} \{ A_i^\dagger(t) A_i(t), \rho_s(t) \} \right) \quad (6)$$

のマスター方程式を導出した。この方程式は任意の時刻で  $\gamma(t) \geq 0$  となるので密度行列の性質を常に満たしている。時間に依存しない場合と異なる点は  $H_S(t), H_{LS}(t), \gamma_i(t), A_i(t)$  が時間に依存しているところにある。 $X(t)$  が周期的な場合はこれまで知られていた対象系のハミルトニアンが周期的な場合に対応している。

[MN14] A. Messina and H. Nakazato, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 47(44), 445302(2014).

[KDH97] S. Kohler, T. Dittrich and P. Hänggi, Floquet-Markovian description of the parametrically driven, dissipative harmonic quantum oscillator, Physical Review E 55(1), 300(1997).

## 内集団ひいきのゲーム理論的解析

名大院情報

村上大周

Game Theoretical Analysis of Ingroup Favoritism  
*Graduate School of Informatics, Nagoya University*  
Taishu Murakami

Keywords : 内集団ひいき, 社会的アイデンティティ理論, 評判維持仮説

ある集団に属している成員から見て、その成員と同じ集団に属している成員を内集団成員、異なる集団に属している成員を外集団成員と呼ぶ。内集団ひいきとは、ある集団の成員が外集団成員よりも内集団成員を優遇する行為のことである。内集団ひいきを引き起こす最も本質的な要因を調査すべく、1971年に H. Tajfel は、内集団ひいき乃至外集団差別を引き起こすであろうあらゆる変数を除外した実験（最小条件集団実験）を行った。この実験は、集合的カテゴリーやそれに基づく成員性意識が内集団ひいきを生じさせる重要な要因であることを示し、この実験を先駆けに発展した社会的アイデンティティ理論（SIT）は、内集団ひいきの説明原理として広く受け入れられた。しかし2000年頃、最小条件集団における内集団ひいきは相互運命統制が存在する場合のみ発生することを示す研究が山岸等によりなされた。よって山岸等は、閉ざされた一般互酬仮説（BRH）を内集団ひいきの説明原理として提唱し、現在では SIT 及び BRH が内集団ひいきを説明する主要理論となった。本研究では、内集団ひいきに纏わる社会心理学的実験及び数理的研究をまとめ、内集団ひいきの数理モデルを再考する。

## 参考文献

- [1] 神 信人, 山岸 俊男, 社会心理学研究, **12**, 190-198 (1997).
- [2] 堀田 結孝, 山岸 俊男, 心理学研究, **81**, 114-122 (2010).
- [3] 清成 透子, 心理学研究, **73**, 1-9 (2002).
- [4] 牧村 洋介, 山岸 俊男, 心理学研究, **73**, 488-493 (2003).
- [5] Nowark, M. A., Sigmund, K., Nature, **393**, 573-577 (1998).
- [6] Tajfel, H. *et al.*, European Journal of School Psychology, **1**, 149-178 (1971).
- [7] Tajfel, H., Turner, J. C., Monterey, CA: Books-Cole (1979).
- [8] Yamagishi, T. *et al.*, Advances in Group Processes, **16**, 161-197 (1999).

## Tomography of scale-free networks

北海道大学 大学院理学院

疋田 理樹

*Graduate School of Science Hokkaido University*  
*Riki Hikita*

複雑ネットワークの分野では、要素 (node) の集合と要素対 (link) の集合の組はネットワークと呼ばれる [1]。また多くの場合では、ネットワークの空間的な位置は考えずに、node 間の関係のみに着目して議論する。ある node に結合している link の数は次数と呼ばれる。多くの現実のネットワークでは、式 (1) の様に次数分布が近似的にべき則に従うことが知られている。

$$P(k) \propto k^{-\lambda} \quad (1)$$

ここで  $k$  は次数であり、 $\lambda$  は正の定数である。式 (1) のように次数分布がべき則に従うネットワークは scale-free network と呼ばれる。

あるネットワークの最大次数の node に直接繋がっている node の集合を layer 1 とし、layer 1 内の node に直接繋がっている node の集合を layer 2 とする。同様に layer  $l-1$  の node に直接繋がっていて、且つそれ以前の layer に属していない node の集合を layer  $l$  として定義する。その上で各 layer 内の node の数と次数分布を調べる (tomography) を考える。

今回は以下のように configuration model に対する tomography [2] を考える。最初に、 $N$  個の node を設定する。次に、ネットワーク全体の次数分布がべき則分布に従うようにランダムに各 node の次数を選択し、その数だけ half-link (2つの half-link が結合して1つの link になる) を与える。ここで、最大次数の node を root として選択する。そして、全ての half-link の中からランダムに一つを選択し、root の half-link と結合する。さらに同様の作業を root の half-link がなくなるまで繰り返し、layer 1 を作成する。同様に、layer  $l$  を layer  $l-1$  から作成し、作成している連結成分内の全ての half-link が使われるまで続ける。次数  $k$  の node が layer  $l$  までに含まれない確率 ( $P(k, l)$  と表す) を考える。いくつかの解析を行うと、次の漸化式が得られる。

$$T_l = N \sum_k k P(k, l), \quad (2)$$

$$P(k, l) = P(k) \exp\left(-\frac{k}{K_l}\right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{K_{l+1}} = \frac{1}{K_l} + \frac{1}{1 + \frac{T_l}{\chi_l}}, \quad (4)$$

$$S_{l+1} = \chi_l \left(1 - \frac{\chi_l}{\chi_l + T_l}\right), \quad (5)$$

$$\chi_{l+1} = T_l - T_{l+1} - S_{l+1}, \quad (6)$$

ここで  $\chi_l$  は layer  $l$  までネットワークを作成し終わったときに layer  $l$  の node が持つ half-link の数であり、 $T_l$  は全ての half-link の数である。そして、 $S_l$  は layer  $l$  と layer  $l+1$  の間の link の数である。これらの漸化式を数値的に解くことで、解析的結果が得られる。さらに我々は configuration model の tomography について数値計算を行い、各 layer の指数分布が全ネットワークの次数分布に対して式 (3) のように指数関数的なカットオフを持つべき則に従うことを確認した。

本公演では configuration model の tomography に関する解析方法を報告した論文 [2] と我々による数値計算の再現の結果を紹介する。

### 参考文献

- [1] S. N. Dorogovtsev and J. F. Mendes, *Evolution of networks: from biological nets to the internet and www* (OUP Oxford, 2013).
- [2] T. Kalisky, R. Cohen, O. Mokryn, D. Dolev, Y. Shavitt, and S. Havlin, Phys. Rev. E **74**, 066108 (2006).

## 拡張 ANNNI 模型の相関関数

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻,<sup>1</sup>筑波大学数理物質系研究科  
伊藤慧美, 溝口知成<sup>1</sup>, 初貝安弘<sup>1</sup>

### Spatial correlation function of an extended ANNNI model

*Dept of Basic Science, The University of Tokyo* <sup>1</sup>*Dept of Physics, University of Tsukuba*

Satomi Ito, Tomonari Mizoguchi and Yasuhiro Hatsugai

**Keywords:** 統計力学, イジング模型, ANNNI 模型

統計力学において、イジング模型は対称性の破れを伴う相転移の本質を捉えるための基本的な模型である。最も単純な場合として、格子上の最近接サイト間のボンドのみ、かつ全てのボンドで一様な相互作用を考えることが多い。しかし、より長距離の相互作用を取り込むことより多彩な相が実現することが知られている。本研究では、最近接に加えて有限レンジの相互作用を取り入れた 1 次元イジング模型を解析する。次近接相互作用までを取り入れた模型は、axial next-nearest neighbor Ising (ANNNI) 模型と呼ばれている。次近接の相互作用が反強磁性的な場合、相互作用間の競合(フラストレーション)のため、シンプルながらも興味深い模型である。相互作用のレンジが有限の 1 次元イジング模型は、転送行列を用いて有限温度の物理量を厳密に計算することができる。この特徴を生かし、ANNNI 模型を次々近接相互作用や磁場を入れた模型に拡張し、相互作用レンジの変化によるフラストレーション効果を転送行列により調べた。

先行研究により、1 次元 ANNNI 模型ではスピン相関関数がある波数を持って振動するパラメータ領域と振動せずに減衰する領域を分ける境界 *disorder line* の存在が示されている[1]。模型の拡張として具体的には、ANNNI 模型に対して 2 つの拡張を行った。一つ目は次々近接相互作用を加えた ANNNI 模型で、この模型について転送行列と相関関数を導出し、数値計算を行った。2 つ目の拡張として、ANNNI 模型と次々近接相互作用まで取り入れた ANNNI 模型に均一磁場を加えた。その結果、次々近接相互作用まで取り入れた ANNNI 模型において、磁場を大きくしても磁化が変化しない磁化プラトーと呼ばれる現象が複数の磁場領域で観測された。これはフラストレーションの著しい効果であり、次々近接までの拡張模型で初めて見られた現象である。

[1] T. M. Hornreich *et al.*, *Z. Physik. B* 35:, 91-97 (1979)

## 結合した部分平均場系からなる量子 Ising 模型の相転移

東工大理<sup>A</sup>, 東工大科学技術創成研究院<sup>B</sup>高田珠武己<sup>A</sup>, 山城悠<sup>A</sup>, 西森秀稔<sup>B</sup>Phase transitions of the quantum Ising model formed by  
coupled mean-field subsystems*Dept. of Phys., Tokyo Tech<sup>A</sup>,**Institute of Innovative Research, Tokyo Tech<sup>B</sup>*Kabuki Takada<sup>A</sup>, Yu Yamashiro<sup>A</sup>, and Hidetoshi Nishimori<sup>B</sup>**Keywords :** 相転移, Ising 模型, 平均場模型, 量子アニーリング, phase transition, Ising model, mean-field model, quantum annealing

量子 Ising 模型の相転移を解析することは、量子アニーリングの性能を調べる観点から重要である。量子アニーリング [1] は組合せ最適化問題を解くための計算手法の 1 つであり、組合せ最適化問題とは与えられた目的関数を最小化する離散的な引数を求める問題である。量子アニーリングでは、組合せ最適化問題を Ising 模型の基底状態探索問題に帰着させ、Ising 模型に横磁場などの量子ゆらぎを加えて時間変化させることで、スピン系の終状態が Ising 模型の基底状態となることを目指す。量子ゆらぎを変化させている途中に 1 次相転移が起こる場合、量子アニーリングの計算時間が系のサイズに関して指数発散するため、1 次相転移の存在は量子アニーリングにとって最も重大な問題の 1 つである。したがって、一様な横磁場以外にどのような量子ゆらぎを用いることで 1 次相転移が回避されるのかを調べることが重要となる。しかし、このような観点での先行研究は、多体無限レンジ相互作用を含む系が多かった [2-5]。

本講演ではまず、2 つの部分平均場系が相互作用した無限レンジ Ising 模型を扱う。各部分系内および部分系間に無限レンジ強磁性相互作用が存在している。また、第 1 の部分系には上向きの縦磁場が、第 2 の部分系には下向きの弱い縦磁場がかかっている。この模型は一様な横磁場のみをかけると 1 次相転移するが、部分系間に横方向の反強磁性相互作用を加えることで相転移がなくなることが数値対角化により示された [6]。本講演ではこの模型が熱力学極限で 2 つの相互作用する古典スピンとみなせることを用いて解析的に磁化を計算し、横方向の反強磁性相互作用が 1 次相転移をなくすことを示す。また、2 つの部分系で大きさの異なる横磁場をかけることによっても相転移が回避されることを示す。

さらに、無限レンジ的でない模型として、部分系間の相互作用を疎に変えた模型を考える。この模型の熱力学極限における振る舞いは鞍点法で解析することができる。この模型に対しても、一様な横磁場のみをかけた場合 1 次相転移が起こるが、横方向の反強磁性相互作用を加えるか横磁場を非一様にするすることで相転移がなくなること示す。

[1] T. Kadowaki and H. Nishimori, Phys. Rev. E **58**, 5355 (1998).[2] Y. Seki and H. Nishimori, Phys. Rev. E **85**, 051112 (2012).[3] B. Seoane and H. Nishimori, J. Phys. A: Math. Theor. **45**, 435301 (2012).[4] Y. Seki and H. Nishimori, J. Phys. A: Math. Theor. **48**, 335301 (2015).[5] Y. Susa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 023002(2018).[6] T. Albash, Phys. Rev. A **99**, 042334 (2019).

## ネマティック液晶中における欠陥ダイナミクスの 3次元計測

東大・理<sup>A</sup>, JST さきがけ<sup>B</sup>

図司陽平<sup>A</sup>, 竹内一将<sup>AB</sup>

### 3D observation of defect dynamics in nematic liquid crystals

<sup>A</sup>Dept. of Phys., Univ. of Tokyo, <sup>B</sup>JST PRESTO

Yohei Zushi<sup>A</sup> and Kazumasa A. Takeuchi<sup>AB</sup>

**Keywords:** 液晶, トポロジカル欠陥, Liquid crystals, topological defect

ネマティック液晶では、棒状分子が一定の向きを向く配向秩序をもっているが、トポロジカル欠陥、あるいは位相欠陥と呼ばれる配向の向きが定義できないような特異点を含むことがある(図1)。欠陥同士にはそのチャージに応じて引力的あるいは斥力的な相互作用が働き、線状欠陥の場合、つなぎ変えや縮小、消滅が起こる。このような欠陥ダイナミクスの実験的観察は、欠陥が関わる様々な物理現象の理解に資するだろう。また、液晶乱流は非平衡統計物理学の重要な普遍クラスを示すことが知られており、そうしたマクロな現象を形成するマイクロ過程を明らかにすることは統計物理学としての意義も大きい。ネマティック液晶中の欠陥には、蛍光色素分子が吸着するので、共焦点蛍光顕微鏡を用いてその3次元構造を計測できることが知られている[1]が、共焦点顕微鏡は時間分解能があまり高くないこともあり、トポロジカル欠陥の3次元ダイナミクスを直接観測することはこれまでなされなかった。我々は今回、欠陥ダイナミクスの時間スケールが長くなる厚いセルを用い、さらに高速の共焦点顕微鏡撮影を行うことにより、欠陥同士の再結合の3次元的な時間発展を計測することに成功した(図2)。観察対象には電気対流セルを用い、高電圧を印加して位相欠陥乱流状態にし、欠陥を高密度で発生させた後、電圧を0にしてその緩和過程を観測した。本発表では、その成果と解析によって得られた欠陥ダイナミクスの特徴について紹介予定である。

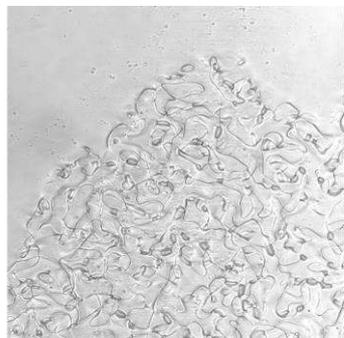
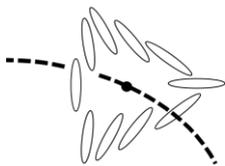


図1 液晶中の位相欠陥

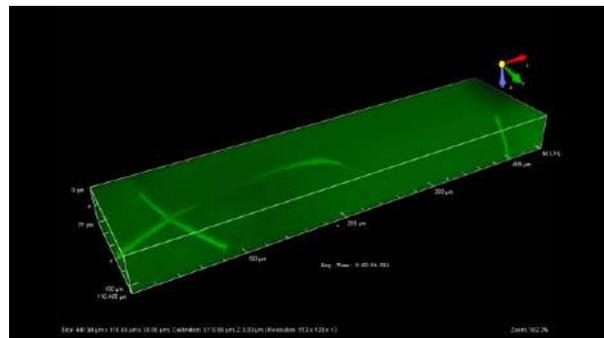


図2 蛍光イメージングで可視化した3次元欠陥

[1] T. Ohzono, K. Katoh, and J. Fukuda Sci. Rep. 6, 36477 (2016)

## A Multiscale Correlation and its Criticality

University of Tokyo  
Atsushi Ueda  
*Department of Physics*

**Keywords : Critical phenomena, Cortical computation**

たくさんの物があつまると、例え個々としては単純だったものも不思議な振る舞いをするのがよくあります。たとえば重力相互作用をもつ2体問題は学部の教科書にのっているほど簡単に解けますが、3体問題になったとたんそう単純ではなく求積法では求まらないことが知られています。物性の分野で専ら興味の集まる電子多体系においても、それらを厳密に解くことはできずそれゆえに平均場理論や摂動論的な手法が歴史的に発展してきました。

では、そのような熱力学的極限の問題は完全にお手上げかということそんなことはありません。実は視点をミクロからマクロへと変えていくと、系のつかさどっていた多くの対称性などが重要でなくなり、いくつかのパラメーターのみが効いてくることが知られています。これは繰りこみ群とよばれる考え方で、さまざまスケールでゆらぎが起こりフラクタルな構造をもつ臨界現象への強力なツールとして広く認識されています。言い方を変えれば、臨界現象は系の詳細によらず同じような特性をもつユニバーサルなクラスに分類できるということです。たとえば、磁性体における Ising 模型と気液相転移はおなじ臨界指数によって特徴づけられることが実験結果から信じられています。このようなスケール不変な場合はさまざまな物理量が冪的なふるまいをし、それらはスケーリング関係式という普遍的な関係をみとめます。

本講演ではまったく意外なところ、『脳』でみられるその冪則についてのレビューをします。ニューロンの発火のデータにおける冪則は神経学者の間では古くから知られておりその理由は現在もまだ定かではありません。生物物理学者の界限では15年ほど前にこれは脳が臨界的であることを示唆しているのではないかといわれ、John Beggsによって「Neuronal avalanches」と名づけられました [1]。非平衡統計力学における砂山模型とのアナロジーによる説明は一時的な成功を収めたものの、実験技術の限界によるデータの少なさからモデリングが先走っている感が否めませんでした。一方近年になってより細かな実験が得られるようになり実際に脳においても有限サイズスケーリングが成り立っていることがわかってきました [2]。いまだに議論の余地のある未解決問題ではありますが、最新の結果 [3,4] とともに臨界性が何を示唆しているのかをみなさんと一緒に考えていきましょう。

[1] JM Beggs *et al.*, Journal of neuroscience 23 (35), 11167-11177(2003) [2] N Friedman *et al.* Physical review letters 108 (20), 208102 (2012) [3] C Stringer *et al.* Nature, 1 (2019) [4] J. B. Dai *et al.* Neuroscience 379 (2018)

## gapless SPT 相の構成と分類

京都大学基礎物理学研究所

大山修平

Construction and classification of gapless SPT phase

*Yukawa Institute for Theoretical Physics*

Shuhei Oyama

**Keywords:** トポロジカル相, SPT 相, topological phase, SPT phase

物質には様々な相の存在が知られている。物質にどのような相が存在のするかを分類することは物性物理学における重要な問題の一つである。

例えば二次元の Ising 模型の場合、臨界温度を下回るとスピンの特定の方向にそろった状態に転移することが知られている。このような自発的対称性の破れを伴う秩序相に対しては局所的な秩序変数の値を調べることで相が自明か否かを検知できる。

一方で秩序相の中には対称性の破れを伴わず、したがって局所的な秩序変数を持たないような相が存在する。これらの相の多くは、物質の何らかの大域的構造 (特にトポロジー) がその成立に重要な役割を果たすため、トポロジカル相と呼ばれている。

トポロジカル相の中でも特に活発に研究されているのが SPT 相<sup>1</sup> と呼ばれるクラスである。ここで SPT 相とはトポロジカル相であって以下の性質を満たすもののことをいう:

- 1) 系が何らかの対称性  $G$  を持ち、 $G$  は自発的に破れていない。
- 2) 基底状態と第一励起状態の間に有限のエネルギーギャップがある。
- 3) 基底状態に縮退がない。

SPT 相は場の量子論におけるアノマリーとの関連が知られており、素粒子・物性双方において研究が進められ、現在ではコボルディズムにより完全に分類されることが知られている [1,2]。

一方で最近はこのような SPT 相の公理を少し弱めたクラスの研究も進められている [3-7]。本講演ではそれらの試みのうち、2) の条件を外した gapless SPT 相と呼ばれるクラスについて具体例の構成と分類のレビューを行う。内容は主に [3,4] に従う予定である。

[1] A. Kapustin, Symmetry Protected Topological Phases, Anomalies, and Cobordisms: Beyond Group Cohomology

[2] K. Yonekura, On the cobordism classification of symmetry protected topological phases

[3] R. Verresen, *et al.*, Topology and Edge Mode in Quantum Critical Chains

[4] R. Verresen, *et al.*, Gapless topological phases and symmetry-enriched quantum criticality

[5] T. Scaffidi, *et al.*, Gapless Symmetry-Protected Topological Order

[6] Y.-H. Lin, S.-H. Shao, Anomalies and Bounds on Charged Operator

[7] A. Meraros, Y. Ran, A classification of symmetry enriched topological phases with exactly solvable models

<sup>1</sup>Symmetry Protected Topological Phase の略。

## 蔵本モデルと時間遅れ

早大理工

多賀圭理, 山崎義弘

Kuramoto model and time delay

Waseda Univ.

Keisuke TAGA, Yoshihiro YAMAZAKI

**Keywords:** 結合振動子系, 時間遅れ, Coupled oscillator, Time delay

集団において、個体が相互作用を通じて同じような挙動を示す現象を同期現象と呼ぶ。蔵本モデルは同期現象の解析を動機に提案された数理モデルであり、次のように定義される [1]。

$$\frac{d}{dt}\theta_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

ここで、 $\theta_i$  と  $\omega_i$  はそれぞれ  $i$  番目の振動子の位相と自然周波数、 $K$  は結合強度を表す。

蔵本モデルは蛍の集団発光、神経細胞の発火、コンサート会場の拍手、磁性体、液晶滴など、いろいろな系が示す同期現象を記述するモデルとして、現在も広く興味を惹いている。特に蔵本モデルは振動子無限個の極限で結合強度を変化させると相転移的挙動を示すことが知られており、その点で統計物理の視点からも興味を持たれている。

ここで標準的な蔵本モデルは瞬間的に他の振動子の情報を受け取る定式化がなされているが、現実の系では音速や光速などの制限により、情報伝達速度は有限となり、時間遅れが生じている。実際、時間遅れの効果を付与した蔵本モデルを用いることで、粘菌などの定性的な挙動が再現されるという報告もある [2]。

本発表では、まず時間遅れ微分方程式が簡単な定式化であっても、豊かな挙動が現れることを紹介する。次に発表者が主に研究している時間遅れ蔵本モデルがみせる挙動を紹介する。昨年の夏の学校においては主に数学的な結果を発表したが、今回は数値シミュレーションで確認されたダイナミカルな挙動を紹介したい。

[1] Y. Kuramoto, "Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence", Springer, (1984)

[2] A. Takamatsu, T. Fujii et al., Phys. Rev. Lett., 87, 078102 (2000)

## 局所熱的純粋状態に基づく流体力学とゆらぎの定理

早大先進理工<sup>A</sup>, 慶應大自然セ<sup>B</sup>, 理研 iTHEMS<sup>C</sup>, 東大工<sup>D</sup>, 理研仁科セ<sup>E</sup>  
佐藤慎太郎<sup>A</sup>, 本郷優<sup>B,C</sup>, 沙川貴大<sup>D</sup>, 筒井翔一郎<sup>E</sup>

Hydrodynamics from local thermal pure quantum state  
*Advanced Science and Engineering, Waseda Univ.<sup>A</sup>, RECNS  
Keio U.<sup>B</sup>, RIKEN iTHEMS<sup>C</sup>, Department of Applied Physics,  
The University of Tokyo<sup>D</sup>, RIKEN Nishina Center<sup>E</sup>*  
Shintaro sato<sup>A</sup>, Masaru Hongo<sup>B,C</sup>, Takahiro Sagawa<sup>D</sup>, Shoichiro  
Tsutsui<sup>E</sup>

**Keywords** : 統計力学基礎論, 非平衡統計力学, 流体力学, スピン系

熱平衡状態は通常混合状態で記述されるが、ある種の純粋状態は、熱力学量の期待値がアンサンブル平均と熱力学極限で一致することが知られている [1]。我々はこのアイデアを非平衡状態へと拡張し、局所熱平衡状態を記述する量子純粋状態を構成した。本講演では、この純粋状態を用いて、流体方程式、及び量子ゆらぎの定理を導出する方法を報告する。また、1次元 Heisenberg 模型について、流体力学的緩和が実際に起きることを数値的に検証した結果を紹介する。

[1] S. Sugiura, A. Shimizu, Phys. Rev. Lett **111**, 010401 (2013).

## 非対称単純排他過程の実験系の構築

慶大理工<sup>A</sup>, 東大理<sup>B</sup>

小島観正<sup>A</sup>, 竹内一将<sup>B</sup>, 齊藤圭司<sup>A</sup>

Experiment of asymmetric simple exclusion process  
*Dept. of Phys., Keio Univ.<sup>A</sup>, Dept. of Phys., Univ. of Tokyo<sup>B</sup>*  
 Kansei Kojima<sup>A</sup>, Kazumasa Takeuchi<sup>B</sup>, Keiji Saito<sup>A</sup>

**Keywords :** 非対称単純排他過程, ASEP

非対称単純排他過程 (Asymmetric Simple Exclusion Process, 以下 ASEP と呼ぶ) とは, 粒子間に排除体積の相互作用が働くという制約のもとで, 一次元格子系を多粒子が非対称なランダムウォークをするという非平衡系の確率モデルである (Fig 1). その名の通り非常に単純なモデルではあるが, 渋滞現象を示す交通流モデルや生体内のタンパク質合成モデルなど様々な分野で応用されており, 適切な変換を行えばランダム界面成長のモデルや量子スピン鎖にマッピングすることもできる. さらに ASEP の特筆すべき点は, 行列積表示やベータ仮設を用いた厳密な取扱いが可能であるという点である. この理論的な扱いやすさから, 現在まで膨大な理論研究が存在し, 非平衡相転移, 衝撃波, 自発的対称性の破れや凝縮など, 多様な現象を示すことが知られている [1].

その一方で, 実験によって ASEP の特異な統計性が確かめられた例は, 一つも存在しないという現状がある. この状況を打破すべく, 本研究では ASEP を模す実験系を構築し, すでに知られた性質を実験で見ることの一つの目標とする.

具体的なセットアップは次の通りである. 直径 3mm 球のビーズを ASEP における粒子として使用し, 粒子の出入りのための穴が 2 つある中空の直方体をサイトとみなす. 排除体積効果を満足するようにサイトの体積を小さくし, 非対称的なホッピングを実現するために 2 つの出入り口の形状を非対称にした (Fig 2). 系全体を一定の振動数・振幅で上下に振動させることで, 粒子が隣のサイトにホップしていくという算段である.

このような系が実際に ASEP であるかについては, 慎重に検証する必要がある. 本発表では ASEP について簡単にレビューしたのち, 本研究の途中経過をお話したい.

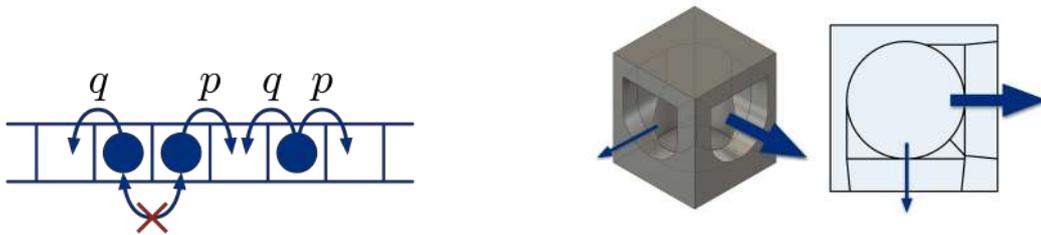


Fig 1: ASEP の模式図

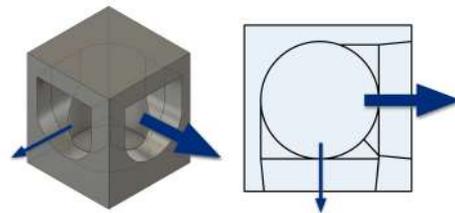


Fig 2: 各サイトの形状. 右図はサイトを上から見た図. 出入り口の形状が非対称になっている.

[1] R. Blythe and M. R. Evans, J. Phys. A **40**, R333 (2007).

## Simulated annealing と交換モンテカルロ法による

### Hopfield 模型の基底状態の探索分布

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

中西 亮, 福島 孝治

Ground-state distribution of Hopfield model

by Simulated Annealing and Exchange Monte Carlo methods

*Dept. Basic Science, The Univ. of Tokyo*

Ryo Nakanishi and Koji Hukushima

**Keywords:** ホップフィールド模型, 交換モンテカルロ法,  
シミュレーテッドアニーリング, 連想記憶

Hopfield 模型は、ニューロンとシナプスの情報伝達の機構についての理想化された数理モデルとして導入された。この模型は相互作用を適切に設計することで、複数の基底状態をもつように設計することができる。これは、脳が複数の状態を記憶していることに対応する。

一般に複数の基底状態をもつ系の基底状態を探索することは難しい。例えば、Simulated Annealing (SA) [1] は温度を徐々に下げることで準安定状態を避けながら基底状態を見つける方法であり、徐冷速度が十分遅いときには基底状態に確率 1 で到達することが示されている。しかしながら、基底状態が複数ある場合には、そのうちの一つに到達するだけであり、複数状態を網羅することはできない。そこで、複数の基底状態を持つ Hopfield 模型について、複数回の SA や昇温過程も含む並列計算を行う交換モンテカルロ法 [2] により見つけられた基底状態の探索分布を調べる。

[1] Kirkpatrick, S., et. al. "Optimization by Simulated Annealing", Science, 220, 4598, (1983)

[2] K. Hukushima and K. Nemoto "Exchange Monte Carlo Method and Application to Spin Glass Simulations", J. Phys. Soc. Jpn., 65, 1604/1611, (1996).

## 光励起された系における超伝導ゆらぎの性質

埼玉大理工<sup>A</sup>, 理研 CEMS<sup>B</sup>

岩崎 龍太<sup>A</sup>, 辻 直人<sup>B</sup>, 星野 晋太郎<sup>A</sup>

Nature of superconducting fluctuation in photo-excited systems

Dept. of Phys., Saitama Univ.<sup>A</sup>, RIKEN CEMS<sup>B</sup>

Ryuta Iwazaki<sup>A</sup>, Naoto Tsuji<sup>B</sup> and Shintaro Hoshino<sup>A</sup>

Keywords : 超伝導, 非平衡現象, superconductivity, non-equilibrium phenomena

近年のレーザー分光技術の大幅な発達に伴い, pump-probe 分光法を用いて 2次元系物質である  $\text{La}_{1.675}\text{Eu}_{0.2}\text{Sr}_{0.125}\text{CuO}_4$ [1] や  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.45}$ [2] において光誘起超伝導の測定が行われてきた. 後者における実験では, 室温以上で光誘起超伝導が起こり得るという報告もある. さらに, 3次元系物質である  $\text{K}_3\text{C}_{60}$  (超伝導転移温度  $T_c = 19.8\text{K}$ ) において, 100K 程度の温度領域で光誘起超伝導が起こり得るということが示唆され, 近年多大なる注目を集めている [3]. 一方, これまでの理論研究では, 光によるフォノンへの影響を通じた電子間有効相互作用の変化や, 電子系に直接影響を与える効果などが議論されている.

本研究では, 励起光による電子系への影響として,  $T > T_c$  の常伝導相において, 光励起により超伝導ゆらぎがどのように変化するかを調べることを目的とし, 時間依存する Ginzburg-Landau 理論を用いて, pump-probe 分光法を図 1 のような簡単なモデル化をして理論的解析を行った. その結果, 励起光による超伝導ゆらぎと電流の時間発展を調べたところ, どちらも長時間極限では指数関数的に減衰するが, 短時間では冪/対数関数的に振る舞うことを明らかにした [4]. さらに, その時間依存性は弱励起の場合と強励起の場合で異なり, 図 2 のような相図にまとめられることがわかった. 冪/対数関数的な振る舞いは臨界現象に特徴的な振る舞いであるが, 系の温度領域は  $T > T_c$  であることから, 転移点から離れた温度領域において励起強度の大小により異なった 2つの臨界現象が得られた.

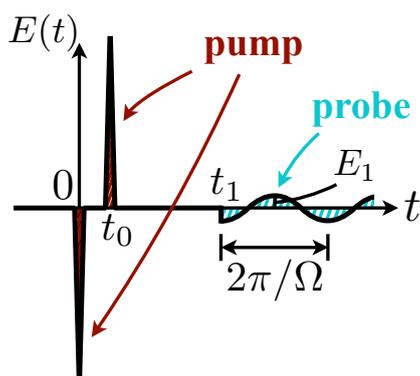


図 1: モデル化した電場の概形.

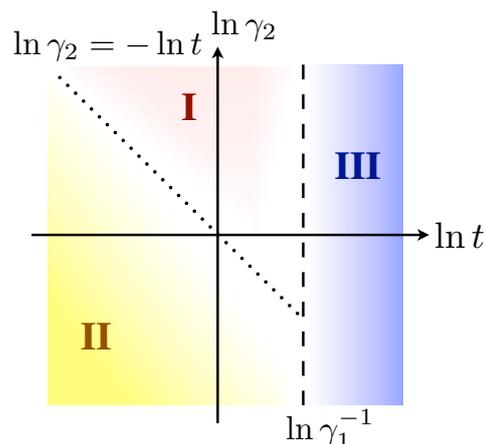


図 2: 励起強度由来の緩和時間  $\gamma_2$  と励起光を打ち込んでからの時刻  $t$  の相図.

[1] D. Fausti, *et al.*, Science **331**(6014), 189-191 (2011).

[2] S. Kaiser, *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 184516 (2014).

[3] M. Mitrano, *et al.*, Nature **530**, 461 (2016).

[4] R. Iwazaki, N. Tsuji and S. Hoshino, arXiv:1904.05820 (2019).

## 反強磁性超伝導体 UPt<sub>3</sub> のネール温度近傍での熱膨張の理論

近畿大学工業高等専門学校

小原雅楽, 今野理喜男, 伊藤豊治, 神田毅, 仲森昌也, 畑山伸訓

Theory of Thermal Expansion of the Antiferroagnetic Superconductors  
Near the Neel Temperatures

*Kindai University Technical College*

Uta Kohara, Rikio Konno, Toyoharu Itou, Takeshi Kanda,  
Masaya Nakamori, Nobukuni Hatayama

**Keywords:**超伝導, 反強磁性超伝導体, ネール温度, 熱膨張, Superconductivity,  
Antiferromagnetic Superconductors

我々は反強磁性と超伝導とが共存する超伝導体 UPt<sub>3</sub> のネール温度近傍と超伝導転移温度近傍での熱膨張を理論的に調査した。UPt<sub>3</sub> においては、ネール温度は $T_N = 5K$ 、超伝導転移温度は $T_{SC} = 0.5K$ であることが分かっている[1-2]。今野、上田が計算した自由エネルギー[2]から、高橋の方法[3]を用いて、熱膨張を計算した。我々は、熱膨張係数がネール温度と超伝導転移温度近傍で温度に線形性を持つことを見出した。比熱と熱膨張係数の温度依存性が同じであることから、熱力学的なグリューナイズンの関係式が満たされる。

[1] M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. 63, 239 (1991).

[2] R. Konno et al., Phys. Rev. B 40, 4329 (1989).

[3] Y. Takahashi, Spin Fluctuation Theory of Itinerant Electron Magnetism, Springer, and references therein (2013).

## 超伝導体を接合した量子ドット系における量子輸送現象

大阪市大理  
橋本将史

### Quantum Transport through a Quantum Dot Coupled to Superconductors

*Osaka City University*  
Masashi Hashimoto

**Keywords:** 量子ドット、量子輸送現象、近藤効果、超伝導体、近接効果

近年、半導体の微細構造技術の発達に伴い、3次元全方向からのポテンシャルによって、電子を数十 nm の空間に閉じ込めた系が実現されている。このような系は量子ドットと呼ばれ、磁性不純物を含む固体中でおこる近藤効果が、量子ドット系でも現れて注目を集めている [1]。量子ドット系を用いると、固体の実験では実現困難な系を人工的に作成でき、非平衡状態での近藤効果や多軌道近藤効果[2]といった新奇な近藤効果が実験されてきている。

最近注目を集めている系として、量子ドットに超伝導体を接合した系が挙げられる。超伝導体中のクーパー対が量子ドットにトンネルする近接効果や近藤効果により、電流等の量子輸送現象に興味深い現象が起きるため、興味を持たれている。

我々は、このような超伝導体を接合した量子ドット系を対象に、Keldysh Green 関数を用いた場の量子論的手法や、低エネルギー量子状態を精密に計算できる数値くりこみ群[3]と呼ばれる数値計算の手法を適用して、理論的に電流やコンダクタンスを調べている。

今回の発表では、超伝導体/量子ドット/超伝導体接合系[4]、常伝導体/量子ドット/超伝導体接合系[5]といった単純な量子ドット系を対象に、入門的なレビューをする予定である。

[1] W. G. van der Wiel, *et al.*, Science, **289**, 2105 (2000).

[2] A. Makarovski, J. Liu, and G. Finkelstein, Phys. Rev. Lett. **99**, 066801 (2007).

[3] H. R. Krishna-murthy, J. W. Wilkins, and K. G. Wilson, Phys. Rev. B **21**, 1003 (1980).

[4] T. Yoshioka, Y. Ohashi, J. Phys. Soc. Jpn, **69**, 1812-1823 (2000).

[5] Y. Tanaka, N. Kawakami, A. Oguri, J. Phys. Soc. Jpn, **76**, 074701 (2007).

## 層状有機超伝導体 $\beta''$ -BEDT-TTF 塩における異方的超伝導

筑波大院数理物質<sup>A</sup>, 物材機構<sup>B</sup>, Nottingham Trent Univ.<sup>C</sup>, 阪大理<sup>D</sup>

森定恭平<sup>A,B</sup>, 杉浦栞理<sup>B</sup>, 寺嶋太一<sup>B</sup>, Lee Martin<sup>C</sup>,

坏広樹<sup>D</sup>, 中澤康浩<sup>D</sup>, 宇治進也<sup>A,B</sup>

Anisotropic superconductivity in layered organic conductor,  $\beta''$ -BEDT-TTF salt

<sup>A</sup> Univ. of Tsukuba, <sup>B</sup> NIMS, <sup>C</sup> Nottingham Trent University, <sup>D</sup> Osaka University

K. Morisada<sup>A,B</sup>, S. Sugiura<sup>B</sup>, T. Terashima<sup>B</sup>, Lee Martin<sup>C</sup>,

H. Akutsu<sup>D</sup>, Y. Nakazawa<sup>D</sup> and S. Uji<sup>A,B</sup>

**Keywords:** 有機超伝導体, Organic superconductor

超伝導は磁場中では、ゼーマン効果と軌道効果により不安定となる。有機超伝導体では、 $g$  値がほぼ等方的であるためゼーマン効果は磁場方位に依らず等方的に働く。一方、ポルテックスが形成されることが要因で超伝導が不安定化する軌道効果は極めて異方的に働く。超伝導層に平行な磁場中では(磁束が超伝導層に侵入しないので)、軌道効果は強く抑制されるため、平行磁場中では臨界磁場は垂直磁場中よりもずっと大きくなる。この時、平行方位の臨界磁場はゼーマン効果で決まり、パウリ常磁性極限と呼ばれる。しかし近年になり、二次元性が強い有機超伝導体などでパウリ極限を超えても安定化する FFLO 超伝導状態の存在を示唆する実験結果が報告されている。一方、完全二次元系では(超伝導層間の結合が0となる極限では)、コストリッツ-サウレス転移しか起こりえず、バルクなコヒーレントな超伝導状態は存在せず、臨界磁場は極めて小さくなっているはずである。このように、二次元性が強い極限では、FFLO 超伝導状態が逆に抑制されるはずで、量子揺らぎが大きな特徴的な超伝導が出現するはずであるが、そこは未知の研究領域である。最近新たに合成された  $\beta''$ -(ET)<sub>2</sub>[(H<sub>2</sub>O)(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Cr(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]·18-crown-6 ( $\beta''$ -塩)は極めて大きなアニオン層(絶縁層)を持つために、二次元性が非常に強い超伝導体と期待されている[1]。我々はこの  $\beta''$ -塩に注目し、低温、高磁場下での超伝導特性を調べている。図1は、層間の電気抵抗測定から決定した、垂直、平行方向の臨界磁場  $H_{\perp c2}$ ,  $H_{//c2}$  をプロットしたものである。磁場中で抵抗の温度変化を測定し、常伝導での抵抗を  $R_n$  としたとき、 $R/R_n = 0.5$  となる温度を臨界温度  $T_c$  として臨界磁場を決めている。この物質の臨界磁場は、典型的な有機超伝導体と比べて極めて異方的であることが分かった。また 1.5K での臨界磁場の角度依存性が、Tinkham の 2D モデルで説明できることが分かった。この発表では、これらの結果について他分野の方にも分かりやすく紹介する予定である。

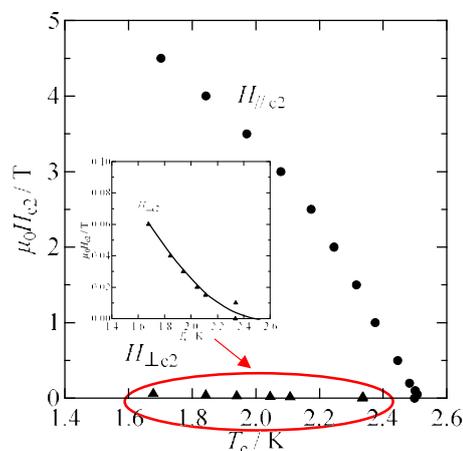


図1 垂直,平行方向の臨界磁場の温度依存性

[1] L. Martin *et al.*, *Inorg. Chem.* {56}, 14045 (2017).

## Pb 単原子層超伝導相におけるステップの影響

東京大学物性研究所<sup>A</sup>, 物質・材料研究機構<sup>B</sup>

佐藤優大, 大黒文和, 浅川寛太, 内橋隆, 長谷川幸雄

Role of steps on Pb atomic-layer superconductivity

<sup>A</sup>The Univ. of Tokyo, ISSP, <sup>B</sup>NIMS

Y. Sato<sup>A</sup>, F. Oguro<sup>A</sup>, K. Asakawa<sup>A</sup>, T. Uchihashi<sup>B</sup> and Y. Hasegawa<sup>A</sup>

**Keywords:** 単原子層超伝導, 渦糸, 走査トンネル顕微鏡

薄膜超伝導体はその厚さがナノスケールまで小さくなると、コヒーレンス長や磁場侵入長といった超伝導現象を特徴づけるパラメータと同程度になり、バルク超伝導体とは異なる特性を示すようになる。近年、薄膜化の一つの到達点として、Si(111)表面上の Pb や In の金属単原子層の超伝導性が報告されてきた[1]。我々は Si(111)表面上の Pb 単原子層超伝導体のステップ構造が超伝導特性に与える影響を評価するために、走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いる。STM は原子レベルの空間分解能によるナノスケールでの局所評価と、トンネル分光 (STS) による超伝導を特徴づける超伝導ギャップの取得が可能である。

我々は電子線蒸着により Si(111)表面上に 1.5 原子層 Pb を蒸着し、加熱条件を調整することで  $\sqrt{3} \times \sqrt{43}$  Pb 単原子層をもつ試料を作製した。我々はこの構造が超伝導性を示すことを明らかにした。また、面直磁場下での渦糸の入り方がステップに挟まれたテラス幅に依存し、テラス幅がコヒーレンス長より狭くなるとテラス上での面直臨界磁場が高くなることも明らかにしている。

本講演では、テラス幅が一様に狭いステップ構造を持つ Si(111)微傾斜面上での  $\sqrt{3} \times \sqrt{43}$  Pb 単原子層の超伝導特性についても紹介し、そのマクロ領域での面直臨界磁場の増大の可能性について言及する。

[1] T. Zhang *et al.*, Nature Phys., **6**, 104 (2010).

## 金属反強磁性体 $\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$ における電流誘起磁化現象

島根大院自然<sup>A</sup>, 島根大研究支援セ<sup>B</sup>, 兵庫県大院物質<sup>C</sup>  
篠崎真碩<sup>A</sup>, 本山岳<sup>A</sup>, 武藤哲也<sup>A</sup>, 西郡至誠<sup>B</sup>, 山口明<sup>C</sup>

Current induced magnetization on metallic antiferromagnet  $\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$

<sup>A</sup>Dept. Natural Science, Shimane Univ., <sup>B</sup>ICSR, Shimane Univ.,

<sup>C</sup>Dept. Material Science, Univ. of Hyogo

M. Shinozaki<sup>A</sup>, G. Motoyama<sup>A</sup>, T. Mutou<sup>A</sup>, S. Nishigori<sup>B</sup>, A. Yamaguchi<sup>C</sup>

**Keywords:** 電気磁気効果, 磁気トロイダル秩序, Ce 化合物

これまで様々な系で扱われてきた電子状態における多重極展開は, 近年, 拡張多極子という新たな概念の下で盛んに研究が進められている. 従来の四極子, 八極子 … 等の秩序とは異なる奇パリティの多極子秩序を起源として, 今迄予想されていなかった新奇な電気磁気効果など, 多彩な物性が見いだされることが期待されている<sup>[1,2]</sup>.

$\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$  は  $P6_3/mcm$  の六方晶系に属し,  $c$  軸方向に沿ったジグザグ鎖構造を成す Ce サイトを持つ. 単結晶試料を用いた磁化率の温度依存性の結果から, Ce の磁気モーメントが  $c$  軸に揃った反強磁性秩序を起こすと示唆されている<sup>[3]</sup>. 拡張多極子の分類に従えば,  $\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$  の反強磁性秩序は拡張多極子の一種である磁気トロイダル双極子の強制的秩序に相当する. これまでに我々は電流印加状態にある  $\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$  の磁化測定を行い, 電流に誘起される磁化成分の観測に成功してきた (Fig. 1). この誘起磁化成分は磁場依存せず電流密度にのみ依存し, かつ反強磁性相においてのみ発現することから, 本系において予想される強トロイダル秩序に由来する現象であると示唆される. 本講演ではこれらの特性についてより詳細な議論を行うほか, 現在測定を進めている電流誘起磁化の異方性についても報告する予定である. また, 実験結果の検証のため非磁性の派生物質である  $\text{La}_3\text{TiBi}_5$  を用いた測定を行っており, 併せて報告する.

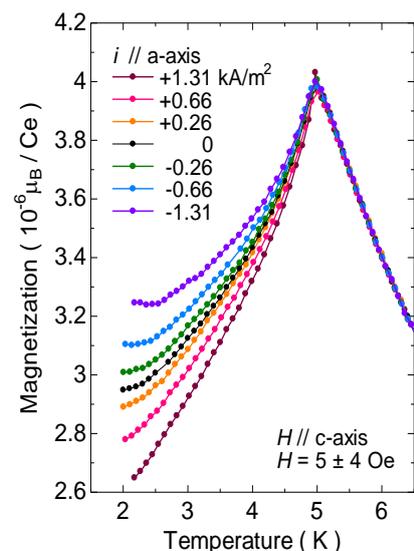


Fig. 1 電流印加下における  $\text{Ce}_3\text{TiBi}_5$  の磁化の温度依存性

[1] Y. Yanase *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83** 014703 (2014).

[2] S. Hayami *et al.*, Phys. Rev. B **90** 024432 (2014).

[3] G. Motoyama *et al.*, Physica B **536** 142-144 (2018).

## 層状 $\text{LiVS}_2$ 高温常磁性相で現れる ジグザグ鎖分子の液体状態

<sup>a</sup>名古屋大学 工学研究科 応用物理学専攻

<sup>b</sup>名古屋大学 未来材料・システム研究所

小島慶太<sup>a</sup>、片山尚幸<sup>a</sup>、田村慎也<sup>a</sup>、服部颯介<sup>a</sup>、齋藤晃<sup>b</sup>、澤博<sup>a</sup>

### Liquid Dynamics of Orbital Molecules in High Temperature Paramagnetic Phase of Layered $\text{LiVS}_2$

<sup>a</sup>Department of Applied Physics, Nagoya University

<sup>b</sup>Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University

Keita Kojima<sup>a</sup>, Naoyuki Katayama<sup>a</sup>, Shinya Tamura<sup>a</sup>,

Sosuke Hattori<sup>a</sup>, Koh Saitoh<sup>b</sup>, Hiroshi Sawa<sup>a</sup>

Keyword: d 電子系, 軌道自由度, ジグザグ鎖, 局所構造解析, 動的秩序

軌道や格子自由度の絡み合いから低温で量体化による『分子』を形成する物質が数多く存在する。例として  $\text{Li}_2\text{RuO}_3$  では二量体[1]が、 $\text{AlV}_2\text{O}_4$  では三量体と四量体[2,3]のペアが現れる。高温ではこれらの量体化による分子は消失し、対称性の高いレギュラーな格子が現れると考えられてきた。しかし、二体相関分布関数(PDF)法を用いた局所構造解析を通じて、これら低温相で現れる量体化分子が、高温常磁性相においても短距離秩序として生き残っている例が近年続々と発見されている[3-5]。こうした短距離秩序状態は古典的な熱揺らぎに起因する液体状態として現れている、と主張する研究者も存在する[3]が、そのダイナミクスを直接実験で明らかにした例は存在せず、究明すべき課題の一つとなっている。

こうした課題に取り組むため、我々は二次元三角格子系  $\text{LiVS}_2$  の構造研究を行った。 $\text{LiVS}_2$  は 314 K で金属・非磁性絶縁体転移を起こし、低温相ではバナジウム三量体が現れる[6,7]。今回我々は、① 高温常相に短距離秩序が現れるか明らかにすること、② その静的/動的な特徴を明らかにすること、を目的として研究を行った。放射光粉末回折データを利用した Rietveld 解析と PDF 解析から平均構造と局所構造を調べ、高角環状暗視野走査透過顕微鏡法(HAADF-STEM)から高温常相で現れる短距離秩序のダイナミクスを調べることにより、① 高温相で、ジグザグ鎖構造が有限の相関長を持って現れていることを明らかにした。加えて、② このジグザグ鎖は、おそらくは熱揺らぎのために、秒のオーダーで時間的に揺らいで現れる液体状態となっていることを明らかにした。

[1] Y. Miura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 033705.

[2] Y. Horibe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 086406.

[3] A.J. Browne *et al.*, Phys. Rev. Mater. **1** (2017) 052003(R).

[4] S.A.J. Kimber *et al.*, Phys. Rev. B **89** (2014) 081408(R).

[5] K.R. Knox *et al.*, Phys. Rev. B **88** (2013) 174114.

[6] N. Katayama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 146405.

[7] 田村慎也, 片山尚幸ら 日本物理学会第 73 年次大会 (2018 年) 22aK403-4

## 一次元ハバード模型におけるダイナミクスの緩和のカノニカル分布との比較

東京大学理学系研究科物理学専攻 物性研究所理論物性部門常次研究室  
深井康平

## Relaxation in One-Dimensional Hubbard model and Canonical ensemble

ISSP University of Tokyo  
Kouhei Fukai

**Keywords :** ハバード模型 可積分系 厳密対角化 熱平衡化

強相関電子系の最もシンプルかつ本質的な有効模型である一次元ハバード模型はベーター仮説を用いることでハミルトニアンの固有状態が厳密に求まる可積分系である [1]。可積分系は互いに可換な無限個の保存量を有しており、その時間発展ダイナミクスは一般的にカノニカル分布へ緩和せず、無限個の保存量の組みを用いた一般化ギブス分布へ緩和することが予想されている。 [2]

本研究ではサイト数8までの一次元ハバード模型において、純粋状態を初期状態としたユニタリ時間発展における運動量密度の長時間平均を厳密対角化の手法を用いて数値計算し、これとカノニカル分布での結果を定量的に比較した。

さらに可積分性を破る相互作用を加えた拡張ハバード模型においては、ユニタリ時間発展による長時間平均がカノニカル分布でよく記述されることも確認された。

## 参考文献

[1] E. Lieb , F. Y. Wu: Phs. Rev. Lett. 1968

[2] M. Rigol, et al : Phy. rev. lett. 2007

## 複合変調フォトニック結晶による2次元ビーム走査

<sup>1</sup>京大院工, <sup>2</sup>学振特別研究員

坂田諒一<sup>1,2</sup>, Menaka De Zoysa<sup>1</sup>, 石崎賢司<sup>1</sup>, 井上卓也<sup>1</sup>, 野田進<sup>1</sup>

### Two-dimensional Beam Scanning with Dually Modulated Photonic Crystal

<sup>1</sup>Kyoto Univ., <sup>2</sup>JSPS Research Fellow

R. Sakata<sup>1,2</sup>, M. De Zoysa<sup>1</sup>, K. Ishizaki<sup>1</sup>, T. Inoue<sup>1</sup>, S. Noda<sup>1</sup>

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶のバンド端共振作用を利用した、大面積コヒーレント動作が可能な面発光型半導体レーザーである。本レーザーにおいて、フォトニック結晶の格子点に変調を加えた「変調フォトニック結晶」を導入することで、変調による回折効果を利用して、任意の2次元方向へとビームを出射することも可能[1]であり、LiDAR等のセンシング応用への展開が期待される。我々はこれまで、高出力・高ビーム品質化に適した新たな変調方式として空孔の位置とFFを同時に変調する複合変調[2]を提案するとともに、2次元ビーム走査を実現する2次元マトリクス構造形成法[3]の提案を行った。今回、複合変調フォトニック結晶レーザーを10×10にアレイ化し、回路駆動による広範囲の2次元ビーム走査、さらに様々な方向への同時ビーム出射を実証したので報告する。

複合変調の概念図をFig.1に示す。斜め出射のための回折ベクトル $\mathbf{k}$ 、格子点の位置ベクトル $\mathbf{r}$ に対して、格子点空孔の位置を $\Delta y = d \cdot \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ に従い、空孔充填率(FF)を $\Delta FF = FF_{\Delta} \cdot \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ に従い、同時に変調している。複合変調においては、位置とFFを同時に変調することで、発振に寄与し得る全てのバンド端で適切な放射係数を得ることが可能となり、光出力の増大および単峰状のビーム出射が可能となる。Fig.2に、作製した複合変調フォトニック結晶の上面SEM像の一例を示す。このような構造を、出射角度を変えながら2次元マトリクス化することで、オンチップでの2次元ビーム走査を試みた。Fig.3に示すようにデバイス裏面にp電極とn電極両方を形成することで、電極によるビーム出射の障害を回避するとともに、各レーザー領域をメサ構造とすることで、pライン電極とnライン電極への選択的な電流注入を可能とし、交点の狙った領域のみが駆動できる構造[3]を形成している。作製した10×10のマトリクスアレイデバイスを用いた2次元ビーム走査の遠視野像を、Fig.4(a)に示す。同図に示されるように、単峰なビーム形状で、広範囲にわたって、狙った方向へのビームの出射を実現した。さらに、Fig.4(b)に示すように、複数領域の同時駆動による、複数方向への同時走査にも成功した。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、JST-CREST(JP MJCR17N3)、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)および科研費(JP 18J22986)の援助を受けた。

【文献】[1] S. Noda *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **23**, 4900107 (2017). [2]坂田, 野田, 他, 2019年春季応物, 12p-W631-5. [3] 福原, 野田, 他, 2019年春季応物, 12p-W631-8.

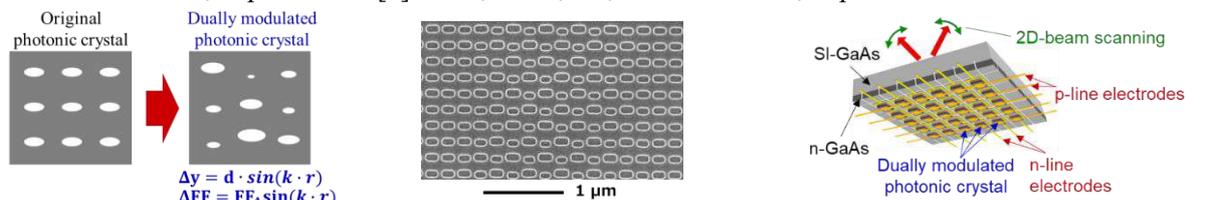


Fig.1. Schematic of modulated photonic crystal.

Fig.2. Top SEM image of dually modulated photonic crystal before air-hole regrowth.

Fig.3. Schematic diagram of 10×10 dually modulated photonic crystal matrix array device.

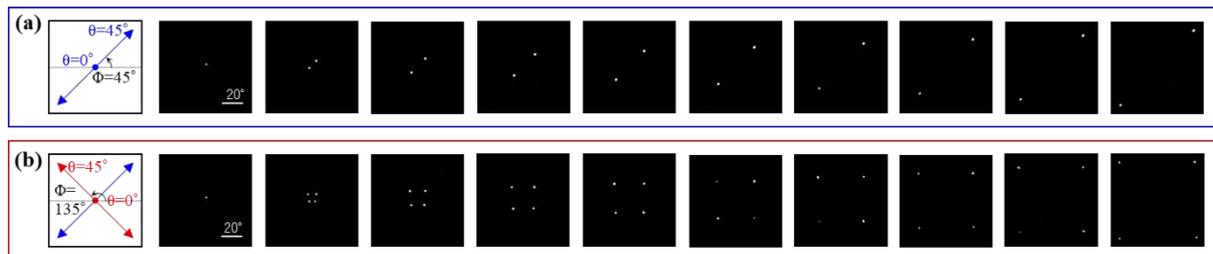


Fig.4. (a) Snap shots of beam scanning by operating single region of dually modulated array device.

(b) Snap shots of multiple beam scanning by operating multiple regions of dually modulated array device simultaneously.

## 薄膜 VTe<sub>2</sub> の電子状態:ARPES

東北大院理<sup>A</sup>

川上 竜平<sup>A</sup>

Electronic structure of monolayer VTe<sub>2</sub> studied by high-resolution ALPES

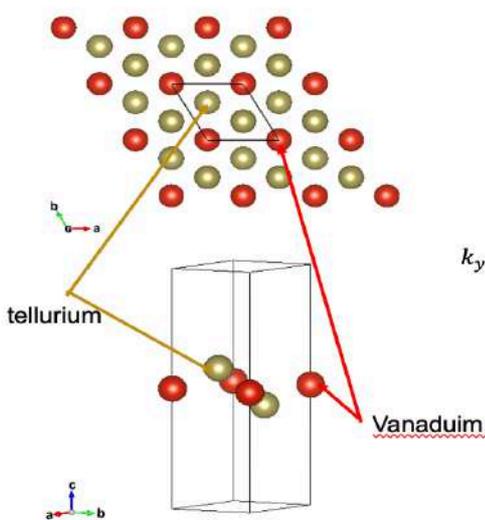
Dept. Physics, Tohoku Univ.<sup>A</sup>

T. Kawakami<sup>A</sup>

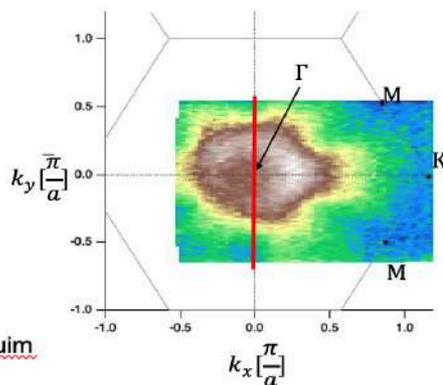
**Keywords:** 二次元物質, 遷移金属ダイカルコゲナイド, two dimensional materials, transition metal dicalcogenides(TMDs)

グラフェンの発見以来、2次元物質に対する関心が高まっている。遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDs) (MX<sub>2</sub>:M=遷移金属, X=S, Se, Te)は、その2次元物質の1つであり、その組成によって異なった物性を示すことから、現在において多くの研究がなされている。今回我々は、その遷移金属ダイカルコゲナイドの1つである1T-VTe<sub>2</sub>(Fig.1)の単結晶薄膜を分子線エピタキシャル法(MBE)を用いて作成し、その電子構造を角度分解光電子分光法(ARPES)によって明らかにした。ARPESはバンド構造を直接的に観測することができ、物性を理解するために有力な手法の1つである。

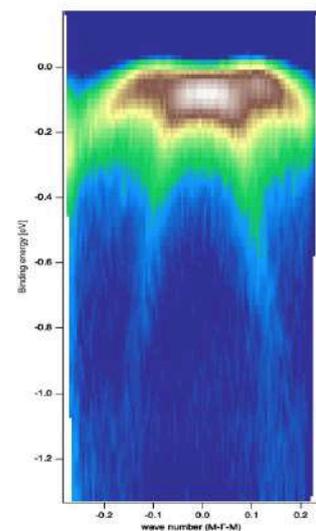
今回の発表では、低温における価電子帯やフェルミ面(Fig.2, 3)などの詳細な電子状態について示し、さらにフェルミ面の電子状態から1次元構造への相転移の可能性について議論する。



(Fig.1) Crystalline structure of 1T - VTe<sub>2</sub>: top view and side view (above and below, respectively)



(Fig.2) VTe<sub>2</sub> Fermi surface near  $E_F$  (lattice constant  $a = 3.55[\text{\AA}]$ )



(Fig.3) VTe<sub>2</sub> Valence band at the  $\Gamma$  point (0,0,0) (red line in the Fig.2)

## 乱流と動的臨界現象の類似性

京大理

田之上智宏

Analogies between turbulence and dynamic critical phenomena

*Department of Physics, Kyoto University*

Tomohiro Tanogami

**Keywords :** 乱流, 動的臨界現象, カスケード, turbulence, dynamic critical phenomena, cascade

十分発達した乱流では、中間的漸近極限  $l_d \ll \ell \ll L$  ( $l_d$ : 粘性発熱が卓越し始めるスケール、 $L$ : 外力が働くスケール) において、運動エネルギーが大スケールから小スケールへ連続的に流れるエネルギーカスケード現象やエントロピーが小スケールから大スケールへ連続的に流れるエントロピーカスケード現象といった興味深い現象が生じる [1]。これらの現象は数値的・実験的に確認されているのはもとより、理論的・数学的側面からも Euler 方程式の散逸的弱解がそのような乱流現象の数学的表現であるとの提案がなされるなど、理解が進展しつつある。

一方、乱流と臨界現象の類似性に関してはこれまで様々な観点から議論がなされてきた。例えば、Wilson はくりこみ群の根底にあるアイデアとして、ミクロナゆらぎが逐次大きなスケールへ影響を及ぼしていくという「カスケード描像」を述べた [2]。この「カスケード描像」には2つの特徴がある：(i) ゆらぎの振る舞いは中間的漸近極限  $l_{\text{micro}} \ll \ell \ll \xi$  でスケール不変となる ( $l_{\text{micro}}$ : 系の微視的スケール、 $\xi$ : 相関距離)；(ii) カスケードに伴う増幅・減衰効果が存在する。特に、(ii) はカスケード過程によって系のミクロナ詳細からの寄与が大スケールにいくにつれて減衰することを意味し、普遍性仮説の根幹をなすものだ。

本研究では乱流と臨界現象の類似性の動的な側面に着目し、臨界現象において Wilson の「カスケード描像」に対応するカスケード現象が実際に存在するかを調べた。具体的には、Euler 方程式と同様のモード結合項を含み、気液臨界現象を記述する非線形 Langevin 方程式—model H—を用い [3]、乱流と同様の理論計算を行った。その結果、秩序変数であるエントロピーゆらぎそのものは保存量であるためカスケードしないが、エントロピーゆらぎの二乗平均、すなわち比熱は小スケールから大スケールへカスケードする可能性があることを見出した。この場合、エントロピーゆらぎの相関関数の冪的振る舞い  $\hat{G}(k) \sim k^{-2+\eta}$  が乱流におけるエネルギースペクトルの冪的振る舞い (Kolmogorov 則)  $E(k) \sim k^{-5/3-\mu}$  に対応し、Eyink と Goldenfeld によって提案された対応関係 [4] とコンシステントであることが確かめられる。

[1] G. L. Eyink, Phys. Rev. X **8**, 011022 (2018).[2] K. G. Wilson, Rev. Mod. Phys. **47**, 773 (1975).[3] P. C. Hohenberg and B. I. Halperin, Rev. Mod. Phys. **49**, 435 (1977).[4] G. Eyink and N. Goldenfeld, Phys. Rev. E **50**, 4679 (1994).

## 非エルミート系におけるブロッホバンド理論

東京工業大学理学院<sup>A</sup>, 東工大元素戦略研究センター<sup>B</sup>

横溝和樹<sup>A</sup>, 村上修一<sup>A,B</sup>

Bloch Band Theory for Non-Hermitian Systems

<sup>A</sup>Dept. of Phys. Tokyo Tech., <sup>B</sup>TIES. Tokyo Tech

K. Yokomizo<sup>A</sup> and S. Murakami<sup>A,B</sup>

**Keywords:** 非エルミート系, バンド理論, 複素波数, バルクエッジ対応

レーザー技術の進歩により、様々なフォトニック系や冷却原子系が実験的に実現されている。このような非平衡開放系は、非エルミートハミルトニアンによって記述されるので非エルミート系と呼ばれる。したがって、平衡系では見られないような非エルミート由来の物性が理論と実験の両面から注目されている。特に、近年、固体物理の様々な場面で登場するトポロジーに非エルミートな効果がどのような影響を与えるかについて研究が進められている。このような研究の中で、非エルミート系におけるバルクエッジ対応に注目が集まっている。非エルミート系の場合、エルミート系と同様にブロッホ波数を実数として扱うことでバルクエッジ対応が破れてしまうことが知られている。

本研究において我々は、1次元非エルミート系におけるバンド理論を構築した[3]。特に、非エルミート系における一般化ブリルアンゾーン  $C_\beta$  の計算方法を複素波数  $\beta = e^{ik}, k \in \mathbb{C}$  の観点から見出した。そして以下のように、一般化ブリルアンゾーン  $C_\beta$  の特徴を発見した。すなわち、エルミート系の場合、ブリルアンゾーンは常に単位円になるが、非エルミート系の場合、一般化ブリルアンゾーン  $C_\beta$  は単一閉曲線になるが円にはならない。さらに、一般化ブリルアンゾーン  $C_\beta$  は微分不可能点を持ち得て、系のパラメータに依存して形状が変化することが明らかになった。

我々のバンド理論によると、非エルミート系におけるバルクエッジ対応を示すことができる。我々は、非エルミート SSH 模型において巻き付き数を一般化ブリルアンゾーン  $C_\beta$  の観点から定義し、この巻き付き数が非ゼロの値をとるときにトポロジカルな端状態が出現することを示した。

[1] K. Yokomizo and S. Murakami, arXiv: 1902.10958

## マグノン束縛状態のダイナミクスの観測とその解析

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻

真田兼行

Observation and analysis of dynamics of magnon  
bound states

*Departments of physics, the University of Tokyo*  
Kazuyuki Sanada

**Keywords :** マグノン束縛状態、量子ウォーク、magnon  
bound states, quantum walk

1次元量子磁性体における素スピン波（マグノン）の束縛状態の存在は80年ほど前に予言されていた。それらの検出は実験的に困難であることの1つとされていたが、冷却原子気体を用いることで単一の原子あるいは単一のスピンの単位の分解能でスピンダイナミクスを観測できる。ここでは、光格子中の冷却ボゾン気体1次元 Heisenberg 鎖中で直接2マグノン状態を観測した。結晶中に比べ有効質量が大きいためダイナミクスはより遅いものとなる。

この実験に関連して最近接相互作用を持つ1次元格子内の2つの識別不能な粒子、具体的には2つのボゾン、2つのフェルミオン、2つのハードコアボゾン [HCB] の連続時間タイムウォークについて調べた。2つの HCB の場合が実験に対応する。この2つの相互作用する粒子や量子統計により co-walking および／あるいは独立に運動する。2粒子量子ウォークにおける散乱問題および束縛状態の解析解は2粒子ヒルベルト空間の固有値問題を解くことで得られる。縮退のある摂動論の文脈から量子 co-walking のための有効単一粒子モデルが解析的に導かれ、ボゾンの移動速度がフェルミオンや HCB の移動速度の3倍であることがわかる。

[1] T. Fukuhara *et al.*, Nature **502**, 76 (2013).

[2] X. Qin *et al.*, Phys. Rev. A **90**, 062301 (2014)

## 2 体系ブラッセレーターにおける対称性の破れ

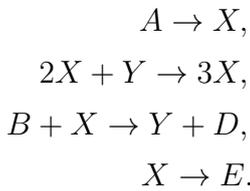
北海道大学 大学院理学院

□町 和香

Symmetry Breaking in Coupled Brusselators  
 Graduate School of Science, Hokkaido University  
 Waka Kuchimachi

Keywords : Reaction-diffusion systems, inhomogeneous steady state

化学振動を示す反応拡散系の数学的なモデルはいくつか知られている。この研究では我々はそれらの一つ、ブラッセレーターについて考える。その反応系は次のように表される。



これはプリゴジンとレフェヴァーによって提案されたモデルである [1]。X と Y の濃度の時間変化を表す微分方程式は運動論方程式と呼ばれ、質量作用の法則によって次のように書ける。

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A + X^2Y - BX - X, \\ \dot{Y}(t) &= BX - X^2Y, \end{aligned}$$

ここで A、B、X、Y はそれぞれ上の反応系に登場する同名の化学反応物の濃度である。この微分方程式の固定点は、 $X^* = A$  かつ  $Y^* = B/A$  となる点である。固定点が不安定であるとき、X と Y は時間経過に従って振動する [2]。

我々は X、Y が空間的に不均一で時間変化しない解を探す。2次元平面を非常に多くの区画に区切る。この各区画間で上で示した反応が起こり、反応物が拡散するようなモデルを考えたい。簡単のために、2つの区画間で反応物を取り取りするモデルを考える。

$$\begin{aligned} \dot{X}_i(t) &= A + X_i^2Y_i - BX_i - X_i + D_X(X_j - X_i), \\ \dot{Y}_i(t) &= BX_i - X_i^2Y_i + D_Y(Y_j - Y_i), \end{aligned}$$

ただし、 $(i, j) = (1, 2), (2, 1)$  である。X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> は各区画における X と Y の濃度、D<sub>X</sub>、D<sub>Y</sub> はそれぞれ X<sub>i</sub>、Y<sub>i</sub> の拡散係数である。この運動論的方程式の固定点は  $X_i^* = A$  かつ  $Y_i^* = B/A$  となる点である。

固定点  $X_i^* = A$ 、 $Y_i^* = B/A$  からの摂動をそれぞれ  $x_i$ 、 $y_i$  とし、運動論的方程式を線形化する。その後、 $x_+ = x_1 + x_2$ 、 $y_+ = y_1 + y_2$ 、 $x_- = x_1 - x_2$ 、 $y_- = y_1 - y_2$  のように置き直すと次の式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_+ \\ \dot{y}_+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B-1 & 1 \\ -B & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_+ \\ y_+ \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_- \\ \dot{y}_- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B-1-2D_X & A^2 \\ -B & -A^2-2D_Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_- \\ y_- \end{pmatrix} \quad (2)$$

(1) と (2) それぞれに現れる行列の固有値を調べることで、固定点  $X_i^* = A$ 、 $Y_i^* = B/A$  の安定性を調べた。すると、この系において空間的に不均一で時間変化しない解の起こる分岐点と、分岐点上での A、B、D<sub>X</sub>、D<sub>Y</sub> の条件は以下のように求められる。

$$A^2(-1 - 2D_X + 2D_Y) > 4D_XD_Y \quad (3)$$

$$B_c = (A^2 + 2D_XA^2 + 2D_Y + 4D_XD_Y)/2D_Y \quad (4)$$

我々は (3) の条件に従って A、B、D<sub>X</sub>、D<sub>Y</sub> の値を選び、(4) の分岐点付近で不均一な定常解が得られることを数値計算によって確かめた。

[1] I. Prigogine and R. Lefever, J. Chem. Phys. **48** (1968).

[2] H. Kori and Y. Morita, Kyoritsu Pub. (2011).

## 気泡の成長・合体に伴うムースの構造の変化

奈良女子大学<sup>A</sup>,

藤本 道子<sup>A</sup>

*Nara Womens University*<sup>A</sup>

Masako Fujimoto<sup>A</sup>

**Keywords :** 気泡, ソフトマター

石鹸の泡やビールの泡をはじめとする膨大な数の気泡から構成されるムースは、その特徴から様々な性質を持ち、食品業をはじめとしたあらゆる産業において利用されている。ムースは、それが生成された直後から排水や熟成が始まり構造が時時刻々と変化していく。特に、静的で安定な場合においては様々な研究が進んでおり、早くから流体力学や物理学の面からも研究の対象とされ多くの研究がなされてきた。例えば、ムース内の気体が気泡間の圧力差によって拡散していく様子はよく知られている。一方、気泡が成長するなどといった動的な振る舞いをする場合、単一気泡に関する成長過程や形状などに比べ、気泡同士の合体挙動については未だ不明な点が数多く残っている。

そこで本研究では、複数の気泡の成長過程における合体の様子を解明することを目的とし、本発表では先行研究の紹介をはじめとし、シリコンオイル中における水滴の合体挙動に関する現在行っている実験から得られた結果および今後の展望を報告する。

[1] M. Borrell *et al.*, *Journal of Colloid and Interface Science* **319**, 263 (2008).

[2] G. Debéguas *et al.*, *Science* **279**, 13 (1998).

## アモルファス Si の構造の冷却速度依存性

東京大学 総合文化研究科 広域科学専攻，千葉大学 融合理工学府 先進理化学専攻

松原 和毅，中山 隆史

Cooling rate dependence of a-Si structures

Dept. of Basic Science Univ. of Tokyo, Dept. of physics Chiba Univ.

Kazuki Matsubara and Takashi Nakayama

**Keywords:** 古典的分子動力学法，アモルファス，結晶

Si 結晶は室温において固体結晶であるが、高温にすると結晶構造が壊れて液体 Si (l-Si) となる。系の温度を徐々に下げていくと l-Si は固体 Si になる。しかし、温度の下げる速度が速いと Si 結晶になることができずアモルファス Si (a-Si) になる(図 1,2)。アモルファスとは結晶がもつ長距離的な並進周期性をもたない非結晶固体のことである。エネルギー最小の Si 結晶は配位数 4 のダイヤモンド構造であるが、それ以外の多数の a-Si が準安定状態として存在する。安定した構造になるためには冷却する速度を十分に遅くすることが必要である。冷却速度を遅くするには長い時間スケールでのシミュレーションが望まれる。一方、Si 原子間の相互作用を正確に扱える第一原理分子動力学法では、到達可能な時間はピコ秒スケールであり、粒子数にも制限がある。そこで本研究ではポテンシャルを仮定した古典的分子動力学法を用いてシミュレーションをする。シミュレーションにおいて、速度 Verlet 法を用いて粒子の位置、速度を時間発展させていき、粒子間に働くポテンシャルには Tersoff ポテンシャルを採用した。図 3 はシミュレーションの過程を示したグラフである。Si 結晶を 4000K で加熱して融解させた l-Si を 300K まで冷却した。そのときの冷却速度を  $1.0 \times 10^{16}$  K/s と  $5.0 \times 10^{12}$  K/s に場合分けした。温度制御には速度スケール法を用いて、a-Si の配位数や動径分布関数、ポテンシャルエネルギーなどの冷却速度依存性を調べた結果を報告する。

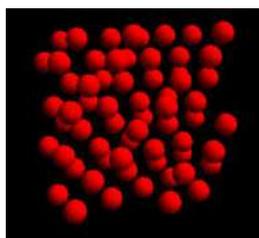


図 1: Si 結晶

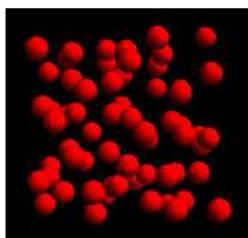


図 2: アモルファス Si

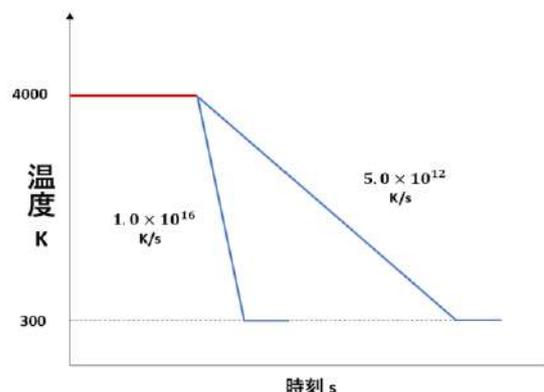


図 3: 温度の時間変化のグラフ

## 円軌道上を運動するコロイド粒子集団の流体力学的同期現象および集団ダイナミクス

東北大学理学研究科物理学専攻<sup>A</sup>

宮本拓実<sup>A</sup>, 今井正幸<sup>A</sup>, 内田就也<sup>A</sup>

**Hydrodynamic Synchronization and collective dynamics of colloidal particles driven along a circular path**

*Department of Physics, Tohoku University<sup>A</sup>*

**Takumi Miyamoto<sup>A</sup> and Masayuki Imai<sup>A</sup>, Nariya Uchida<sup>A</sup>**

**Keywords :** アクティブマター、同期現象、集団運動、流体力学、active matter, synchronization, collective motion, hydrodynamics

流体中で一定軌道上を回転、振動するコロイド粒子の同期現象は、鞭毛や繊毛の同期現象の人工モデルとしても着目されている。本講演では光渦によって一つの円軌道上を駆動されるコロイド粒子の集団運動を取り上げる。九州大学の木村らによって行われた実験では [1, 2]、3 個以上の粒子を含む系においてリズムカルな振動運動が見出されている。今回、この系のダイナミクスを単純な位相方程式に縮約し、理論解析を行なった。その結果を発表する。

### 参考文献

- [1] Y. Sassa, S. Shibata, Y. Iwashita, and Y. Kimura, Phys. Rev. E 85, 061402 (2012).
- [2] Y. Kimura, Journal of the Physical Society of Japan 86, 101003 (2017).

## 古典力学系における高次トポロジカル相

筑波大学大学院 数理物質科学研究科<sup>A</sup>、

筑波大学 数理物質系 物理学域<sup>B</sup>

若尾洋正<sup>A</sup>, 吉田恒也<sup>B</sup>, 荒木広夢<sup>A</sup>, 溝口知成<sup>B</sup>, 初貝安弘<sup>B</sup>

Higher-order topological phases in classical mechanical systems

Graduate School of Pure and Applied Science, University of Tsukuba<sup>A</sup>,

Department of Physics, University of Tsukuba<sup>B</sup>

Hiromasa Wakao<sup>A</sup>, Tsuneya Yosida<sup>B</sup>, Hiromu Araki<sup>A</sup>, Tomonari

Mizoguchi<sup>B</sup>, Yasuhiro Hatsugai<sup>B</sup>,

**Keywords :** トポロジカル絶縁体, ベリー位相, Topological insulators, Berry phase

高次トポロジカル絶縁体(HOTIs)は通常のトポロジカル絶縁体とは異なる特徴をもつ[1-3]。例えば、二次元のHOTIsはバルクのトポロジカルな性質ため0次元の角に局在したコーナー状態が現れる。その一方、トポロジカル相は古典的な物理を用いることで実現が可能である[4, 5]。例としてはグラフェンのトポロジカルをSpring-mass模型で実現することができる[4]。これは模型を記述する運動方程式が固有値問題に帰結することに起因する。これらの事実を背景として、HOTIsのトポロジカルな現象をSpring-mass模型で実現できるかを検討した。

本発表では、Breathing kagome格子において三重回転対称生に守られたトポロジカル量を持つSpring-mass模型を提示することでHOTIsに対応するトポロジカル相を提案する[Fig.1(a)]。具体的には、本模型における固定端のもとでのコーナー状態[Fig.1(b)]と、トポロジカル相を特徴付けるバルクトポロジカル量 $\mathbb{Z}_3$ ベリー位相を計算した結果を提示する[6]。更に、コーナー状態の実験的観測方法として、強制振動を用いた方法を提案する。

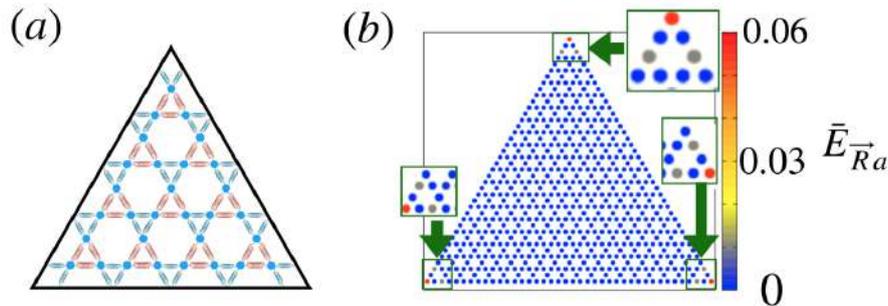


Figure 1: (a). Breathing kagome格子において三重回転対称生に守られたトポロジカル量を持つSpring-mass模型。(b). 固定端におけるこのSpring-mass模型のコーナー状態を表したエネルギー分布。

- [1] W. A. Benalcazar, *et al.*, Science 357, **61** (2017).
- [2] F. Schindler, *et al.*, Sci. Adv. **4**, eaat0346 (2018).
- [3] M. Ezawa, Phys. Rev. Lett. **120**, 026801 (2018).
- [4] T. Kariyado, Y. Hatsugai, Sci. Rep. **5**, 18107 (2015).
- [5] M. Serra-Garcia, *et al.*, Nat. Phys. **555**, 342-345 (2018).
- [6] Y. Hatsugai, I. Maruyama, Europhys. Lett. **95** 20003 (2011).