

PS-1

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、 λ 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 χ_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).

漢字における線長と画数のベキ乗則

琉大院理工, 琉大理^A

太田 守洋, 山本 健^A

Power-law relation between line length and stroke count of kanji

Graduate Sch. of Eng. and Sci., Univ. of the Ryukyus, ^AFac. of Sci, Univ. of the Ryukyus

M. Ohta and K. Yamamoto^A

Keywords : Power law, Language, Chinese characters, Fractal

言語は複雑系の典型である。本研究では、漢字の形に関する統計則について考える。漢字を構成する線の長さは、漢字の形の複雑さを表す指標の1つといえるだろう。そこで、漢字の画数に対して線長がどのように増大するかに着目して、漢字の形の複雑さを分析する [1]。

常用漢字 2136 字 (MS ゴシックフォント) の線長と画数の関係を図 1 に示す。グラフより、漢字の線長 l は画数 s に対しておおむねベキ乗則

$$l \propto s^\beta \quad (1)$$

にしたがって増加していることがわかる。ベキ指数の値は $\beta = 0.47$ である。同様のベキ乗則は JIS 第 1 水準から第 2 水準までの漢字 6355 字でもみられ、 $\beta = 0.52$ となる。

以上の結果を説明するためにフラクタルを基にしたモデルを考える。このモデルから、漢字のベキ指数 β とフラクタル次元 D との関係を導出する。図 2 のように、各ステップで三角形を追加してフラクタル図形を描いていく。このとき、画数 s と線長 l について

$$l \propto s^{1-1/D} \quad (2)$$

が導かれる。式 (1) および (2) から、 $\beta = 1 - 1/D$ であることがわかる。漢字における指数 β の値から対応するフラクタル次元 D を計算すると、常用漢字では $D = 1.89$ 、JIS 第 1 水準から第 2 水準までの漢字では $D = 2.08$ である。次元 D が 2 に近いことから、漢字の字形は画数が増えるにつれて平面充填的に複雑化していくことが推測される。この結果は、画数が多い漢字を小さく印刷すると真っ黒に塗りつぶされたように見えることと対応していると考えられる。

さらに、今回の発表では漢字の線長と画数の分布のスケールリング関係についても考察する。

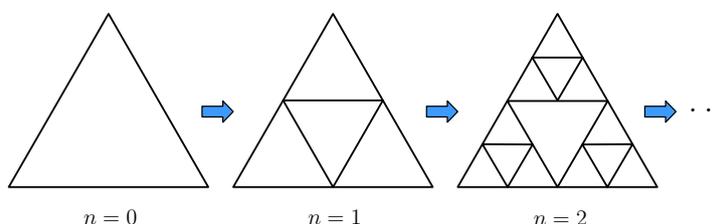


図 2 フラクタル図形を基にしたモデル。 $n \rightarrow \infty$ で Sierpinski gasket に収束する。

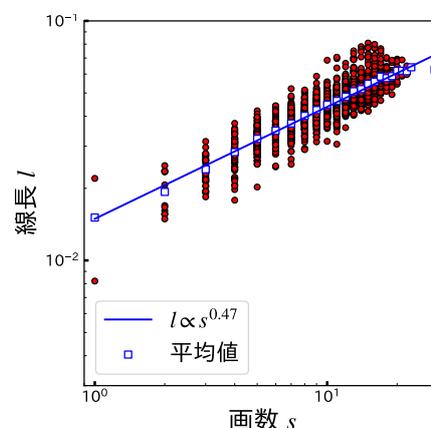


図 1 常用漢字 2136 字に対する線長と画数の相関。丸い点は各漢字の線長、四角い点は各画数での平均線長を表す。

[1] M. Ohta and K. Yamamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 064803 (2019).

PS-3

gapped/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 gapped/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 (gapped)SPT 相¹ 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]。

本ポスターでは SPT の分類について説明し、加えて SPT の公理のうち 2) を外したクラスとして最近注目されつつある gapless SPT 相の構成と分類について、具体例とともに解説する予定である [3-6]。

[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

¹Symmetry Protected Topological Phase の略。単に SPT 相という時は普通 gapped SPT 相を指す。

3 + 1 次元におけるボソン・フェルミオン双対性

東工大理^A, 理研^B

古澤拓也^{A, B}, 西田祐介^A

Boson-fermion duality in 3+1 dimensions

^A*Dept. of Phys., Tokyo Institute of Technology,*

^B*Condensed Matter Theory Laboratory, RIKEN CPR*

Takuya Furusawa^{A, B} and Yusuke Nishida^A

Keywords: 双対性, Duality,

強く相互作用する量子多体系で生じる新奇な現象を理解することは、素粒子、原子核、物性物理学に共通する最大の課題の一つである。そのような強相関系に対して有用な手法の一つとして、我々は双対性に着目した。双対性とは、一見異なる量子多体系の間の等価性であり、一つの物理現象に対して異なる見方を与える。双対性を用いて、適当な見方から解析を行うことで、一見困難に見える問題も解決することができる。

これまでの双対性に関する研究は1次元系に対するものが殆どであったが、近年、2次元系における双対性が発見され、素粒子・物性の両面から活発に研究されている。この進展の中で、特に注目されている双対性は、ボソン・フェルミオン双対性である[1]。この双対性は、チャーン・サイモンズゲージ理論に結合した複素スカラーボソンと、自由なディラックフェルミオンの間の等価性である。物理的には、チャーン・サイモンズゲージ場により、ボソンに仮想的な磁束が束縛され、アハラノフ・ボーム効果により、統計性が変更されると解釈される。

本講演では、Lattice Construction と呼ばれる2次元のボソン・フェルミオン双対性の証明法[2]を拡張し、3次元の新しいボソン・フェルミオン双対性を導出する[3]。3次元の場合、真空角 $\Theta=\pi$ のゲージ理論に結合した複素スカラー場と自由なディラックフェルミオンが双対となる。フェルミオン側のトポロジカル絶縁体と自明な絶縁体の間の相転移は、ボソンの言葉では、ヒッグス相と閉じ込め相の間の相転移と等価となる。真空角 $\Theta=\pi$ の場合には、モノポールは電荷も持ったダイオンとなることが知られている。我々の双対性は、スカラーボソンと2つのダイオンが束縛状態を作ることで、フェルミ統計を持つ粒子となることを示唆している。

[1] N. Seiberg, et al., *Ann. of Phys.*, 374, (2016).

[2] J-Y. Chen, et al., *PRL*, 120, 016602 (2018).

[3] T. Furusawa, and Y. Nishida, *arXiv:1810.11808* (2018).

PS-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¹

高城 翔矢¹

A guide to topological error correction code

¹*Division of Physics and Astronomy, Graduate School of Science,
Kyoto University*

Shoya Takagi¹

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キタエフのトーリックコードを導入する。この符号はトー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。

振動子集団の同期した振動を抑制する フィードバックのデザイン

お茶大院理^A, 東大新領域^B

小澤 歩^A, 郡 宏^B

Feedback design for suppressing synchronized oscillations in a population of oscillators

Ochanomizu Univ.^A, Univ. Tokyo^B

A. Ozawa^A and H. Kori^B

Keywords : 同期, フィードバック, Synchronization, Feedback

振動子が相互作用などによりリズムを揃えて振動する現象は同期現象と呼ばれ、様々な場面で観察される。例えば、私たちの心拍のリズムは同期して活動する細胞の集団により生み出される。同期現象の例は、このような望ましいものばかりではない。過度に同期した脳の神経細胞の活動は、パーキンソン病患者が示す手足の震えなどの運動症状に関係すると考えられている。

パーキンソン病の対症療法として、脳の一部に電気的な刺激を与える脳深部刺激療法がある。この療法は薬物療法を補完する役割を果たすが、副作用もある。そこで、副作用の軽減を目的として治療に用いる刺激を低減する方法が研究されており、脳の状態に応じて刺激を調整するアプローチの有効性が指摘されている [1]。しかし、どのように調整すれば刺激強度を低減できるのかは明らかでない。

このような背景から、振動子集団の同期を抑制するフィードバックの設計方法を提案するために、大域的なフィードバックを受ける坂口-蔵本モデルの解析を行った。坂口-蔵本モデルは相互作用する振動子集団のモデルであり、振動子間の相互作用強度がある臨界値を超えると、集団状態が非同期状態から同期状態へと転移する。本研究では、このモデルで記述される振動子集団に、集団状態を表す複素秩序変数の関数としてフィードバックを付加したモデルを考えた。そして、振動子数無限個の極限で Ott と Antonsen の理論 [2] を用いて解析を行い、集団ダイナミクスの相図を得た (図 1)。さらに、最小のフィードバック強度で非同期状態を安定化するフィードバックのパラメータを導出した。本発表では、これらの結果に加えて、大域的なフィードバックを受ける他の振動子モデルの振る舞いを示し、フィードバックの効果の頑健性と限界について議論したい。

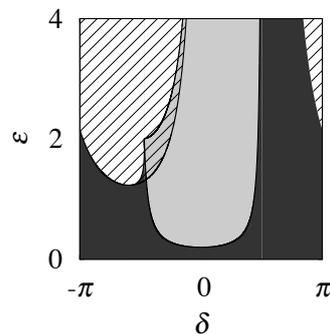


図 1: 大域的なフィードバックを受ける坂口-蔵本モデルの集団ダイナミクスの典型的な相図。横軸はフィードバックのパラメータ。縦軸はフィードバック強度。濃い灰色は同期した振動が見られる集団振動状態を、薄い灰色は非同期状態を表す。斜線は同期した振動が停止した状態が安定な領域を表す。

[1] O. V. Popovych and P. A. Tass, *Frontiers in Physiology* **9**, 46 (2018).

[2] E. Ott and T. M. Antonsen, *Chaos* **18**, 037113 (2008); **19** 023117 (2009)

PS-7

シナプス刈り込みによる神経回路可制御性の近最適化

東京大学総合文化研究科
市川航平, 金子邦彦

Synaptic pruning makes neural networks near optimal for
controllability.

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

Keywords : 計算論的神経科学, ネットワーク制御, functional connectivity

近年、ネットワーク科学の知見を神経科学に取り入れた network neuroscience[1] という分野が盛んに研究されており、特に脳の構造・機能を制御理論の立場から特徴付ける試み[2]が注目されている。その一つの成果として、人間の脳のネットワーク構造が可制御性に関して（ネットワークを制御するために必要なエネルギーが小さくなるように）近最適化されているという報告がある[3]。

筆者はこの近最適性が実現されるためのメカニズムとして、シナプス刈り込みが重要な役割を果たしているのではないかという仮説を立てた。シナプス刈り込みとは生後間もない動物の脳で過剰に生成されたシナプスのうち、生後の発達過程において必要なシナプスが強められ、不要なシナプスは除去されるという現象のことである。そのメカニズムにはまだ未解明な部分が多いが、本研究では上の仮説を検証するために単純化したシナプス刈り込みモデルを考案した。

- 1: 密なネットワークを生成モデルに従ってランダムに生成する。
- 2: ダイナミクスをもとに機能的結合（相関行列）を計算する。
- 3: 削除するシナプス結合を機能的結合の強さに基づいて（弱いものが削除されやすくなるように）確率的に選択し、それを削除する。
- 4: 強化するシナプス結合を機能的結合の強さに基づいて（強いものが強化されやすくなるように）確率的に選択し、それを強化する。
- 5: 2~4を繰り返す。

1. で用いる生成モデルの種類や機能的結合を計算する際に仮定するダイナミクスなど、様々な条件でシミュレートするといくつかの条件についてはこのモデルにより実際にネットワーク可制御性が近最適化されることが明らかになった。

- [1] Bassett, D. S., Sporns, O. Network neuroscience. *Nature Neuroscience*, 20(3), (2017).
[2] Gu, S., Bassett, D. S., et al. Controllability of structural brain networks. *Nature Communications*, 6, 1-10.(2015).
[3] Tang, E., Bassett, D. S., et al. Developmental increases in white matter network controllability support a growing diversity of brain dynamics. *Nature Communications*, 8(1) (2017).

Jaynes-Cummings モデルのマスター方程式と CP 性について

早大理工^A, 早大理工^B渡邊あかね^A, 中里弘道^B

The Master Equations of the Jaynes-Cummings Model and their Complete Positivity

Waseda univ.^A, *Waseda univ.*^BAkane Watanabe^A and Hiromichi Nakazato^B

Keywords: 開放系, 量子光学, CP 性, Bures 距離, open system, quantum optics, complete positivity, Bures distance

単一周波数の光子と一対一で相互作用する, 単一二準位原子を記述するモデルである, Jayne-Cummings 系 (JC 系) を開放系として扱うことがテーマである [1].

JC 系のマスター方程式としては, 次のようなものが現象論的に広く用いられてきた.

$$\frac{d\rho}{dt} = -i[\rho, H_{JC}] + \gamma(\omega) \left(a\rho a^\dagger - \frac{1}{2}\{a^\dagger a, \rho\} \right) \quad (1)$$

これに対し, Scala らによって提唱されたより微視的な導出により, 別のマスター方程式が得られた [2, 3]. 複雑な微視的なマスター方程式は, 現象論的な式との比較を目的として, 摂動展開が実行された [4].

本発表の前半では, 現象論的なマスター方程式と微視的なマスター方程式における, 導出方法や Lindblad 演算子の意味の違いについて述べ, 両者の応用可能範囲の違いを述べる.

この議論において, マスター方程式の, 時間発展を記述する力学半群としての CP 性 (Complete Positivity) が重要な点になるのことが明らかになった.

CP 性を保つマスター方程式の表式は, 1976 年に Gorini らによって示された [5]. 以降, 量子開放系の分野では, GKSL 型のマスター方程式が広く用いられてきた.

ここで近年再び, この CP 性を保証する表式が Mukherjee により, Bures 距離を用いた別の方法で示された [6]. 本発表の後半では, それを紹介する.

[1] E. T. Jaynes F. and W. Cummings, IEEE, **51**,89-109 (1963).

[2]M. Scala, et al., Physical Review A, **75**, 013811 (2007).

[3] 尾崎壮駿, 早稲田大学, 卒業論文 (2018)

[4] 渡邊あかね, 早稲田大学, 卒業論文 (2019)

[5]V. Gorini, A. Kossakowski, and E. C. G. Sudarshan , J. Math. Phy., **17**, 821 (1976)

[6]M. Mukherjee, Positivity, **22**, 27-37 (2018)

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).

量子ボルツマンマシンの統計力学的解析

東北大学大学院情報科学研究科^A, 東京工業大学科学技術創成研究院^B,
株式会社 Jij^C, 株式会社シグマアイ^D

高橋 茶子^A, 大関 真之^{ABCD}, 田中 和之^A

Statistical-mechanical analysis of restricted Boltzmann machine with transverse field

^A Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

^B Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology ^C Jij Inc. ^D Sigma-i Inc.

Chako Takahashi^A, Masayuki Ohzeki^{ABCD} and Kazuyuki Tanaka^A

Keywords: 制限ボルツマンマシン, 相転移, レプリカ解析

制限ボルツマンマシン (restricted Boltzmann machine; RBM) [Hinton, 2010] は, 機械学習で多用されるグラフィカルモデルの一つである. RBM は図 1 に示すような完全二部グラフで表され, データに対応する可視変数からなる可視層と, システム内部の潜在的な変数である隠れ変数からなる隠れ層に分けられる. 通常の RBM は次のようなハミルトニアンで表される.

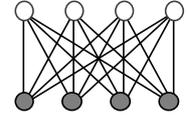


図 1 RBM の構造.

$$H(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = - \sum_{i \in V} b_i v_i - \sum_{j \in H} c_j h_j - \sum_{i \in V} \sum_{j \in H} w_{ij} v_i h_j \quad (1)$$

ここで, $v_i = \{-1, +1\}$ ($i \in V$) は可視層 V に含まれる可視変数, $h_j = \{-1, +1\}$ ($j \in H$) は隠れ層 H に含まれる隠れ変数を表す. b_i, c_j, w_{ij} はそれぞれ可視変数のバイアス, 隠れ変数のバイアス, 可視変数と隠れ変数の間の相互作用を表すパラメータである.

本研究は, RBM に横磁場の効果を取り入れた量子ボルツマンマシン [Amin et al., 2016] を対象とする. 横磁場を導入した量子ボルツマンマシンのハミルトニアンを次のように定義する.

$$\begin{aligned} \hat{H} &= H(\hat{\mathbf{v}}^z, \hat{\mathbf{h}}^z) + H_{\Gamma_v}(\hat{\mathbf{v}}^x) + H_{\Gamma_h}(\hat{\mathbf{h}}^x) \\ &= - \sum_{i \in V} b_i \hat{v}_i^z - \sum_{j \in H} c_j \hat{h}_j^z - \sum_{i \in V} \sum_{j \in H} w_{ij} \hat{v}_i^z \hat{h}_j^z - \Gamma_v \sum_{i \in V} \hat{v}_i^x - \Gamma_h \sum_{j \in H} \hat{h}_j^x \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, Γ_v, Γ_h は各層での横磁場の強さを表すパラメータであり, \hat{v}^z, \hat{h}^z はパウリ行列の z 成分, \hat{v}^x, \hat{h}^x はパウリ行列の x 成分を表す. 本研究では, Suzuki-Trotter 分解 [Trotter, 1959] [Suzuki, 1976] により式 (2) のハミルトニアンを古典系のフィールドに移し, レプリカ法 [Mezard et al., 1987] を用いて式 (2) の量子ボルツマンマシンの相転移を解析した結果を報告する. RBM に関連する他のモデルの相転移との共通点, 相違点などについても報告する予定である.

2 体系ブラッセレーターにおける対称性の破れ

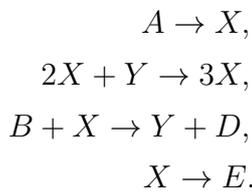
北海道大学 大学院理学院

□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。X₁、X₂、Y₁、Y₂ は各区画における X と Y の濃度、D_X、D_Y はそれぞれ X_i、Y_i 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_X、D_Y 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_X、D_Y 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).

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^A、
筑波大学 数理物質系 物理学域^B若尾洋正^A, 吉田恒也^B, 荒木広夢^A, 溝口知成^B, 初貝安弘^BHigher-order topological phases in classical mechanical systems
Graduate School of Pure and Applied Science, University of Tsukuba^A,
Department of Physics, University of Tsukuba^BHiromasa Wakao^A, Tsuneya Yosida^B, Hiromu Araki^A, Tomonari
Mizoguchi^B, Yasuhiro Hatsugai^B,

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。

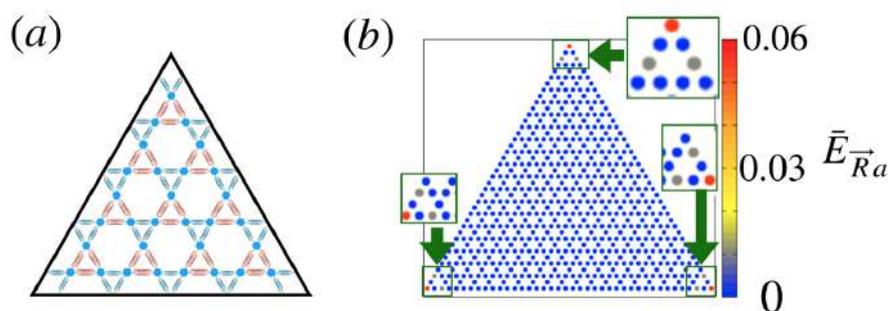


Figure 1: (a). Breathing kagome格子において三重回転対称生に守られたトポロジカル量を持つSpring-mass模型。(b). 固定端におけるこのSpring-mass模型のコーナー状態を表したエネルギー分布。

- [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).

PS-14

非対称自然振動数分布をもつ蔵本モデルの分岐解析

京都大学大学院情報学研究科

米田亮介, 山口義幸

**Classification of bifurcation diagrams in the Kuramoto model
with asymmetric natural frequency distributions**
Graduate School of Informatics, Kyoto University,
Ryosuke Yoneda and Yoshiyuki Y. Yamaguchi

Keywords: 非線形力学, 同期, 結合振動子, 分岐解析, nonlinear dynamics, synchronization, coupled oscillators, bifurcation analysis

蔵本モデルは結合強度を変えることによって同期転移を記述する代表的な結合振動子系である。それぞれの振動子は確率分布に従う自然振動数を持ち、非同期状態からの連続転移や不連続転移といった分岐の種類は自然振動数分布に従う。蔵本モデルの多くの研究は対称分布に関するものだったが、非対称性を導入することで部分同期状態からの振動や不連続転移が得られることが報告されている [1]。本研究では、新しく得られたものを含む5種類の分岐図の理論的な分類の手法を提案する。部分同期状態からの振動や不連続転移についてはそれぞれ非同期状態からの線形解析と振幅方程式から解析する。

[1] Y. Terada *et al.*, Nonstandard transition in the Kuramoto model: a role of asymmetry in natural frequency distributions, *J. Stat. Mech.* (2017) 0134403.

複合変調フォトニック結晶による2次元ビーム走査

¹京大院工, ²学振特別研究員

坂田諒一^{1,2}, Menaka De Zoysa¹, 石崎賢司¹, 井上卓也¹, 野田進¹

Two-dimensional Beam Scanning with Dually Modulated Photonic Crystal

¹Kyoto Univ., ²JSPS Research Fellow

R. Sakata^{1,2}, M. De Zoysa¹, K. Ishizaki¹, T. Inoue¹, S. Noda¹

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阻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.

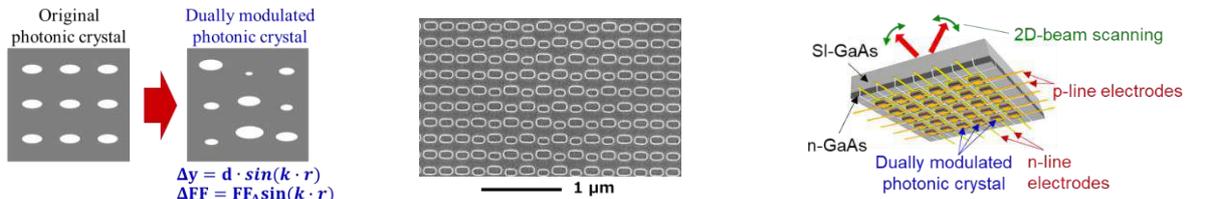


Fig.1. Schematic of modulated photonic crystal.

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.

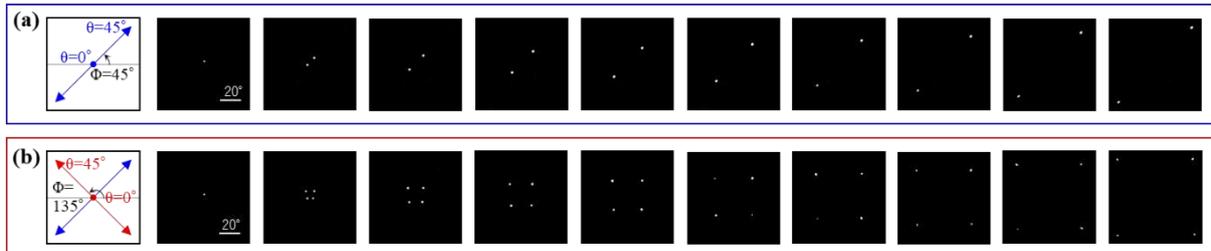


Fig.4. (a) Snap shots of beam scanning by operating single region of dually modulated array device.

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

スパース動的モード分解と Bayesian LARS-OLS による コヒーレントフォノン信号解析

東大院理^A, 東大新領域^B,
JST さきがけ^C, 物材機構 *MaDIS*^D, 阪府大院理^E, 熊大パルス研^F
 坂田逸志^A, 長野祥大^B, 五十嵐康彦^{BCD},
 村田伸^B, 溝口幸司^E, 赤井一郎^F, 岡田真人^{ABD}
**Coherent phonon signal analysis by sparse dynamic mode
 decomposition and Bayesian LARS-OLS**
U. Tokyo Sci.^A, *U. Tokyo Frontier Sci.*^B, *JST PREST*^C,
NIMS MaDIS^D, *Osaka Prefecture U.*^E,
Kumamoto U. pulsed Power Sci.^F
I. Sakata^A, *Y. Nagano*^B, *Y. Igarashi*^{BCD},
S. Murata^B, *K. Mizogushi*^E, *I. Akai*^F, *M. Okada*^{ABD}

Keywords : コヒーレントフォノン, スパース動的モード分解, ベイズ推論, 時系列解析, 非平衡現象, coherent phonon, sparse dynamic mode decomposition, Bayesian inference, time series analysis, nonequilibrium phenomenon

コヒーレントフォノン (CP) 信号解析における新たなデータ駆動的な解析手法を提案する. CP 信号は位相が揃ったフォノン振動を計測した信号で, 励起状態への緩和過程における格子の固有振動を反映する. 信号解析の目的は CP 信号から減衰振動として表現される固有振動を実験的アーティファクトや雑音から分離して抽出することである. 減衰振動への分解は従来のフーリエ解析等では困難であり, 先行研究 [1] では非線形流体振動の時空間モード分解手法 Sparsity-promoting dynamic mode decomposition (SpDMD) [2] を用いることを提案している. しかし, 先行研究の方法では負の信号成分が定常的なデータしか取り扱うことができなかった.

今回我々は SpDMD 解析にベイズ推論の枠組みの 1 つである Bayesian LARS-OLS [3] を導入し, 従来取り扱えなかった信号に大きなトレンドがあるデータでも解析可能な方法の開発に成功した (図 1). 手法の有効性の検証のため, 固有振動が既知の Bi (111) の実データ解析を行った結果をまとめる. また, 提案手法は固有振動の抽出のみならず信号の雑音強度も推定可能である. 人工データの解析を通してノイズ推定の性能とノイズに対する頑強性の検証を行う.

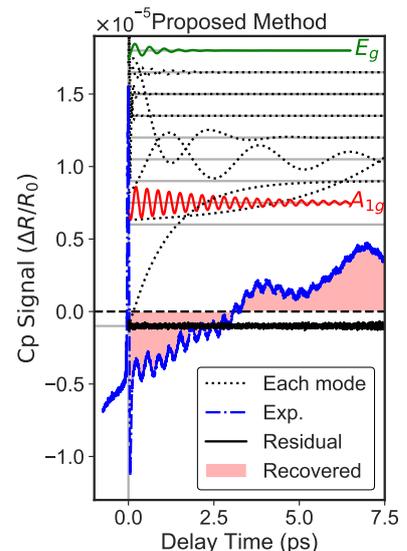


図 1: 提案手法による解析結果.
図中の A_{1g} と E_g は固有モード

[1] S. Murata *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 5 (2018).

[2] M. R. Jovanovi *et al.*, *Phys. Fluids* **26**, 2 (2014).

[3] Y. Mototake *et al.*, *J. J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 11 (2018).

薄膜 VTe₂ の電子状態:ARPES

東大院理^A

川上 竜平^A

Electronic structure of monolayer VTe₂ studied by high-resolution ALPES

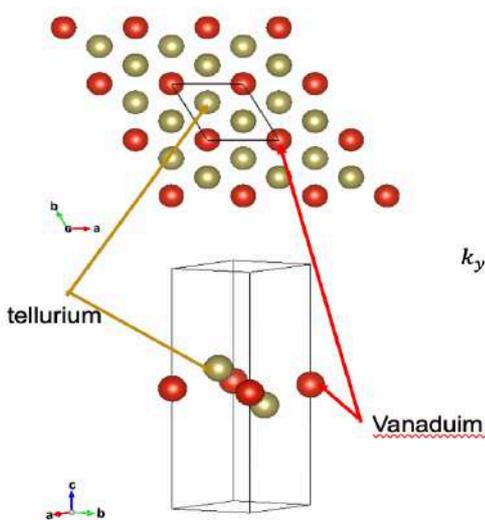
Dept. Physics, Tohoku Univ.^A

T. Kawakami^A

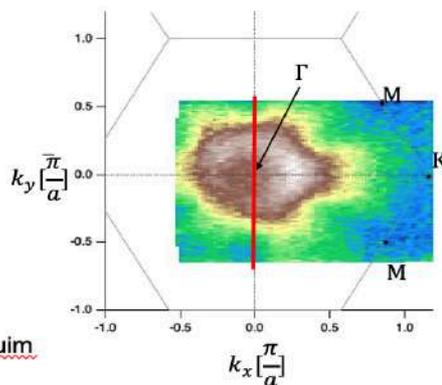
Keywords: 二次元物質, 遷移金属ダイカルコゲナイド, two dimensional materials, transition metal dicalcogenides(TMDs)

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) (MX₂: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-VTe₂(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。

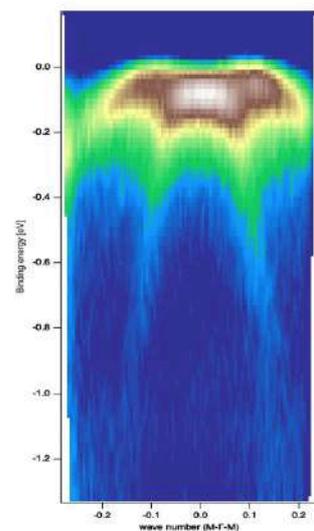
今回の発表では、低温における価電子帯やフェルミ面(Fig.2, 3)などの詳細な電子状態について示し、さらにフェルミ面の電子状態から1次元構造への相転移の可能性について議論する。



(Fig.1) Crystalline structure of 1T - VTe₂: top view and side view (above and below, respectively)



(Fig.2) VTe₂ Fermi surface near E_F (lattice constant $a = 3.55[\text{\AA}]$)



(Fig.3) VTe₂ Valence band at the Γ point (0,0,0) (red line in the Fig.2)

磁気スキルミオンのダイナミクスに関する数値的研究

東北大学金属材料研究所^A, 名古屋大学工学研究科^B
亀田麻衣^A, 川口由紀^B

Numerical Study on Dynamics of Magnetic Skyrmions

^A*Institute for Materials Research, Tohoku University,*

^B*Department of Applied Physics, Nagoya University*

Mai Kameda^A and Yuki Kawaguchi^B

Keywords: スキルミオン, スピントロニクス, 数値シミュレーション

磁気スキルミオンは、局在スピンの配置する磁気的な励起状態であり、空間反転対称性の破れた磁性体(カイラル磁性体など)で発現する。通常、磁気スキルミオンは集まって三角格子を形成する[1]。しかし最近の実験により初めて、磁気異方性の強い系で、三角格子ではなく液晶のような空間分布を持つ磁気スキルミオンが観測された[2]。この状態は新たな磁気デバイス等への応用が期待され、その理論的背景を理解することは重要である。しかしながら、磁気スキルミオンによる液晶のような空間分布がどのような相互作用によってどの条件下で引き起こされるのか、という理論的背景は未だわかっていない。

私たちは、数値シミュレーションを用いてこの理論的背景を解明することを目的としている。具体的には、有限温度下で局在スピンの運動方程式(LLG 方程式)とモンテカルロ法を用い、系のハミルトニアンを系統的に変化させながら、それぞれエネルギーが最小となるスピン状態を数値的に探索する。有限温度効果を含む LLG 方程式は確率微分方程式となるため、数値解析の際に特殊な扱いが必要である。本講演では、本研究内容や計算手法について詳しく説明する。

[1] N. Nagaosa *et al.*, Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013).

[2] T. Nagase *et al.*, private communication.

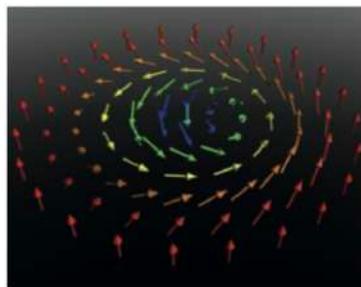


図 1. 磁気スキルミオンの模式図 ([1]より抜粋)

β'' -(ET)₂[(H₂O)(NH₄)₂Cr(C₂O₄)₃]·18-crown-6 の異方的超伝導筑波大院数理物質^A, 物材機構^B, Nottingham Trent Univ.^C, 阪大理^D森定恭平^{A,B}, 杉浦栞理^B, 寺嶋太一^B, Lee Martin^C,坏広樹^D, 中澤康浩^D, 宇治進也^{A,B}Anisotropic superconductivity in β'' -(ET)₂[(H₂O)(NH₄)₂Cr(C₂O₄)₃]·18-crown-6^A Univ. of Tsukuba, ^B NIMS, ^C Nottingham Trent University, ^D Osaka UniversityK. Morisada^{A,B}, S. Sugiura^B, T. Terashima^B, Lee Martin^C,H. Akutsu^D, Y. Nakazawa^D and S. Uji^{A,B}**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、ボ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 β'' -(ET)₂[(H₂O)(NH₄)₂Cr(C₂O₄)₃]·18-crown-6 (β'' -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 β'' -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 $H_{c2\perp}$, $H_{c2//}$ 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。このポスター発表では、これらの結果について分かりやすく紹介する。

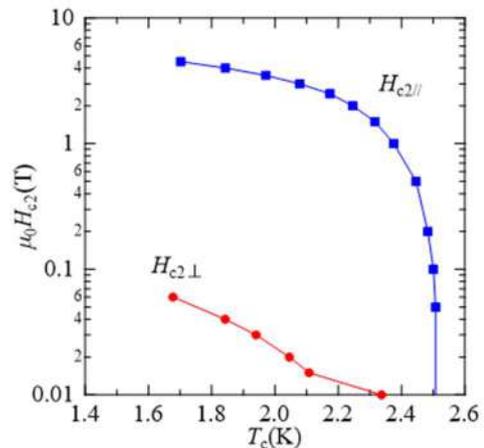


図 1 垂直、平行方向の臨界磁場の温度依存性

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

Rashba 電子系におけるスリット型電子干渉実験の理論研究

東京大学工学系研究科物理工学専攻^A,
早稲田大学先進理工学部応用物理学科^B
清水宏太郎^A, 望月維人^B

Theoretical study of double-slit experiments in the Rashba electron systems.

Department of Applied Physics, The University of Tokyo^A,
Department of Applied Physics, Waseda University^B
Kotaro Shimizu^A and Masahito Mochizuki^B

Keywords : スピン軌道相互作用, スピントロニクス, スピン依存伝導

本研究では, Rashba 型スピン軌道相互作用 (R-SOI) が存在する 2次元電子ガス (2DEG) 系において「スリットによるスピン依存電子波干渉現象」の理論研究を行った。本研究の舞台となる R-SOI はそれがもたらす豊富な物性現象やデバイス応用可能性から, スピントロニクス分野において電子スピンの制御チャネルとして有望視されている相互作用であり,

$$\mathcal{H}_{\text{RSOI}} = \frac{\sigma}{\hbar} \cdot (\mathbf{p} \times \boldsymbol{\alpha}) \quad (1)$$

という Hamiltonian で表される。加えて, その強度をゲート電圧によって電氣的に調整できるという応用上非常に重要な特徴も兼ね備えている。[1]

我々はこの R-SOI が存在する 2次元電子系で, 電子が単スリットおよび二重スリットを通過した後の時空間ダイナミクスを 4 次の Runge-Kutta 法を用いて数値的にシミュレーションした。スリットを通過した電子は電子波干渉を起こしながら伝播するが, 本研究は, Rashba 電子系では R-SOI による有効磁場の存在により, その干渉縞が電荷密度および電子の散乱角度 θ に依存したスピンの情報を持つことを明らかにした。また, この散乱角度依存性が, 散乱角の増加に伴うスピン歳差運動の増大に起因することを明らかにした (図 1 の模式図参照)。さらに, R-SOI の強度をゲート電圧により 変調することで 電荷の干渉縞を不変に保ちながらスピン成分の干渉縞を変化させられることや, スリット通過後のスピン z 成分密度 D_s の干渉縞の縞間隔 Δr は入射する電子の速度よらずに R-SOI の大きさによって一意的に決まることを見出した。これらの結果は, Rashba 電子系における電子波干渉現象が, 電氣的に可変な電子スピンの情報伝送に使えることを示唆している。

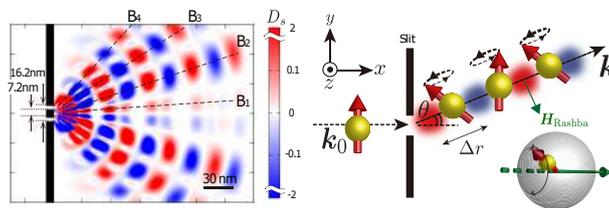


図 1: (左) スリット通過後のスピン z 成分密度 D_s の時間発展。各時刻における結果を一つの図に重ね書きしたもの。(右) スリット通過の模式図

[1] J. Nitta *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 1335 (1997).

トリプチセン骨格を用いたハニカム構造の構築

名大院理^A後口遼^A, 珠玖良昭^A, 阿波賀邦夫^A

Construction of honeycomb structure by triptycene skeleton

^A Grad. Sch. Sci., Nagoya Univ.Ryo Ushiroguchi^A, Yoshiaki Shuku^A and Kunio Awaga^A

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

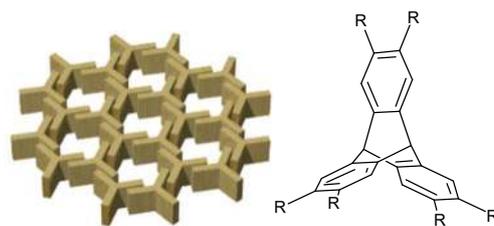
固体中で発現する物性は、結晶構造と深いかかわりがあることが知られている。すなわち、結晶構造から物性を本質的に制御することが可能である。一方で、特定の結晶構造を狙って構築することは至難の業である。

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 π 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一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。

ポスター発表においては、具体的にトリプチセン骨格によるハニカム構造の構築について取り上げる。トリプチセンは三枚の羽を持つプロペラ状の立体的な分子である。この形状を反映し、トリプチセンはハニカム構造に自己集合しうると考えられた。我々は、トリプチセンと p-ベンゾキノン縮環させた分子、p-TT のラジカルアニオン塩や、トリプチセンとフェナジンを縮環させた

分子、Trip-Pz の分子結晶としてハニカム構造を持つ結晶を得ることに成功した。p-TT 塩に関して、結晶構造からバンド計算を行うことによりフラットバンドやディラックコーンを持つことが示唆された。また、Trip-Pz 結晶は、TTF 分子を結晶内に可逆に取り込むことにより、電荷移動錯体の生成量を自在に制御することに成功した。この手法をさらに発展させることにより、フラットバンドヘドローピングが可能になるのではないかと考えている。これらの詳細について発表する予定である。

[1] Y. Shuku, A. Mizuno, R. Ushiroguchi, C. S. Hyun, Y.J. Ryu, B.K. An, J.E. Kwon, S.Y. Park, M. Tsuchiizu, K. Awaga, *Chem. Comm.*, 2018, **54**, 3815 - 3818



ハニカム構造(左)とトリプチセン(右)

PS-22

量子スピンホール絶縁体－強磁性体接合における電荷・電流

東北大学金属材料研究所 ^A,
東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター^B
橋本光 ^A, 野村健太郎 ^{A,B}

Charge and current in quantum spin Hall insulator-ferromagnet junction

^A*Institute for Materials Research, Tohoku University*

^B*Center for Spintronics Research Network, Tohoku University*

Hikaru Hashimoto^A and Kentaro Nomura^{A,B}

Keywords: 量子スピンホール絶縁体, トポロジカル物質, 磁壁, スピントロニクス

トポロジカル物質の一種である量子スピンホール絶縁体 (QSHI) はバルクは絶縁体であるが、試料端には逆向きのスピンを持つ電子がそれぞれ逆向きに運動するヘリカルエッジ状態と呼ばれる特異なエッジ状態が存在する。このヘリカルエッジ状態が磁化と結合することにより、磁化の空間変化が電荷を、時間変化が電流を生じさせることが理論的に提唱されている^[1]。QSHI をタイトバインディングモデルで扱い電荷蓄積とスピン蓄積を数値的に計算し、この現象を考察した。

[1] Qi, X.-L. *et al.*, Nature Phys. 4,273 (2008).

Si の安定構造探索における REMD と MD の比較

東京大学 総合文化研究科 広域科学専攻
松原 和毅 , 福島 孝治

Comparing REMD and MD on searching stable structures of Si
Dept. of Basic Science The University of Tokyo
Kazuki Matsubara and Koji Hukushima

Keywords: 分子動力学法 , レプリカ交換分子動力学法

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が、それは分子動力学 (MD) シミュレーションにおいて計算ステップ数が多くなることを意味する。しかしながら、冷却速度を遅くすることにも限界があり、従来の MD シミュレーションでは安定構造の探索は困難である。図 3 は Si 原子数 64 個でシミュレーションしたときの冷却中のポテンシャルエネルギーの時間変化を表し、冷却中のポテンシャルエネルギーは徐々に小さくなるものの結晶で予想される値 -7072 よりはるかに大きいものとなる。なお、単位は無次元化している。そこで本研究ではレプリカ交換分子動力学 (REMD) を用いて従来の MD よりも安定した Si 構造を見つけられることを示す。

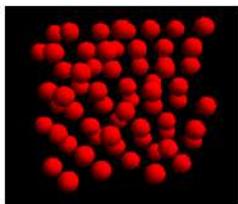


図 1 : Si 結晶

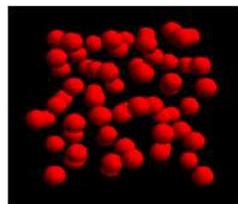


図 2 : アモルファス Si

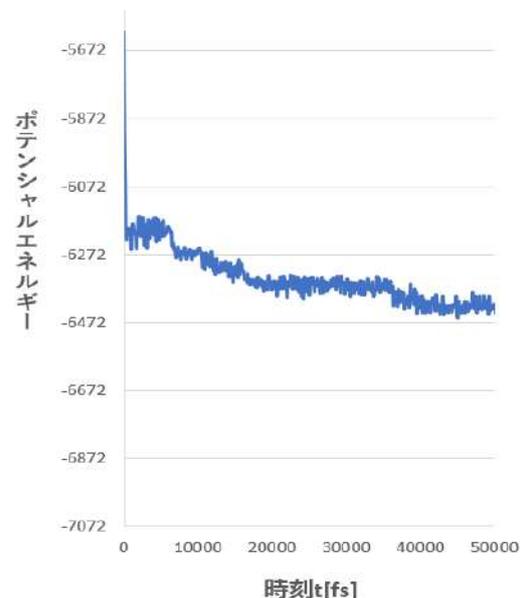


図 3 : Si のポテンシャルエネルギー変化

PS-25

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

PS-26

1T'-MoTe₂ バルク結晶におけるコヒーレントフォノンの観測

筑波大学大学院 数理物質科学研究科 電子・物理工学専攻^A, 産業総合研究所 ナノエレクトロニクス部門^B, 埼玉大学 理工学研究科 物質科学部門^C

福田 拓未^A, 牧野 孝太郎^B, 齊藤 雄太^B, Paul Fons^B, Alexander V. Kolobov^B, 上野 啓司^C, Richarj Mondal^A, 長谷 宗明^A

Keywords :

超短パルスレーザー, コヒーレントフォノン, TMDC, ワイル半金属

近年, 超短パルス光の利用や遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) を含む2次元層状材料は, 興味の対象が物理学の範囲を超え, その魅力がデバイス工学を初めとするエレクトロニクス全体に波及し始めている. TMDCの最も魅力的な性質は豊富な化学組成や結晶構造によって, 半導体, (半)金属, 超伝導に留まらず, トポロジカル絶縁体, Dirac半金属, ワイル半金属を含むキャリアの輸送特性が特異的に高速・高移動度になるトポロジカル相を有することである. この多才とも言えるTMDCの性質は, トポロジカル物性のより深い理解を与えてくれる研究対象となるだけでなく, 加速する情報社会の発展に需要が高い次世代高速相変化デバイスの実現に多大な恩恵をもたらすだろう. 一方でTMDCの極短時間領域におけるキャリアやその輸送特性に関わる格子振動のダイナミクスについてはあまり明らかにされていない.

本研究ではTMDCである1T'-MoTe₂バルク結晶に対してフェムト秒レーザーを用いた時間分解ポンプ・プローブ分光法により, コヒーレントフォノンを観測した. その結果, 室温における実験にも関わらず, 250K以下の低温で安定構造をとるT_d相に特有な層水平対向に振動する低周波音響フォノン (shear phonon mode) をpsスケールの極短時間領域で見出した. この音響フォノンは結晶空間対称性の有無を左右するモードであるため, 空間対称性が破れたワイル半金属相を誘起するのに極めて重要なトリガーである.

「空間対称性スイッチ」と形容しうるこの現象について, 励起光強度依存性, 電子応答の挙動についての考察も行うことによって, より深く議論する.

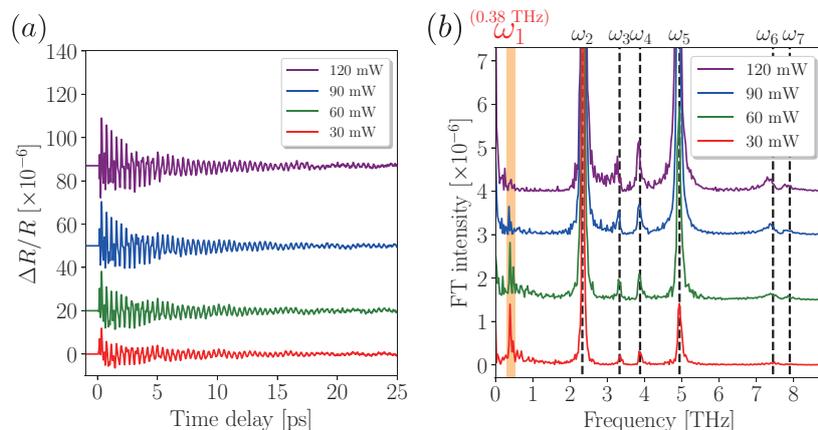


図 1: (a)1T'-MoTe₂ における時間分解反射率変化 $\Delta R/R$ の信号に見られるコヒーレントフォノンの励起光強度依存性. (b) 左図 (a) のフーリエスペクトル.

層状 LiVO_2 における “Goodenough の三量体” の同定

名古屋大学 工学研究科 応用物理学専攻
小島慶太, 片山尚幸, 田村慎也, 澤博

Identification of “Goodenough’s trimers” in layered LiVO_2

Department of Applied Physics, Nagoya University

K. Kojima, N. Katayama, S. Tamura, H. Sawa

Keywords: d 電子系, 軌道自由度, 量体化, 局所構造解析

回折実験から得られるデータには複数の情報が含まれる。このうち、Bragg ピークを取り出して解析するのが一般の構造解析である。Bragg ピークは結晶の並進対称性に基づいて現れるため、解析結果は平均の構造が得られる。一方、局所構造に関するデータは散漫散乱として現れる。散漫散乱を含む回折データに補正を行い、フーリエ変換すると、物質中のある原子から距離 r にある原子の存在確率を表す、二体分布関数 (PDF) が得られる。

今回、この PDF 解析を用いた層状 LiVO_2 の構造解析について報告する。 LiVO_2 は 450K で Valence Bond Solid (VBS) 転移を起こす。VBS 転移は軌道や格子自由度の絡み合いから生じ、基本骨格や電子状態に応じて多彩なクラスターパターンが形成されるため、物性物理や結晶学の興味深い研究対象である。近年では、VBS 状態を化学ドーブなどで融解して現れる超伝導[1]や、VBS 相の近傍において Valence Bond の短距離秩序の出現[2]が報告されており、物性研究者の注目を集めている。 LiVO_2 はこうした VBS 研究の原点ともいえる物質であり、1954 年に Rüdorff と Becker によって発見された[3]。転移に伴う物性の変化など基本物性は早くから明らかになっていたが、VBS 相でどのようなクラスターパターンが実現しているかは謎のままであった。1963 年に Goodenough が対称性の議論に基づいて三量体クラスターの実現を予言[4]したが、構造解析で解明した例はない。一方で、こうした架空の三量体構造が実験的な実証もないまま独り歩きしており、様々な三量体化機構が理論的に議論されているという現状である。実験的に三量体を同定する必要がある。

我々のグループでは LiVO_2 の三量体構造が短距離秩序を有している点を明らかにし、昨年春の物理学会で報告した[5]。従来の X 線回折法で構造同定できないため、PDF 解析法に注目して構造解析を行った。実際の物質においては複数の三量体積層構造がランダムに現れることに着目して、とりうるすべての構造モデルを考慮し、PDF 解析のシミュレーションデータとして用いた。こうして構築されたデータは実際の実験データと良く一致した。これは、 LiVO_2 の基底状態がバナジウムの三量体であることを明確に示している。

[1] S. Pyon *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 053701.

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

[3] W. Rüdorff and H. Becker Zeitschrift für Naturforschung B **9** (1954) 614.

[4] J.B. Goodenough, Magnetism and the chemical bond, Interscience and John Wiley, N.W. 1963, p269.

[5] 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

PS-28

共鳴非弾性 X 線散乱による素励起の観測

東北大学大学院 理学研究科
松林 幸宏

Observation of elementary excitations by Resonant Inelastic
X-ray Scattering
Department of Physics, Tohoku University

Keywords : 共鳴非弾性 X 線散乱, RIXS

近年、第三世代放射光施設の発達によって高輝度かつエネルギー可変な光源が利用できるようになった。この特性を用いて分光実験である共鳴非弾性 X 線散乱 (Resonant Inelastic X-ray Scattering, RIXS) が盛んに行われている。RIXS では、入射 X 線のエネルギー $\hbar\omega_{\text{in}}$ を調節することにより内殻電子を外殻に共鳴的に励起し、X 線を吸収した中間状態を経てこれが緩和することで放出される X 線を測定する。入射前後の X 線のエネルギーと運動量の変化 ($\hbar\Delta\omega, \Delta\mathbf{q}$) は系の電子励起に使われたことを意味するため、RIXS により固体中の素励起を研究することができる。

他にも様々な利点がある一方、RIXS は photon の吸収と放出による二次の光学過程で記述され、スペクトルの起源を明らかにするために理論計算との比較が必須である。理論的にはフェルミの黄金律の二次の過程を見ることで計算することができ、Kramers-Heisenberg 公式で与えられる [1]。

$$I(\Delta\mathbf{q}, \Delta\omega, \omega_{\text{in}}) \propto \sum_f \left| \sum_n \frac{\langle f | \mathcal{D}_{\text{out}}^\dagger | n \rangle \langle n | \mathcal{D}_{\text{in}} | g \rangle}{E_{\text{gs}} + \hbar\omega_{\text{in}} - E_n - i\Gamma} \right|^2 \delta(E_{\text{gs}} - E_{\text{fs}} + \hbar\Delta\omega) \quad (1)$$

$\mathcal{D}_{\text{in}}(\mathcal{D}_{\text{out}}^\dagger)$ は X 線の吸収 (放出) による電子系の励起 (緩和) を表す双極子遷移演算子である。本発表では 1 次元 Mott 絶縁体を例に取り、half-filled の Hubbard 模型に対して Cu の K 吸収端を利用した indirect RIXS[2] を紹介する。

参考文献

- [1] Luuk J. P. Ament, Michel van Veenendaal, Thomas P. Devereaux, John P. Hill, and Jeroen van den Brink. Resonant inelastic x-ray scattering studies of elementary excitations. *Rev. Mod. Phys.*, 83:705–767, Jun 2011.
- [2] K. Tsutsui, T. Tohyama, and S. Maekawa. Resonant inelastic x-ray scattering in one-dimensional copper oxides. *Phys. Rev. B*, 61:7180–7182, Mar 2000.

金属反強磁性体 Ce_3TiBi_5 における電流誘起磁化現象

島根大院自然^A, 島根大研究支援セ^B, 兵県大院物質^C
篠崎真碩^A, 本山岳^A, 武藤哲也^A, 西郡至誠^B, 山口明^C

Current induced magnetization on metallic antiferromagnet Ce_3TiBi_5

^ADept. Natural Science, Shimane Univ., ^BICSR, Shimane Univ.,

^CDept. Material Science, Univ. of Hyogo

M. Shinozaki^A, G. Motoyama^A, T. Mutou^A, S. Nishigori^B, A. Yamaguchi^C

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^[1,2].

Ce_3TiBi_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^[3]. 拡張多極子の分類に従えば, Ce_3TiBi_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 Ce_3TiBi_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 La_3TiBi_5 を用いた測定を行っており, 併せて報告する.

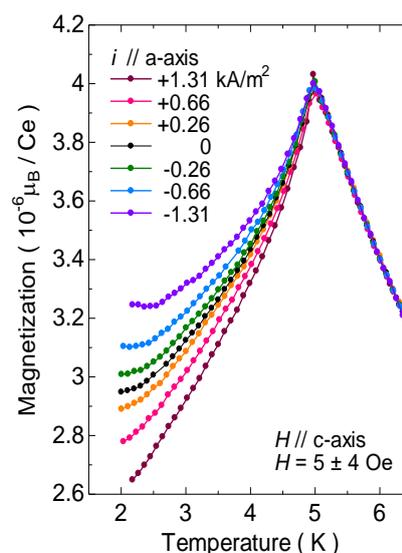


Fig. 1 電流印加下における Ce_3TiBi_5 の磁化の温度依存性

[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).

α -(BEDT-TTF)₂I₃ の光誘起トポロジカル相転移東京大学理学系研究科^A, 早稲田大学先進理工学研究科^B北山圭亮^A, 望月維人^BPhoto-Induced Topological Phase Transition of
 α -(BEDT-TTF)₂I₃*University of Tokyo^A, Waseda University^B*Keisuke Kitayama^A and Masahito Mochizuki^BKeywords : フロケ理論、 α -(BEDT-TTF)₂I₃

近年、光誘起相転移が注目を集めている。特に円偏光レーザーを照射したグラフェンがトポロジカル絶縁体状態となることをフロケ理論を用いて理論的に示されて以来 [1], フロケ理論を用いたトポロジカル相転移の理論研究が精力的に行われている。その研究はフロケトポロジカル絶縁体の分類理論からスピントロニクス分野への応用, さらには実験でレーザー照射したグラフェンの異常ホール効果を確認した研究など多岐にわたる。

我々は有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ のバンドに傾いた Dirac Cone が現れる [2] ことに着目し, 円偏光レーザーを照射するとトポロジカル絶縁体になりうることを解明した。具体的には α -(BEDT-TTF)₂I₃ の強束縛模型から出発し, 円偏光レーザーを照射した影響はパイエルズ位相をトランスファー積分に掛けることで考慮した。このハミルトニアンは時間に周期的なので, フロケ理論によると十分高周波の円偏光レーザーにおいては静的な有効ハミルトニアンを用いて解析することができる。この有効ハミルトニアンを解析した結果, 図1のように Dirac Cone にギャップが生じ, さらに各バンドは非ゼロのチャーン数となる。本研究によりバルク物質で Dirac Cone が存在する数少ない物質でフロケチャーン絶縁体の構築したことで実験の幅が広がることが期待される。

本ポスターではフロケ理論から得られる有効ハミルトニアンの物理的意味などの基本的な内容から本研究の課題点まで議論する予定である。

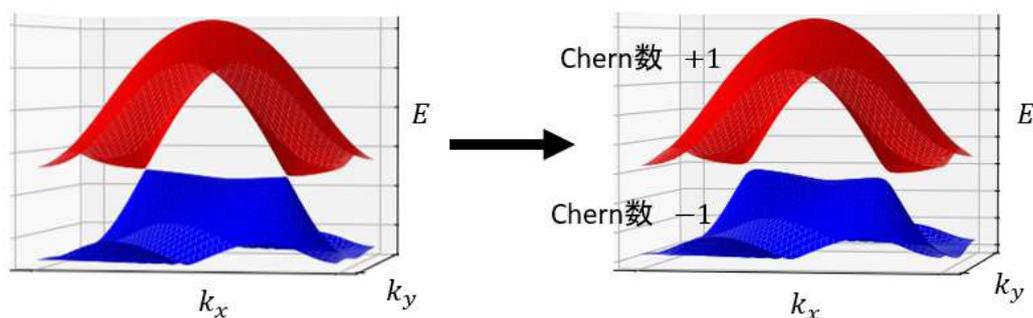


図 1: レーザー照射前 (左) と照射後 (右) の α -(BEDT-TTF)₂I₃ の 3,4 番目のバンド図。

[1] T. Oka, H. Aoki, Phys. Rev. B **79**, 081406(R) (2009).

[2] K. Kajita, Y. Nishio, and N. Tajima, J. Phys. Soc. Jpn **83**, 072002, (2014).

PS-31

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に、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 τ 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、 ϵ_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 τ 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。

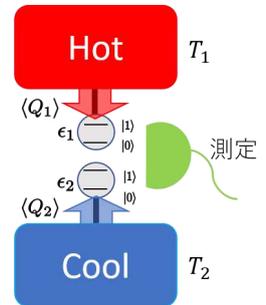


図 1: 設定

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

PS-32

NV センターを有するダイヤモンドの非線形光学効果の研究

筑波大学大学院^A, 北陸先端科学技術大学院大学^B
本嶋 麻利^A, 貝沼雄太^B, 安東秀^B, 重川秀実^A, 長谷宗明^A

Keywords : 非線形光学効果, ダイヤモンド, レーザー, 超高速科学, 量子コンピューティング, NV センター

ダイヤモンド中には、点欠陥である NV センター (窒素-空孔欠陥) が存在する。この NV センターの光学的および磁氣的性質が、電場・磁場の量子センシングや量子コンピューティングなどの量子情報技術に応用されうるとして注目を集めている。

NV センターの準位は、純粋なダイヤモンドのバンドギャップ ($E_g=5.5\text{eV}$) 間に存在している。緑色レーザーにより NV センターの準位を励起することで、蛍光を観測することができる。その蛍光量は、励起状態と基底状態との間の光遷移経路を調整するマイクロ波による照射によって制御することができる。その特徴を利用し、量子情報技術に応用するために現在研究が進められている。

これまでに、主に、線形光学領域について研究が進められてきたが、超短パルスレーザーを用いると、非線形光学領域についての現象理解が可能となり、ダイヤモンドの光学特性についてさらに調べることができる。

最近では、Almeida 氏が、高純度ダイヤモンドの非線形光学効果について報告した [1]。純粋なダイヤモンドでは、バンドギャップ間に欠陥準位が存在しないため、 $0.83 - 4.77\text{ eV}$ の光子エネルギーに対し、非線形屈折と非線形吸収の測定係数は、 $E=E_g/2$ 付近において増強された。

純粋なダイヤモンドの非線形光学効果についてはいくつか研究がなされてきた [2,3] が、非線形光学現象に対する NV センターの効果については、未だ調べられていない。

そこで我々は、 800nm のフェムト秒パルスレーザーを用い、ダイヤモンドの NV センターによる非線形光学効果 (光カー効果、2光子吸収) についての研究を行なった。これら 2つの非線形光学効果は、NV センターのドーピングにより増強されることが分かった。

[1] J. M. P. Almeida *et al.*, *Sci. Rep.* Vol. **7**, 14320 (2017). [2] J. I. Dadap *et al.*, *Opt. Lett.* Vol. **16**, 499–501 (1991). [3] F. Trojaneck *et al.*, *Opt. Exp.* Vol. **18**, 1349 (2010).

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^A, 東工大元素戦略研究センター^B

横溝和樹^A, 村上修一^{A,B}

Bloch Band Theory for Non-Hermitian Systems

^A*Dept. of Phys. Tokyo Tech.*, ^B*TIES. Tokyo Tech*

K. Yokomizo^A and S. Murakami^{A,B}

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_β 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_β 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_β 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_β 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_β 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

PS-34

グラファイトの磁気浮上と熱駆動運動の理論的解明

大阪大学^A,

藤本大仁^A, 越野幹人^A

Diamagnetic levitation and thermal gradient driven motion of graphite

^ADept. of phys., Osaka Univ.

Manato Fujimoto^A and Mikito Koshino^A

Keywords:理論系, グラファイト, 反磁性, 熱駆動

グラフェンの積層物質であるグラファイトは常温常圧で最も大きな反磁性を示す物質である。その反磁性はグラフェンで見られるディラックコーンに由来する。近年、チェッカーボード状に配置されたネオジウム磁石の上で、グラファイトが磁気浮上し、光の照射により帯磁率の温度変化し、駆動されることが観測された¹。(図1)

そこで本研究では、これらの磁気浮上現象と駆動現象の理論的解明を行なった。まずはAB積層・ランダム積層²という積層方法の異なる二つのグラファイト(図2)に対して、軌道反磁性帯磁率と磁気浮上距離を有限温度で計算した。AB積層に関して、本研究の帯磁率及び磁気浮上距離の計算結果が、実験結果を定量的に説明した。ランダム積層に関しては、グラファイトの温度に比例した浮上距離を示すことを提案した。さらに、浮上距離を最大にする磁石のグリッドサイズと、その時の浮上距離が反磁性帯磁率に比例することも提案した。次に光照射による温度勾配によりグラファイトが温度の高い領域の方向に引き寄せられていく原因及びその力の大きさと反磁性帯磁率の大きさの関係を明らかにした。

[1] M. Kobayashi, J. Abe, Am. Chem. Soc. 134, 20593 (2012).

[2] Y. Ominato M. Koshino, Phys. Rev. B 87, 115433 (2013).

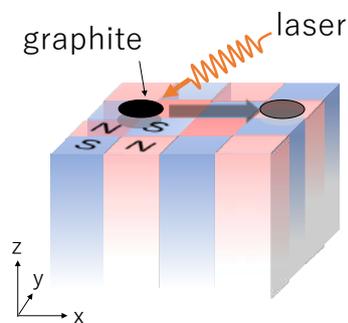


Fig. 1. チェッカーボード状に配置された磁石の上での磁気浮上と光照射による熱駆動

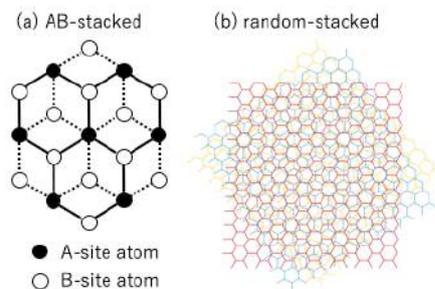


Fig. 2. 格子構造 (a) AB 積層グラファイト (b) ランダム積層グラファイト

PS-35

量子系における局所的摂動の伝搬

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
吉永 敦紀

Propagation of local disturbance in quantum system
Department of Physics, Graduate school of Science, The University of Tokyo
Atsuki Yoshinaga

Keywords: 量子系ダイナミクス、情報の伝搬速度

量子多体系に局所的に加えた攪乱操作の影響は、どのように系全体に広がるのだろうか。ここでは量子多体系として格子上のスピン系や粒子系を考える。例えば攪乱操作として局所物理量の測定を考えると、量子系特有のエンタングルメントの存在によって、空間的に離れた領域の状態は一般に瞬時に変化し得る。しかし例えばポテンシャルを局所的に変化させるような操作に対しては、遠方にその影響が伝わるには有限の時間が必要となることを、Lieb-Robinson bound [1] と呼ばれる不等式を用いて示すことができる。

本研究では、量子系の定常状態に局所的なユニタリ操作を加えた後のダイナミクスに着目する。操作後のダイナミクスは一般に初期状態・ハミルトニアン・ユニタリ操作に非自明に依存するが、操作の影響の伝搬速度や遠方における振る舞いについては、系のクラスに応じてある程度普遍的な予言が行えると期待できる。例えば、量子可積分系などのように保存量が多く古典系に近い系であれば拡散的な振る舞いが見られると予想できる。また、伝搬速度についても、準粒子描像が成り立つ状況では分散関係から群速度による見積もりが行えるだろう。

本発表では、特に速度と遠方での振る舞いに関して、1次元格子上のフェルミオン系に対する解析結果と進行中の研究について紹介し（図1）、議論したい。

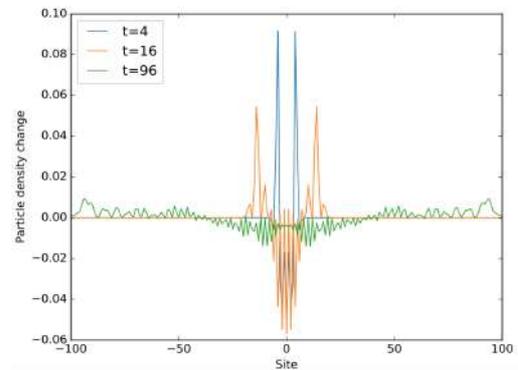


図1：1次元 tight-binding 模型の基底状態に局所的撃力を加えた後の各サイトの粒子数変化

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

1 次元交互積層型電荷移動錯体の熱力学的性質に関する理論的研究

奈良女子大学大学院 人間文化研究科 数物科学専攻 凝縮系の物理学研究室

上平美紗希

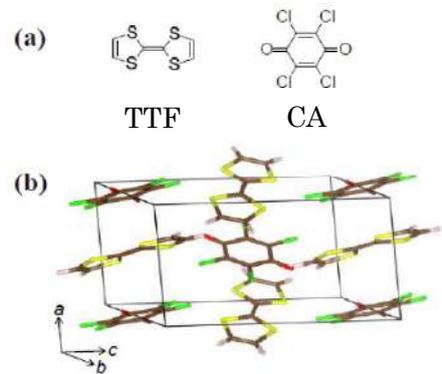
Theoretical study on thermodynamic properties of
one-dimensional mixed-stacked charge transfer complexes

Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University

Misaki Kamidaira

KeyWords: 中性イオン性転移、1次元拡張ハバード模型、転送行列法

1次元交互積層型電荷移動錯体は、電子を放出して陽イオン化しやすい電子供与性の分子(ドナー)と電子を受け取って陰イオン化しやすい電子受容性の分子(アクセプター)が交互に積層して1次元的な鎖をなしている物質である。代表的な1次元交互積層型電荷移動錯体であるTTF-CAの構造は右の図のようになっている。この物質は温度や圧力を変化させることで物性が変化する。例をあげると、ファン・デル・ワールス結晶的な中性結晶から、構成分子の大部分がイオン化したようなイオン結晶へと相転移する現象、いわゆる中性イオン性転移がある[1]。このような点から、実験・理論の両分野で注目され続けている。



1次元交互積層型電荷移動錯体の性質は、格子振動を含んだ1次元拡張ハバード模型、

$$H = H_e + H_{e-ph} + H_{ph}$$

$$H_e = -t \sum_{j,\sigma} (c_{j+1,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + h.c.) + \Delta \sum_{j,\sigma} (-1)^j n_{j,\sigma} \quad H_{e-ph} = g_p \sum_{j,\sigma} u_j (-1)^j (c_{j+1,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + h.c.)$$

$$+ U \sum_j n_{j,\uparrow} n_{j,\downarrow} + V \sum_j n_j n_{j+1} \quad H_{ph} = \frac{K_{ph}}{2} \sum_j u_j^2$$

によって記述される。ここで、 H_e は鎖内の電子移動を表す1次元拡張ハバード模型であり、 H_{e-ph} は電子格子相互作用、 H_{ph} は格子振動を表す。

近年、このハミルトニアンにボソン化を適用して得られた位相ハミルトニアンを用いて、基底状態の相図とそこから多彩な低エネルギー励起が詳細に検討された[2]。本研究では、このような励起の特徴は熱力学的性質に反映されると考え、先行研究で導出された位相ハミルトニアンに対して転送行列法[3]を適用し、熱力学量の中でも特に比熱の温度依存性に着目して議論する。

[1]総説として、例えば十倉好紀、永長直人：固体物理 **21**, 779 (1986)

[2]M. Tsuchiizu, H. Yoshioka, H. Seo: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 104705 (2016)

[3]D. J. Scalapino, M. Sears, and R. A. Ferrell: Phys. Rev. B **6**, 3409 (1972)

熱伝導との類似性に基づく乱流ゆらぎの定式化

京大理

田之上智宏

Analogies between rare fluctuations in turbulence and heat
conduction system*Department of Physics, Kyoto University*

Tomohiro Tanogami

Keywords : 乱流, 熱伝導, 巨視的ゆらぎの理論, turbulence, heat con-
duction, macroscopic fluctuation theory

十分発達した乱流においては、運動エネルギーが大スケールから小スケールへ順繰りに輸送されるエネルギーカスケード現象に加え、速度場の大域的スケール不変性の破れ—間欠性—が系のミクロな詳細（散逸の仕方・渦が量子的か古典的か）とマクロな詳細（外力の機構・境界条件）によらず普遍的に生じる [1]。これは言い換えれば、乱流中で空間的・時間的に稀に起こる速度場の激しいゆらぎの生じ方が系のミクロ・マクロ詳細によらず普遍的ということだ。この驚くべき普遍性がいかにして生じるのか、という問題は Kolmogorov や Landau 以来半世紀以上にわたり活発に研究されてきた乱流屈指の難問である。具体的には、間欠性は波数 k でのエネルギーカレント $\epsilon(k)$ の q 次モーメント $\langle \epsilon^q(k) \rangle \sim k^{-\tau(q)}$ の指数 $\tau(q)$ で特徴づけられる。したがって、カレントゆらぎが従う普遍的な統計則を見出し、指数 $\tau(q)$ の関数形を予言することが目標となる。間欠性を説明すべくこれまで多数の現象論・モデルが提案されてきたものの、それらは総じて (i) アドホックな仮定に基づき、(ii) 指数 $\tau(q)$ が満たすべき厳密不等式を破る、といった問題点がある。

一方、熱伝導においては熱が高温熱浴から低温熱浴へ順繰りに輸送され、そのカレントゆらぎの時空間プロファイルは macroscopic fluctuation theory によって有効かつ普遍的に記述できることが知られている [2]。本研究では、乱流と熱伝導はともにエネルギーカレントによって維持された非平衡定常状態であるという類似性に着目し、熱伝導における macroscopic fluctuation theory を乱流に援用することで間欠性を特徴づけることを目指した。その結果、大偏差理論に基づく単純かつ自然な仮定のもと、実験結果とコンシステントな間欠性の指数 $\tau(q)$ の関数形を得た (図 1)。

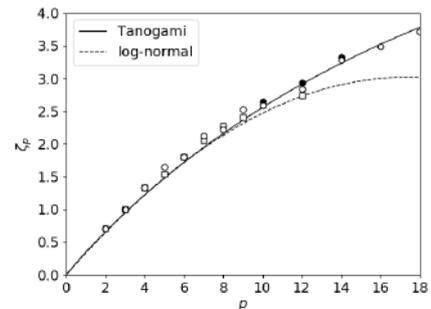


図 1: 2 点 p 次縦速度相関関数 $\langle [(\mathbf{v}(\mathbf{r} + \boldsymbol{\ell}) - \mathbf{v}(\mathbf{r})) \cdot \hat{\boldsymbol{\ell}}]^p \rangle \sim \ell^{\zeta(p)}$ の指数 $\zeta(p)$ の p 依存性。 $\tau(q)$ とは $\zeta(p) = p/3 + \tau(p/3)$ という関係にある。実線: 本研究; 点線: log-normal モデル [1]; 点: 実験データ [3]。

[1] U. Frisch, *turbulence* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).

[2] L. Bertini, A. De Sole, D. Gabrielli, G. Jona-Lasinio, and C. Landim, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 593 (2015).

[3] F. Anselmet, Y. Gagne, E. J. Hopfinger, and R. Antonia, *J. Fluid Mech.* **140**, 63 (1984).

多層固相エピタキシー法を用いた $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ エピタキシャル薄膜の合成東北大院理化^A, 東北大 WPI-AIMR and Core Research Cluster^B山本 裕貴^A、河底 秀幸^A、福村 知昭^{A,B} $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ epitaxial thin films grown by multilayer solid-phase epitaxy^ADept. of Chem., Tohoku Univ. ^BWPI-AIMR and Core Research Cluster, Tohoku Univ.Yuki Yamamoto^A, Hideyuki Kawasoko^A and Tomoteru Fukumura^{A,B}**Keywords:** 金属絶縁体転移、エピタキシャル薄膜、Sb 正方格子、格子歪み

Sb 正方格子と La_2O_2 層からなる層状物質 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ では、非閉殻電子配置の Sb^{2-} ($5p^5$) に由来した金属状態が期待される。しかし、粉末多結晶では、歪んだ Sb 正方格子における Sb の二量体形成により絶縁体となる [1,2]。その一方で、第一原理計算では、Sb 正方格子の歪みの緩和による金属状態の実現が予想されている [3]。 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ エピタキシャル薄膜において基板からのエピタキシャル応力により Sb 正方格子の歪みを制御できれば、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ における金属絶縁体転移の実現を期待できる。本研究では、前駆体に多層膜を用いる多層固相エピタキシー法により、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ エピタキシャル薄膜の合成に初めて成功したので報告する。

マグネトロンスパッタ法により、La、 La_2O_3 、Sb の 3 つのターゲットを用い、室温で MgO (001) 単結晶基板の上に前駆体多層膜を製膜した。前駆体多層膜の積層構造は $[\text{La}_2\text{O}_3$ (0.08 nm) / La (5 nm) / La_2O_3 (0.08 nm) / Sb (3 nm)]₂₀ (薄膜 A、仕込組成: $\text{La}_2\text{O}_{0.5}\text{Sb}_{1.3}$)、 $[\text{La}_2\text{O}_3$ (0.8 nm) / La (51 nm) / La_2O_3 (0.8 nm) / Sb (30 nm)]₂ (薄膜 B、 $\text{La}_2\text{O}_{0.5}\text{Sb}_{1.3}$)、 $[\text{La}_2\text{O}_3$ (2.4 nm) / La (40 nm) / La_2O_3 (2.4 nm) / Sb (30 nm)]₂ (薄膜 C、 $\text{La}_2\text{O}_{1.3}\text{Sb}_{1.1}$) とした。得られた前駆体多層膜をアルゴン雰囲気中 850 °C で加熱し、固相エピタキシャル成長を行った。各薄膜の X 線回折パターンを図 1 に示す。多層膜全体の厚みと仕込組成を一定に保ち、多層膜各層の厚みを増すことで $\text{La}_2\text{O}_2\text{Sb}$ 相のエピタキシャル成長が実現した (薄膜 A、薄膜 B)。また、多層膜中の酸素比率を増加させ、アンチモン比率を減少させると、不純物相の LaSb 相の生成が大きく抑制された (薄膜 B、薄膜 C)。当日は合成した薄膜の電気輸送特性についても議論する。

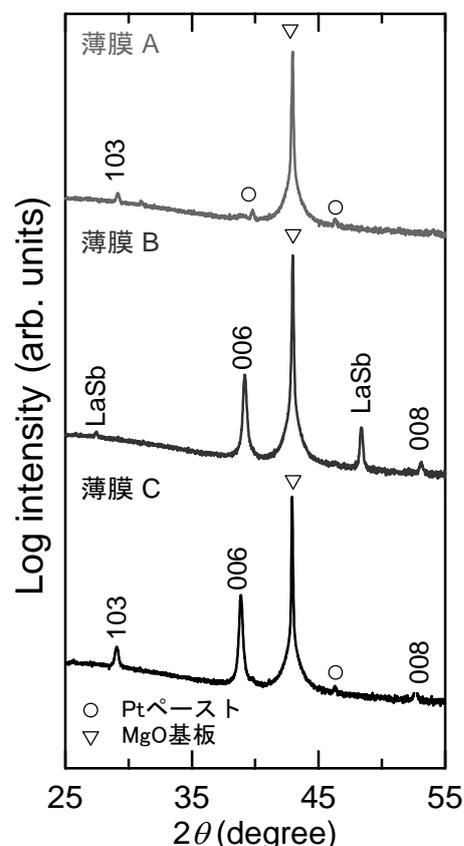
[1] J. Nuss *et al.*, *J Alloys Comp.* {480}, 57 (2009).[2] P. L. Wang *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* {134}, 1426 (2012).[3] H. Kim *et al.*, *Phys. Rev. B* {93}, 125116 (2016).

図 1. 合成した薄膜の X 線回折パターン。

PS-39

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^A

宮本拓実^A, 今井正幸^A, 内田就也^A

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

Department of Physics, Tohoku University^A

Takumi Miyamoto^A and Masayuki Imai^A, Nariya Uchida^A

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).

PS-41

核磁気共鳴画像法(MRI)の物理学的原理

名大院理,
國枝和輝

What is MRI?

Department physics of Nagoya University
Kazuki Kunieda

Keywords: MRI,NMR,核磁気共鳴法,T1,T2

この学校に参加されている方が核磁気共鳴法(NMR)と聞いて思い出されるのはやはり強相関電子系物質における研究手段であるということだろう。しかし、今回のポスターセッションではその医学的応用である MRI(核磁気共鳴画像法) を紹介する。

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、MRI は水素原子に共鳴現象を起こす。MRI では主に、強相関電子系における測定では物質の磁気揺らぎを説明する核磁気緩和率(T1,T2)という物理量を測定することとで画像診断を行う。ポスターセッションでは MRI のその物理的な原理や特性について説明する。

なお、ポスターセッションでは紙面の都合上 NMR の原理を詳しく説明することができないので、興味を持たれた方はぜひ分科会での発表をお聞きください。

- [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] <https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-Lecture-Note.pdf>

新規鉄系超伝導体 LaFe_2As_2 の理論的考察米国海軍研究所^A, 岡山大学 異分野基礎科学研究所^BIgor I. Mazin^A, 清水真^B, 竹森那由多^B, Harald O. Jeschke^B
The iron-based superconductor LaFe_2As_2 : how overdoped is it?*U.S. NRL^A, RIIS, Okayama University^B*I. I. Mazin^A, M. Shimizu^B, N. Takemori^B and H. O. Jeschke^B**Keywords** : 第一原理計算, d 電子系, 鉄系超伝導体

2008年に発見された鉄系超伝導体は、他の非従来型超伝導体とは異なる新奇な物性を示す物質群として注目を集めている。特に、Fermi面が複数の軌道成分から成るマルチバンド系であり、この軌道自由度が関連することで複数の超伝導対称性 (s_{\pm} 波や d 波) が拮抗することが初期の段階から示唆された [1]。実験では、圧力やキャリアドーピング量を制御することでFermi面のトポロジーが変化し、超伝導対称性や超伝導転移温度が劇的に変化する。我々のグループでは、このような電子構造の影響に着目し、鉄系超伝導体の理論研究を行なっている [2]。

新規鉄系超伝導体である LaFe_2As_2 [3] は、他の鉄系超伝導体とは異なる興味深い性質を持つ。まず、2つの異なる結晶構造を持つ相が共存しており、一方は超伝導を示すがもう一方は超伝導を示さない。さらには、この超伝導は、組成式から考えると鉄1原子あたり0.5個の電子がドーピングされた状態で実現していることになるが、これは従来の鉄系超伝導体が超伝導を示すドーピング領域からは大きく外れているのである。本研究 [4] では、 LaFe_2As_2 の電子構造を第一原理的に計算し、結果として LaFe_2As_2 の有する目新しい特徴も既存の理論で説明できることを示した。

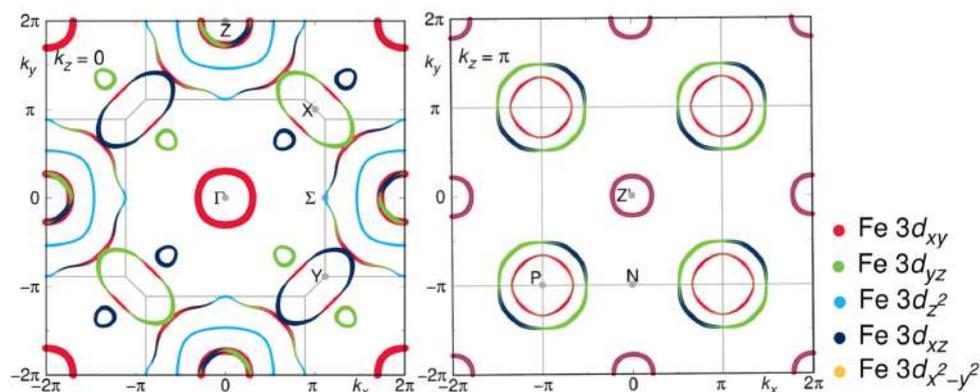


図 1: LaFe_2As_2 の Fermi 面 [4]。左図は $k_z = 0$ での断面、右図は $k_z = \pi$ での断面。

- [1] K. Kuroki *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 224511 (2009).
 [2] M. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 137001 (2018).
 [3] A. Iyo *et al.*, J. Phys. Chem. Lett. **10**, 1018 (2019).
 [4] I. I. Mazin *et al.*, arXiv:1905.06190 (2019).

PS-43

多様な集団がみせる緩和応答

早大理工
多賀圭理

Relaxation response of various group
Waseda Univ.
Keisuke TAGA

Keywords : 社会系, 緩和応答, Social science, Relaxation response

誘電体における誘電応答のような、ある入力に対して系の応答が緩和的に起こるものを緩和応答と呼ぶ。特に系が平衡状態に近く、系の構成要素が一様な場合、すなわち応答が線型に近似できて、かつ応答時間が単一な場合はデバイ型緩和と呼ばれ、入力に対する応答は

$$x(t) = x(0)e^{-\frac{t}{\gamma}} + \int_0^t d\tau e^{-\frac{t-\tau}{\gamma}} f(\tau) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 x は入力に対する応答、 γ は応答時間、 $f(t)$ は時刻 t における入力である。

さて本研究では人間社会が、ある入力に対してどのような応答をするかを考察する。上記の緩和応答の議論は、系が平衡状態近傍にあることを前提としているが、われわれの社会も、個々人の生活の流れが一日の中で目まぐるしく移り変わっていても、一週間程度の期間を考えれば大体同じような暮らしが繰り返されており、多少の変化はあっても社会全体というマクロな視点から見れば定常的な状態の近傍で変化しているとみなせるのではないかと考えられる。実際 [1,2] によると、映画の収益に対してデバイ緩和で説明されるような、ステップ入力に対する指数関数的な応答が人間社会においてもみられている。その一方で [1] において、部分系に対してはべき的な応答が報告されている。

ポスター発表では、SNS におけるステップ入力に対する応答を調べ、上記のデバイ緩和では説明できないような応答を集団がしうることを示す。また、社会が平衡状態近傍にあるという仮定の下で、SNS において見られた応答を説明することができるようなモデルの構築を目指し、これについて議論したい。

[1] R. K. Pan and S. Sinha, *New J. Phys.*, 12, 115004, (2010)

[2] K. Yamamoto, *Europhys. Lett.*, 108, 68004, (2014)

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^A, JST さきがけ^B

図司陽平^A, 竹内一将^{AB}

3D observation of defect dynamics in nematic liquid crystals

^A*Dept. of Phys., Univ. of Tokyo*, ^B*JST PRESTO*

Yohei Zushi^A and Kazumasa A. Takeuchi^{AB}

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。

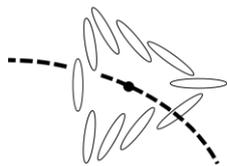


図1 液晶中の位相欠陥

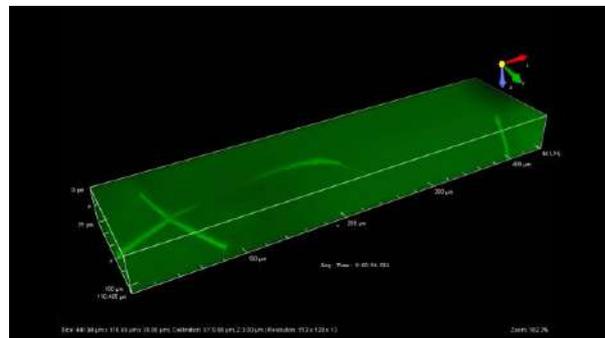
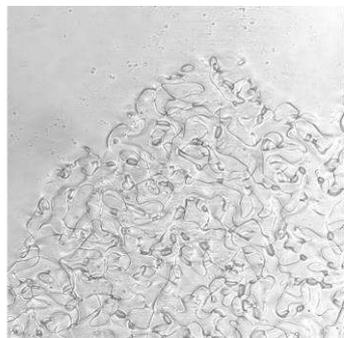


図2 蛍光イメージングで可視化した3次元欠陥

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

強相関電子系における高次高調波発生

東北大理

今井 渉平, 小野 淳, 石原 純夫

High-harmonic generation in a strongly correlated electron system

Dept. of Phys., Tohoku Univ.

S. Imai, A. Ono, and S. Ishihara

Keywords: 強相関系, 光物性, 超高速現象

近年の高強度レーザー技術の発展に伴い、物質を強い非平衡状態へ励起し駆動することが可能となってきた。強電場下における特徴的な光学現象の一つとして、高次高調波発生が原子ガスや半導体を中心として盛んに研究されている[1, 2]。高次高調波発生は入射光の周波数の数十倍の高調波が放射され、また実時間においてはアト秒パルス列の発生に対応し、高エネルギー・超高速現象のフロンティアと言える。一方強相関系においては、相互作用の高いエネルギースケールを反映した超高速応答や相競合による光誘起相転移などの特異な光学応答が知られている。そのため、高次高調波発生においても電子相関効果が本質的な役割を果たすものと期待されるが、その理論解析は限られている[3]。

本研究では、強相関系特有の相競合を示す理論模型を用いて高次高調波発生の数値解析を行った[4]。ここでは、ダイマー・モット絶縁相や電荷秩序相を発現する分子二量体構造を持つ低次元有機化合物を念頭に置き、その有効模型の実時間ダイナミクスの解析を行った。解析には、厳密対角化法と infinite TEBD 法を用いた。数値計算の結果、下図に示すように電荷秩序相において高次高調波発生が確認された。発表では、電子間相互作用や多体基底状態の性質が高次高調波発生に与える影響について報告する。

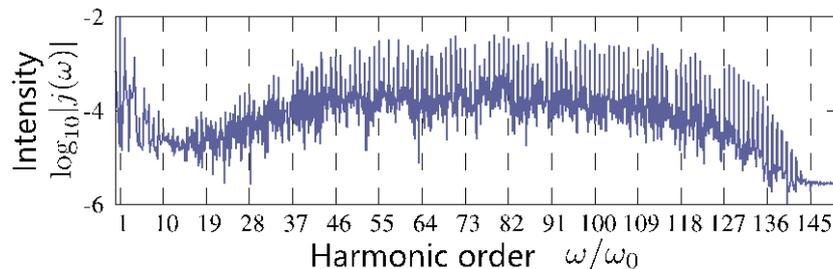


図 1: 電荷秩序相における高次高調波スペクトル

- [1] F. Krausz and M. Ivanov, *Rev. Mod. Phys.* **67**, 813 (2014).
- [2] S. Ghimire and D. A. Reis, *Nat. Phys.* **15**, 10 (2019).
- [3] R. Silva, *et. al.*, *Nat. Photonics* **12**, 266 (2018).
- [4] S. Imai, A. Ono, and S. Ishihara (in preparation).

PS-47

ベイズ学習による格子タンパク質デザイン

名大情報^A, 名大工^B

高橋智栄^A, 千見寺浄慈^B, 時田恵一郎^A

Title

Graduate School of Informatics, Nagoya University^A,

Graduate School of Engineering, Nagoya University^B

Tomoei Takahashi^A, George Chikenji^B and Kei Tokita^A

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） σ 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 Ξ 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、縮退した解を出すケースが多い。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).

EuSnP のドハース・ファンアルフエン効果と磁性

琉球大院理工, 東北大金研^A, 阪大低温セ^B, 信州大理^C,
東大物性研^D, 神戸大院理^E, 琉球大理^F

伊覇 航, 松田 進弥, 本多 史憲^A, 竹内 徹也^B, 中島 美帆^C, 天児 寧^C,
郷地 順^D, 上床 美也^D, 播磨 尚朝^E, 辺土 正人^F, 仲間 隆男^F, 大貫 惇睦^F
de Haas-van Alphen Effect and Magnetism in EuSnP

Grad. Sch. of Eng. and Sci., Univ. of the Ryukyus, ^AInst. for Material Research, Tohoku Univ.,
^BLow Temperature Center, Osaka Univ., ^CFac. of Sci., Shinshu Univ., ^DISSP, Univ. of Tokyo,
^EGrad. Sch. of Sci., Kobe Univ., ^FFac. of Sci., Univ. of the Ryukyus

W. Iha, S. Matsuda, F. Honda^A, T. Takeuchi^B, M. Nakashima^C, Y. Amako^C,
J. Gouchi^D, Y. Uwatoko^D, H. Harima^E, M. Hedo^F, T. Nakama^F, and Y. Ōnuki^F

Keywords : de Haas - van Alphen 効果, フェルミ面, 圧力, 磁性

正方晶構造を持つ EuSnP はネール点 $T_N = 21$ K の反強磁性体であり, 1 次に近いシャープな相転移に特徴がある [1, 2]. 本研究ではこれまでの物性を確認し, 新たにドハース・ファンアルフエン (dHvA) 効果と圧力下での電気抵抗測定を行ったので, それらの実験結果を報告する. 図 1 は正方晶の [001] (c 軸) 方向に磁場を加えたときの dHvA 振動とそのフーリエスペクトルである. 主要なフェルミ面はシリンダー状のフェルミ面 α (α') であることが分かった.

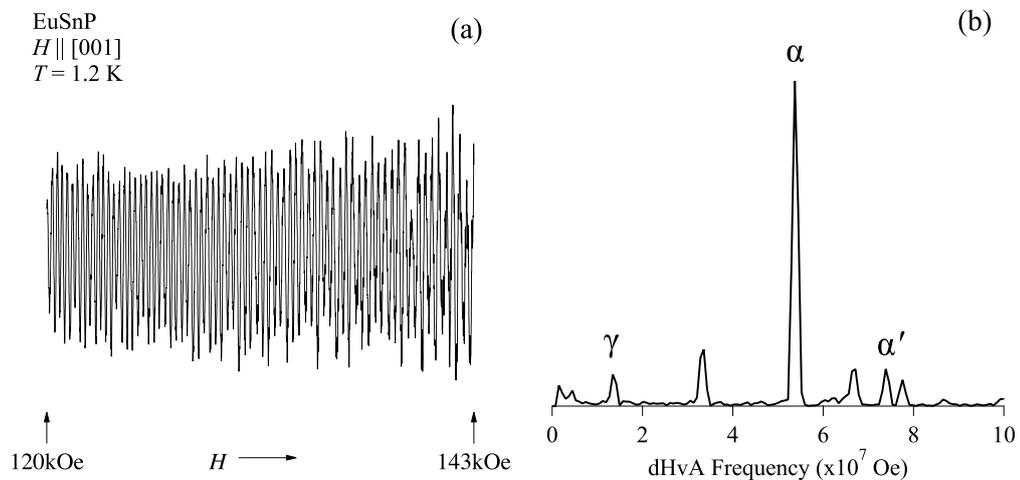


図 1 EuSnP の dHvA 振動とフーリエスペクトル

- [1] A. C. Payne *et al.*, J. Alloys and Compd. **338**, 229 (2002).
[2] T. Fujiwara *et al.*, Physica B **378-380**, 1122 (2006).

PS-49

フラストレートした梯子型横磁場 Ising 模型の 実空間くりこみ群解析

東工大理^A, 東工大科学技術創成研究院^B, 南カリフォルニア大^C
高田珠武己^A, 西森秀稔^B, Daniel A. Lidar^C

Real-space renormalization group analysis of the frustrated
Ising ladder in a transverse field

*Dept. of Phys., Tokyo Tech^A,
Institute of Innovative Research, Tokyo Tech^B,
University of Southern California^C*

Kabuki Takada^A, Hidetoshi Nishimori^B, and Daniel A. Lidar^C

Keywords: 相転移, くりこみ群, Ising 模型, ダイマー模型, 量子アニーリング, phase transition, renormalization group, Ising model, dimer model, quantum annealing

横磁場 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た上で、Ising 模型に横磁場を加えて徐々に減らすことで、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。Ising 模型にかけた横磁場を減らしている途中に 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。

フラストレートした梯子型横磁場 Ising 模型は、フラストレーションが大きな極限（ダイマー極限）で量子ダイマー模型と等価となり、1 次相転移することが数値対角化から知られている [2]。本講演ではこの梯子型スピン系のダイマー極限における量子相転移をより詳しく調べるため、実空間くりこみ群解析を行う。通常の実空間くりこみ群解析では、格子を数サイトごとのブロックに分けた後ブロック内 Hamiltonian の低エネルギー空間に状態空間を射影することで粗視化を行うが [3]、ダイマー極限ではブロック間相互作用が強すぎるため、この方法では低エネルギー空間への射影演算子を正しく求められない。

そこで我々は、格子を長さ 3 ごとのブロックに分けた後、ダイマー極限で低エネルギーとなるような変分状態からなる射影演算子を構成した。この射影演算子を用いたくりこみ群変換を繰り返して固定点周りの系の振る舞いを調べたところ、数値対角化の結果 [2] と近い相転移点の値が得られた（我々の手法で求めた相転移点における横磁場の値は数値対角化による値の約 1.2 倍）。また、この相転移が 1 次であることを裏付ける結果として、梯子下段の縦磁場のスケール指数が系の次元に等しい 1 であることがわかった。

今後の課題として、横磁場以外の量子ゆらぎを用いることで今回の系の 1 次相転移を避けられるのかを調べる必要がある。

[1] T. Kadowaki and H. Nishimori, Phys. Rev. E **58**, 5355 (1998).

[2] C. R. Laumann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 030502 (2012).

[3] H. Nishimori and G. Ortiz, *Elements of phase transitions and critical phenomena* (Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 2011).

傾斜磁場および面内磁場下での磁気トルクの 角度依存性による $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ の回転対称性の破れの検証

京大院理^A, Univ. of Colorado Boulder^B

栗原遼^A, 井伊崇仁^A, 村山陽奈子^A, 佐藤雄貴^A,

笠原成^A, 笠原裕一^A, G. Cao^B, 松田祐司^A

Broken rotational symmetry in $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ investigated by torque
magnetometry under conical-rotating fields

^AKyoto Univ., ^BUniv. of Colorado Boulder

R. Kurihara^A, T. Ii^A, H. Murayama^A, Y. Sato^A,

S. Kasahara^A, Y. Kasahara^A, G. Cao^B, Y. Matsuda^A

Keywords: 凝縮系, Ir 酸化物, 擬ギャップ, 磁気トルク

5d 系遷移金属酸化物である $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ では、近年常磁性相において隠れた秩序状態の存在が議論されている。その隠れた秩序状態では、光学測定からは結晶のもつ四回回転対称性の破れた電子状態が、中性子散乱実験からは時間反転対称性の破れが報告されている。これらの結果は銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態とよく似ており、その関連に興味を持たれている[1, 2]。

我々は銅酸化物高温超伝導体の面内磁気トルク測定してきた。磁気トルクは磁化率の異方性と密接に関係する熱力学量であるため、隠れた秩序状態における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な手法である。その結果、擬ギャップ状態で面内の四回回転対称性が破れていることを報告してきた [3, 4]。

そこで我々は、正方晶の $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ について面内磁場下での磁気トルク測定を行い、常磁性相において特異な二回対称性が発達することを検出した。さらに、検出された二回対称成分は傾斜磁場下での磁気トルク測定により、ミスアライメントによる影響ではないことを確認した。今回我々は、 $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ の隠れた秩序状態の系統的な理解のため、異なるドーピング量についての詳細な実験を行ったので報告する。

References

- [1] L. Zhao, *et al.*, *Nat. Phys.* **12**, 32-36 (2017).
- [2] J. Jeong, *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 15119 (2017).
- [3] Y. Sato, *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 1024 (2017).
- [4] H. Murayama, *et al.*, arXiv:1805.00276.

PS-51

非対称単純排他過程の実験系の構築

慶大理工^A, 東大理^B

小島観正^A, 竹内一将^B, 齊藤圭司^A

Experiment of asymmetric simple exclusion process
Dept. of Phys., Keio Univ.^A, Dept. of Phys., Univ. of Tokyo^B
Kansei Kojima^A, Kazumasa Takeuchi^B, Keiji Saito^A

Keywords : 非対称単純排他過程, ASEP, 非平衡系

自己駆動多粒子系の最もシンプルな模型の一つに、非対称単純排他過程 (Asymmetric Simple Exclusion Process, ASEP) がある。ASEP とは、1次元格子状を動く排除体積効果をもつ粒子たちが、左右非対称な確率で隣接するサイトに移り、拡散していくような確率モデルである (Fig. 1)。粒子の進みやすさに向きがあることから、ASEP は定常状態においても有限のカレントが存在する非平衡系である。モデル自体はシンプルである一方で、非平衡相転移や衝撃波など多様な非平衡現象を示し、かつ厳密に解ける稀有な模型として盛んに研究されている。加えて、交通流や生体内タンパク質合成、界面成長や分子モーターなどのモデルとして、多岐にわたる応用がされているのも特徴である [1]。

上記のように、ASEP に関する理論研究は膨大な数存在する一方で、実験によってその特異な性質が目で見える形で示された事例が、一つもないという (これまた稀有な) 現状がある。本研究は、ASEP 的な振る舞いを示す実験系を構築し、その特異な統計性を確認することが目標である。

実験系は次のとおりである。各サイトには粒子の出入り口が2つ開いており、ホッピングの非対称性を反映してそれらは異なった形状をしている (Fig. 2)。サイトの大きさは、排除体積効果を満たすくらいに十分小さくとる。このサイトを複数つなげ、系全体を加振機上で振動させることで、粒子がサイト間を左右非対称にホップしていく。

このような系が真に ASEP であるかどうか重要である。例えば i) 排除体積効果を満たしていること、ii) ホッピングがポアソン過程であること、iii) 粒子同士の衝突による遷移レートの変化がないことなどが挙げられるが、この限りではない。本ポスターでは実験の進捗状況について報告する。

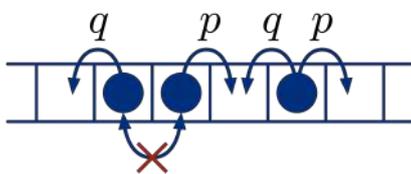


Fig 1: ASEP の模式図

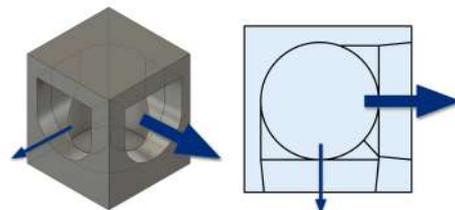


Fig 2: 各サイトの形状.

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

PS-52

1次元量子ウォークのトポロジカルな性質を用いた分類

北海道大学大学院 理学院 数学専攻
関 元樹

Keywords : 量子ウォーク, 対称性, 数理物理, quantum walk, symmetry, mathematical physics.

ランダムウォークを量子化したもののアナロジーとして, 量子ウォークというモデルが21世紀初頭前後より研究されている. このモデルは空間の上に定義された Hilbert 空間の元である状態が, ユニタリ作用素で時間発展し, 各時刻における状態から射影仮説の計算によって確率分布を得るモデルである.

このポスター発表は, 1次元の量子ウォークをトポロジカルな性質を用いて分類する, Cedzich [1] のレビューである. この論文では, 可能な限り広い種類の1次元量子ウォークを取り扱うため, 系に並進不変性を課さない. また, 系に課すことのできる離散な対称性を次の3つとする.

- particle-hole symmetry
- time-reversal symmetry
- chiral symmetry

この3つの対称性と(反)ユニタリ性, 交換関係などから, tenfold way と呼ばれる, 10個の symmetry type を規定し, その各 type と適合する量子ウォークの時間発展を司るユニタリ作用素 W を表言論的手法を用いてトポロジカル的に不変な index を導き, 分類する.

参考文献

- [1] C. Cedzich *et al.*, *Annal. Henri Poincaré* **19**, 325 (2018).
- [2] K. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev. A* **93**, 062116 (2016).

強磁性体薄膜におけるドメインパターンの磁場の掃引速度依存性

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

Field sweep-rate dependence of
magnetic domain patterns in ferromagnetic film
Dept. Basic Science, The Univ. of Tokyo
Ryo Nakanishi and Koji Hukushima

Keywords: 統計力学, 自由エネルギー汎関数, 相分離

近年、実験物理における測定技術の向上により磁性体のメゾスコピックなドメインパターンを観測することが可能となっている。特に、磁性体の薄膜に対して磁場を掃引した場合には、磁場の掃引速度に依存して磁区のパターンが島状 (図 1. (a)) や迷路状 (図 1. (b)) に変化するという興味深い現象が観測されている[1]。

二次元系の時間依存のギンツブルグ・ランダウ (TDGL) 方程式のモデルによるシミュレーションでは、実験で得られているドメインパターンを再現する[2]。本発表では、掃引速度に応じた多様なドメインパターンの変化と TDGL 方程式を用いた数値シミュレーションについて紹介する。

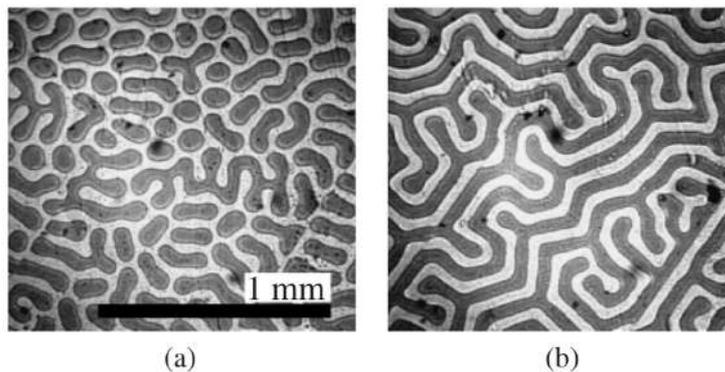


図 1. 実験で観測されたドメインパターン[1]。
(a) は磁場の掃引速度が速い場合。(b) は遅い場合。

[1] K. Kudo, M. Mino, and K. Nakamura, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 013002 (2007).

[2] K. Kudo, K. Nakamura, Phys. Rev. B 76, 054111 (2007).

時系列解析で大自由度カオス系の不安定性を測定する

東京工業大学理学院物理学系^A, 東京大学理学系研究科物理学専攻^B

清水 太郎^{A, B}, 竹内 一将^{B, A}

Measuring instability of large chaotic systems by time series analysis

^A*Department of Physics, Tokyo Institute of Technology*

^B*Department of Physics, The University of Tokyo*

Taro P. Shimizu^{A, B} and Kazumasa A. Takeuchi^{B, A}

Keywords:カオス, Lyapunov 指数, Chaos, Lyapunov exponent

カオスは、気候や化学反応系、多重に連結した振り子など、様々な系で観察される現象である。カオスは、初期条件の違いが短時間で激的に大きくなり、長期的な予測が不可能になる初期条件鋭敏性と呼ばれる性質を持つ。これは、Lyapunov 指数と呼ばれる、軌道に与えた摂動の指数関数的成長率で特徴づけられる。Lyapunov 指数は、計量エントロピーなど、カオスの重要な物理量に関連している。また、Lyapunov 指数とそれに関連する量は、カオス制御やデータ同化などにおいて重要な役割を果たす。実験系では、時間発展則は未知であるのが普通であるため、時系列データから Lyapunov 指数を測定する必要がある。最も一般的な方法は、時系列データの再帰イベントを摂動とみなし、その成長率を測定することで、Lyapunov 指数を推定することである。しかし、大自由度系では、再帰イベントの頻度が、自由度に対して指数関数的に減少するため、最大 Lyapunov 指数でさえ測定することはできていない。

我々は、大自由度系で Lyapunov 指数を測定する新しい方法を開発している。我々は、全ての力学変数が一様に結合されているという単純な場合、局所的な時間発展が少数の力学変数で記述できることに着目した。これにより、再帰イベントを解析するための有効な自由度を著しく減らすことを可能にする。したがって、Lyapunov 指数を計算するのに十分な再帰イベントを得られる。我々は、提案手法が Lyapunov 指数を測定できることを数値的に検証した [1]。発表では、提案方法のアイデアと結果の概要を紹介する。

[1] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, *Chaos* {28}, 121103 (2018).

スピングラス理論を用いた免疫システムの研究

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻
伊藤慧美, 福島孝治

Statistical-mechanical study of Immunology with spin glass theory

Dept of Basic Science, The University of Tokyo

Satomi Ito and Koji Hukushima

Keywords: 統計力学, 免疫学, スピングラス, レプリカ法

免疫システムに携わる免疫細胞は複数種類あり、さらにそれらは膨大な数が存在する。生命科学の研究によって各種の細胞一つ一つの働きは極めて詳しく明らかになっているが、一方で免疫を担う細胞集団全体をシステムとして捉えるような研究はまだ発展していない。

具体的な例として、免疫細胞である T 細胞と B 細胞について考える。体内に侵入したウイルスなどの抗原を B 細胞が捕まえるためには、この 2 種類の免疫細胞の相互作用が不可欠である。T 細胞の活性、不活性状態を表す変数と B 細胞のポピュレーションを変数とする統計力学的モデルを考える。また、ある T 細胞の状態はある B 細胞の増殖に促進的であったり抑制的であるということがわかっており、その効果を相互作用として取り入れる。E Agliari らのモデル[1]ではこれらが bipartite グラフ上の統計力学モデルとして定式化した(左図)。このとき相互作用はクエンチされたランダムな変数となる。これはスピングラスと呼ばれるランダム系の統計力学と同じ数理構造を持つ。さらに、B 細胞の自由度を消去すると、連想記憶のモデルである Hopfield 模型(右図)に帰着される。

Hopfield 模型を含めたスピングラス模型はレプリカ法など有力な計算手法が知られている。免疫システムの模型がスピングラス模型に帰着できることによって、免疫システムの詳しい解析が可能となる。この解析によって、抗原特異性の仕組みの理解が進むことを期待している。

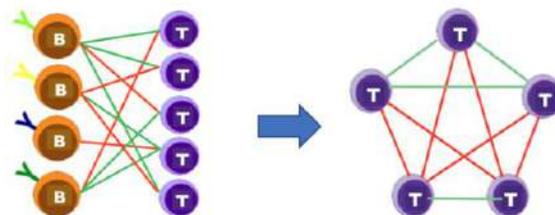


図1: B細胞とT細胞のネットワーク(左)と B細胞の自由度を消去した時のT-T細胞ネットワーク(右) [1]

[1] E Agliari *et al.*, J. Phys. A: Math. Gen, **46**, (2016) 415003.

PS-56

トポロジカル相の分類におけるハミルトニアンの対称性クラス

京都大学 基礎物理学研究所

中村大地

Symmetry Classes of Hermitian-Hamiltonian

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

Daichi Nakamura

Keywords: トポロジカル絶縁体・超伝導体、AZ クラス

空間に依らない離散対称性(時間反転対称性、粒子正孔対称性、カイラル対称性)の下でエルミートハミルトニアンは現在 AZ クラスと呼ばれる 10 種類の対称性クラスに分類される。このクラス分けは歴史的にはランダム行列理論の枠組みでなされ、Wigner と Dyson による原子核理論の研究、QCD におけるカイラル対称性の研究を経て Altland と Zirnbauer による常伝導・超伝導複合メゾスコピック系の研究の中で完成した [1]。トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類はこの AZ クラスを基になされる。

トポロジカル相の分類理論とは、絶縁体・超伝導体を記述するハミルトニアンが、

- (i). 空間次元
- (ii). 空間に依らない離散対称性の有無(どの AZ クラスに属するか)
- (iii). 空間に依る対称性(結晶対称性)の有無

によってトポロジカルに非自明な相を持つかどうかを調べ、分類する理論のことをいう。中でも(iii)結晶対称性を考慮しない、(i)空間次元と(ii)AZ クラスのみによる分類は既に完了しており、基本となる分類表が出来上がっている[2]。

ポスター発表では Altland と Zirnbauer の論文を参考にハミルトニアンが時間反転対称性、粒子正孔対称性、カイラル対称性の下で 10 種類の対称性クラスに分類されることについて説明する。また余裕があれば、トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類表[2]やハミルトニアンを非エルミートに拡張した場合には 38 種類の対称性クラスに分類されること[3]についても説明を行う。

[1] A. Altland and M. R. Zirnbauer, Phys. Rev. B **55**, 1142 (1997).

[2] A. P. Schnyder, S. Ryu, A. Furusaki, and A. W. W. Ludwig, Phys. Rev. B **78**, 195125 (2008);

A. Kitaev, AIP Conf. Proc. **1134**, 22 (2009);

S. Ryu, A. P. Schnyder, A. Furusaki, and A. W. W. Ludwig, New J. Phys. **12**, 065010 (2010);

C. Chiu, J. Teo, A. Schnyder, and S. Ryu, Rev. Mod. Phys. **88**, 035005 (2016).

[3] D. Bernard and A. LeClair, “A Classification of NonHermitian Random Matrices,”

in Statistical Field Theories edited by A. Cappelli and G. Mussardo (Springer, Dordrecht, 2002);

K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato, arXiv:1812.09133 (2018).

PS-57

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。

PS-58

カイラル運動論

東京工業大学 理学院 物理学系

網谷達也

Chiral kinetic theory

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

Amitani Tatsuya

Keywords : Weyl fermion, anomalous transport effect

Weyl fermion は Weyl 方程式に従うスピン $1/2$ で質量 0 の fermion であり, これは Weyl 半金属中に現れる. Weyl fermion は古典的には chiral $U(1)$ 対称性を持つが, この対称性は量子的には破れている. この対称性の破れを chiral anomaly と呼ぶ. そしてこの anomaly がカイラル磁気効果や異常ホール効果といった異常輸送現象を引き起こす. これらの輸送現象を記述する手段として運動論が挙げられるが, 古典的な運動論には anomaly の効果が含まれていない. しかし, Berry 接続と Berry 曲率と呼ばれる量を導入しする事で, anomaly の効果を含むよう修正された運動論を導出する事ができる [1]. また, 場の理論の立場からも, Winger 関数を用いることで同様の修正された運動論を導出する事ができる [2,3]. 本発表ではこれら 2 つの方法についてレビューを行う. 更に格子欠陥のある Weyl 半金属中で起きる torsional chiral magnetic effect と呼ばれる現象 [4] についてもレビューを行う.

[1] M. A. Stephanov and Y. Yin, Phys. Rev. Lett. 109, 162001.

[2] Y. Hidaka, S. Pu, D. -L. Yang, Phys. Rev. D 95, 091901.

[3] A. Huang, S. Shi, Y. Jiang, J. Liao, and P. Zhuang, Phys. Rev. D98, 036010.

[4] H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. 116, 166601.

高周波走査トンネル顕微鏡による Cu(111)表面上の Co 島状構造の強磁性共鳴モデル構築と測定

東大物性研^A, 南カリフォルニア大学^B

佐藤優大^A, Yang Hung-Hsiang^A, 浅川寛太^A, 高橋晋^{A,B}, 長谷川幸雄^A

The calculation and measurement of ferromagnetic resonance of Co island structures on Cu(111) by radio-frequency scanning tunneling microscopy

^AThe Univ. of Tokyo, ISSP, ^BThe Univ. of Southern California

Y. Sato^A, H. H. Yang^A, K. Asakawa^A, S. Takahashi^{A,B} and Y. Hasegawa^A

Keywords: ナノサイズ磁性体, 強磁性共鳴, 走査トンネル顕微鏡

強磁性を示す超薄膜ナノサイズ磁性体は、低次元化による量子効果や表面・界面の存在による対称性低下の影響が集団スピンの振る舞いに顕著に現れる。我々は単一の超薄膜ナノサイズ磁性体における集団スピンの振る舞いを評価するために、磁気励起の局所評価が可能な走査トンネル顕微鏡(STM)を用いる。一般に、STMは表面の構造や電子状態などの静的な物性を評価するために用いられている。しかしながら、近年、高周波(Radio frequency, RF)を導入したSTM(RF-STM)を用いて電子スピンの共鳴信号を捉え、単一スピンの動的振る舞いを明らかにする研究が注目を集めている[1]。我々は強磁性共鳴信号の検出に向けてRF-STMの開発とモデル構築を行ってきた。RF-STMを用いて単一の超薄膜ナノサイズ磁性体として強い面直磁気異方性を持つCu(111)表面上のCo島状構造を用いて強磁性共鳴測定の実現を試みる。

RF-STMのモデル構築では、ナノサイズ磁性体を単磁区磁性円盤と見なし、その磁化が探針から近接場に放たれる高周波の横磁場成分によって変化する様子をLandau-Lifshitz-Gilbert方程式により計算した。磁場を面直に印加した場合を想定し、結晶磁気異方性や形状磁気異方性をアイランドの磁化に対して働く有効磁場と見なしている。共鳴曲線は折り重ね効果と呼ばれる非線形効果のため大きく歪み、周波数掃引方向に依存してヒステリシスを生じ、RF横磁場に対する依存性が磁気異方性とダンピング定数によって決定される。

本講演では、RF-STMモデル構築およびCo島状構造での実験の現状について紹介する。

[1] S. Baumann, W. Paul, T. Choi, C. P. Lutz, A. Ardavan, A. J. Heinrich, *Science* **350**, 417 (2015)

PS-60

オンサーガーの相反定理によるミクロな時間反転対称性の検証

東京大学総合文化研究科^A, 東京大学先進科学研究機構^B

川口廣伊智^A, 清水明^B

Search for Microscopic Time-Reversal Violation by Onsager
Reciprocal Relations

Department of Basic Science^A, Komaba Institute for Science^B
Koichi Kawaguchi^A and Akira Shimizu^B

Keywords:線形応答, 時間反転対称性, 永久電気双極子モーメント, linear response theory, time reversal symmetry, electric dipole moment

我々の宇宙は物質が反物質よりも圧倒的に多い物質優勢宇宙であり、これを説明するために様々なシナリオが提案されている。その一つであるサハロフの3条件によると、宇宙にはCP対称性の破れが必要である。ところが現在知られている素粒子標準模型におけるCP対称性の破れは、物質優勢宇宙を説明するには十分でないことが知られている。そのため、標準模型を超えた様々な新物理が提案され、より大きなCP対称性の破れの探索が盛んである。また、CP対称性は高精度で成り立つCPT定理により時間反転対称性と等価であるため、CP対称性の破れはミクロな時間反転対称性の破れとしても観測することができると考えられている。

ところで、物質系において輸送係数の間に成り立つ関係式であるオンサーガーの相反関係はミクロな時間反転対称性によって成立する[1]。ゆえに、ミクロな時間反転対称性の破れはオンサーガーの相反関係の破れとしてマクロで非平衡な効果として観測できると期待される。

本発表では、関連する先行研究の紹介に加えて、具体的な時間反転対称性の破れの効果を量子多体系における輸送係数の計算に取り入れ、オンサーガーの相反定理の破れを得る試みについて述べる。

[1] R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn. **12**, 570 (1957).

単層黒リンのトポロジカルエッジ状態

大阪大学理学研究科物理学専攻^A

人見将^A, 越野幹人^A

Topological Edge States of Monolayer Black Phosphorene

^ADept. of Physics, Osaka University

Masaru HITOMI^A and Mikito KOSHINO

Keywords: 2次元物質、エッジ状態、黒リン、分極

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。特に armchair 切断面(線)、zigzag 切断面(線)に現れるエッジ状態がそれぞれ異なる電子軌道を起源とすることを見出し、それらの軌道の持つ電子分極(Wannier 関数の中心)がエッジ状態と対応することを実証した。

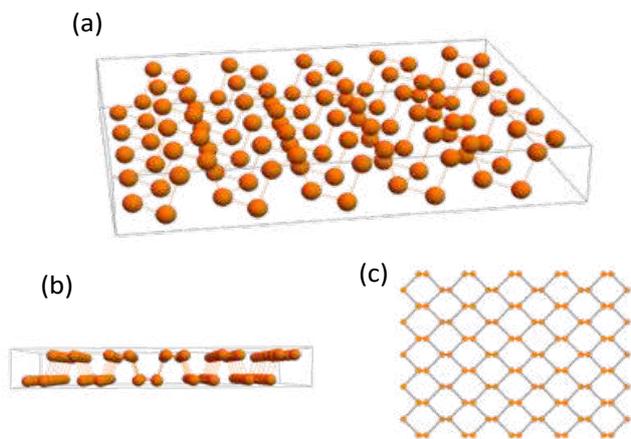


Fig. 1 monolayer black phosphorene

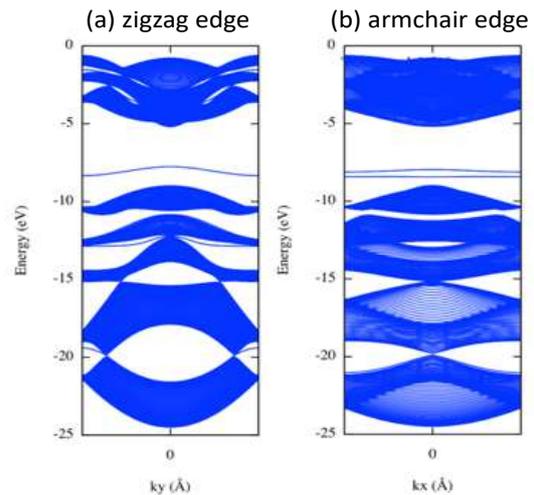


Fig. 2 The band structure

[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)

PS-62

Bound state In Continuum を用いた指数減衰の抑制

大阪府立大学

澤田 崇史, Savannah Garmon, 野場 賢一

Keywords: BIC 複素固有値問題 非指数減衰 開放量子系 共鳴状態

ある系のハミルトニアンが複素固有値を持つとき、その固有状態のことを“共鳴状態”と呼ぶ。この状態は、開放量子系における不純物準位の存在確率の時間発展の大部分が指数減数することと密接な関係にある。そして、非常に短い時間領域と長い時間領域においては、非指数減衰する。しかし、非指数減衰を観ることは非常に難しい。

本研究の目的は、非指数減衰が現れるような条件を発見することである。その際、指数減衰を抑制する効果のある Bound state In Continuum を用いた。

[1] E. Torrontegui, J. G. Muga, J. Martorell, and D. W. L. Spring, *Adv. Quant. Chem.* 60, 485 (2010)

[2] S. Garmon, T. Petrosky, L. Simine, and D. Segal, *Fortschr. Phys.* 61, No. 2-3, 261-275 (2013)

[3] S. Weimann, Y. Xu, R. Keil, A. E. Miroschnichenko, A. Tünnermann, S. Nolte, A. A. Sukhorukov, A. Szameit, and Y. S. Kivshar, *Phys. Rev. Lett.* 111, 240403 (2013)

[4] S. Garmon and K. Noba, *Phys. Rev. A* 99, 010102(R) (2019)

反強磁性超伝導体 UPt₃ 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 UPt₃ 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。UPt₃ 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).

PS-64

ねじれた二層系

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
坪田 祥一

Twisted bilayer systems
*Department of Physics, Graduate School of Science,
The University of Tokyo*
Shoichi Tsubota

Keywords : 二次元系, ねじれた二層系, TBG, ポスター発表, レビュー

発表内容の詳細は未定であるが、近年物性分野で大きく関心を集めている Twisted Bilayer Graphene (TBG) および、それに関連した話題について、レビューと自分の研究紹介を 2 : 1 くらいの割合で行う予定である。[注 1] レビューの形式については現段階ではトピックのレビューを予定している。[注 2]

TBG は単層 Graphene を二枚、角度をつけて重ねただけの単純な系であるが、Graphene を二層そのまま重ねた系では見られない興味深い性質が現れることが実験から分かってきた。特に、昨年 Y. Cao らによる一連の実験 [1,2] によって、特定の角度で重ねた TBG で、Mott 絶縁体相や非従来型超伝導相が現れることと、その転移温度も重ねる角度に大きく依存することが示されて以来、TBG および、ねじれた二層系は今非常に熱い話題の一つとなっている。この結果はねじる角度によって相互作用の強さを変えられることを示唆し、さらに二次元系故に電子のフィリングも容易に変えられることから、TBG は強相関電子系を研究する良い実験材料となることも期待されている。

しかし、この TBG に関する理論的な研究は比較的昔から行われているものの、TBG は一般には周期系を作らず準周期格子になるため、そのままではバンド理論などの強力な解析手法が使えず解析は困難であった。その困難を回避する代表的な方法として、R. Bistritzer と A. H. MacDonald による Continuum model の解析 [3] が挙げられる。周期構造をずらして重ねた時にできるモアレ構造を反映した”モアレバンド”を考えることにより、この Continuum model では微小なねじれ角の範囲で、系が厳密に周期的か否かに関わらず近似的にバンド理論的な解析ができる。このモデルによれば、ねじれ角 1.05° をはじめとする magic angle と名付けられた幾つかの角度で、Dirac 点での速度が 0 になり、ほとんどフラットなバンドが現れることが示される。このモデルによる予想は前述の Y. Cao らの実験結果と整合しており、現在ではモアレ構造によるフラットバンドが TBG における強相関現象の原因となっていると考えられている。

注 1: 発表内容は都合により予告なく変更する可能性があります。

注 2: レビュー形式は都合により論文レビューに変更する可能性があります。

[1] Y. Cao *et al.*, Nature **556**, 43 (2018).

[2] Y. Cao *et al.*, Nature **556**, 80 (2018).

[3] R. Bistritzer and A. H. MacDonald, PNAS **108**, 12233 (2011).

PS-65

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

東北大院理^A, 東北大 AIMR^B

永田一将^A, 松下ステファン悠^A, Kim Khuong Huynh^B, 谷垣勝己^{A,B}

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^A, Tohoku Univ AIMR^B

Kazumasa Nagata^A, Stephane Yu Matsushita^A, Kim Khuong Huynh^B,

Katsumi Tanigaki^{A,B}

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).

SU(n) Hubbard 模型における平坦バンド強磁性

東大院理

田村 健祐, 桂 法称

Flat-band ferromagnetism in the SU(n) Hubbard model*Dept. Phys., Univ. Tokyo*

Kensuke Tamura, Hosho Katsura

Keywords : 強磁性, SU(n) ハバード模型, ferromagnetism, SU(n) Hubbard model

互いに強く相互作用しあう多体系は強相関系と呼ばれ、こうした系を記述する模型として Hubbard 模型がよく用いられる。さて、近年では冷却原子系の発展により様々な系をシミュレーションすることが可能になりつつある。そうした中で Hubbard 模型の内部自由度に関して一般化した SU(n) Hubbard 模型で記述される系の実現が報告されている [1]。ここでは原子核の核スピンの自由度を利用することで内部自由度が n 成分 ($n > 2$) であるフェルミオンが実現される。さらに内部自由度によらないホッピングと相互作用を実現することで系は SU(n) 対称性を持つことになる。こうした高い内部対称性を持つフェルミオン系の性質は従来の固体物理の文脈では調べられることが少なく、さらに定理という形で確立された結果は少ない。

そこで本研究では SU(n) Hubbard 模型で成立する厳密な結果を導く。特に、通常の Hubbard 模型で定理として確立されている平坦バンド強磁性という強磁性機構に注目した。平坦バンド強磁性は強相関電子系における強磁性の発現機構の一つであり、通常の Hubbard 模型では最低バンドが平坦であるときに多体系の基底状態が強磁性を示すことが証明されている [2, 3]。我々は同様の定理が SU(n) Hubbard 模型に一般化できることを証明した。通常の Hubbard 模型では、より現実的な設定としてバンドがわずかに分散を持った場合もあるパラメータ領域で強磁性を示すことが証明されている [3]。そこで我々は SU(n) Hubbard 模型においても、同様の設定の下であるパラメータ領域で強磁性相が現れることを証明した。さらに数値的に確認可能な強磁性の条件も導出することで強磁性を保証するパラメータ領域も明らかにした (図 1)。

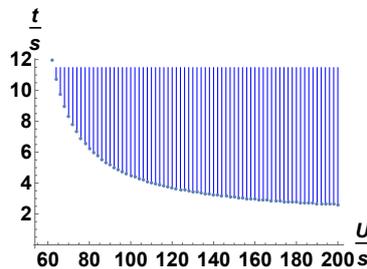


図 1: SU(4) の場合の強磁性を保証するパラメータ領域

[1] S. Taie, *et al.*, Nature Phys. **8**, 825830 (2012).

[2] H. Tasaki, Phys. Rev. Lett. **69**, 1608 (1992).

[3] H. Tasaki, Phys. Rev. Lett. **75**, 4678 (1995)

PS-67

量子ボードゲーム「エンタングリオン」

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

濱村 一航

Quantum Board Game “Entanglion”

Department of Nuclear Engineering, Kyoto University

Ikko Hamamura

Keywords : 量子エンタングルメント, 量子コンピュータ

量子状態には量子エンタングルメントと呼ばれる性質がある。エンタングルメントは量子情報ではとても重要なものであり、例えば量子テレポーテーションや測定型量子計算のリソース状態として使われている。このエンタングルメントの性質を抽出して、ボードゲームにしたものがエンタングリオンである [1]。このエンタングリオンは図 1 のような場で遊ぶものである。このポスター発表では実際にエンタングリオンを体験する。エンタングリオンと量子コンピュータがどう関係があるのかについて議論し、量子コンピュータについて理解を深めることが本ポスター発表の目的である。



図 1 量子ボードゲームエンタングリオンの舞台。画像は公式 [1] より引用。また、エンタングリオンはオープンソースのボードゲームなので、誰でもダウンロードし印刷して遊ぶことが可能である。

参考文献

[1] Entanglion, <https://entanglion.github.io/>, 2018.

眠る大腸菌の過渡ダイナミクス ～ 1細胞形態から集団構造へ～

東大理^A, 東大総合文化^B, 東工大理^C
嶋屋拓朗^A, 大倉玲子^B, 若本祐一^B, 竹内一将^{A,C}

Transient dynamics of sleeping bacteria ~From single-cell morphology to population structure~

^ADept. of Phys., Univ. Tokyo, ^BDept. of Basic Sci., Univ. Tokyo, ^ADept. of Phys., Tokyo Tech.
T. Shimaya^A, R. Okura^B, Y. Wakamoto^B and K. A. Takeuchi^{A,C}

Keywords: 生物物理, バクテリア, 環境応答, 灌流実験^{かん}, 数理モデル

台所のヌメリ、歯垢など、バクテリアが凝集する事で形成する「バイオフィーム」は、我々にとって身近な存在であり、近年はバイオフィーム内部での空間構造が流体力学的な視点から研究されている[1,2]。しかし、これらの研究では、常に新鮮な養分がバクテリアに与えられている状況を想定しており、揺らぐ環境下における現実的なダイナミクスは調べられていない。

そこで我々は、従来実現が困難だった高密度バクテリア集団の高度な培養環境制御実験を可能にし[3]、大腸菌が飢餓状態になって成長を止める、「眠る」過渡ダイナミクスの観察を試みた。本発表では、飢餓時に平均的な1細胞体積が減衰する”Reductive cell division”と呼ばれる過程の定量観測結果と、細胞内酵素反応を考慮したモデリングの結果を示す。

さらに、1細胞形態に着目した過渡ダイナミクスに限らず、飢餓時における細胞集団規模の空間構造変化の観察結果も紹介する。ここでは、ネマチック配向をした高密度大腸菌集団が、スメクチック配向を持つ状態に遷移する様子が観察された(図)。また、上記で述べた1細胞形態の変化と、集団規模の空間構造の変化がどう関わっているのかについても議論をしたい。

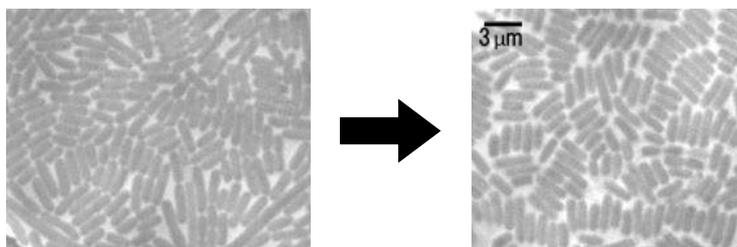


図: 飢餓状態における大腸菌集団のスメクチック転移

- [1] Z. You *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 031065 (2018).
- [2] D. Dell’Arciprete *et al.*, Nat. Commun. **9**, 4190 (2018).
- [3] T. S., R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, in prep.

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 ρ_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。

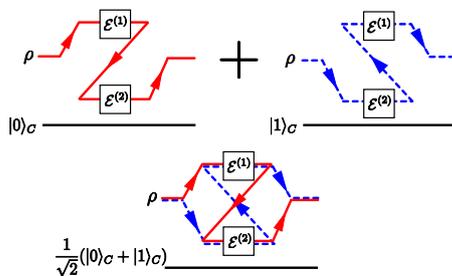


図 1: チャンネルが2個の場合の量子スイッチ。

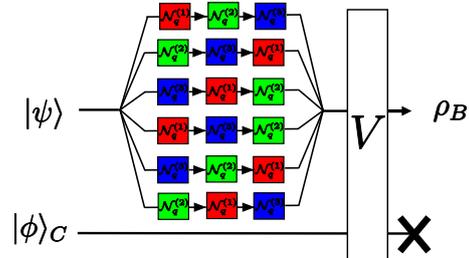


図 2: 量子スイッチを用いた状態保持の模式図 ($N = 3$)。 \times

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

PS-70

高密度バクテリア集団のガラス的ダイナミクス

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻^A,
東京工業大学 理学院 物理学系 修士課程修了^B
山本 真大^A, 古田 祐二郎^B, 竹内 一将^A

Keywords : 大腸菌, アクティブマター, ジャミング転移, ガラス転移

粉体などのマクロ粒子系は、ある閾値密度以上で無秩序な構造の凍結により剛性となる。この現象はジャミング転移と呼ばれ、物性物理学最大の未解決問題の一つとも言われるガラス転移と密接に関連している。実際に、ジャミング転移点近傍の粒子系は、過冷却液体の協同運動・動的不均一性と同様な現象を示す。ジャミング転移はある程度マクロな大きさを持った粒子が多数集合した系における普遍的な現象とみられ、粉体系に限らず、コロイド分散系やアクティブマターである上皮細胞集団でも見られている。

生物系におけるジャミング転移を考えたとき、そのガラス的振る舞いがどの程度普遍的かという疑問が生じる。上皮細胞は容易に形状を変化させることができ、それがジャミング転移の制御パラメータにもなる [1]。一方で、大腸菌は細胞壁を持つため上皮細胞のように簡単には形状を変えず、菌株によっては motility も大きい。そこで、高密度の大腸菌集団でも好適な培養環境を維持できる実験系で観察を行ったところ、大腸菌集団も高密度状態でガラス的ダイナミクスを示すことを発見した。

本研究の実験では、1 細胞長期培養装置 [2] を改良したマイクロ灌流系 (Micro Perfusion System, MPS) と、その発展版である広域マイクロ灌流系 (Extensive Micro Perfusion System, EMPS) を利用した (図 1)。MPS は、実験的課題であった均一な栄養状態を維持しながら、大腸菌を擬二次元的空間に閉じ込めて観察することが可能な実験系である。EMPS は我々の研究室で開発した実験系で、MPS の観察領域中に柱を立てて膜を支えているという点を改善したものである。我々は MPS と EMPS を利用して高密度大腸菌集団のガラス的ダイナミクスを顕微鏡観察し、その定量化のために画像解析を行った。

本研究は、生物種におけるジャミングの普遍性を示し、ガラス転移の理解に繋げることを目標にしている。また、固体表面に接着した微生物が形成する高次構造体である、バイオフィルムの形成機構の解明に寄与することを企図している。

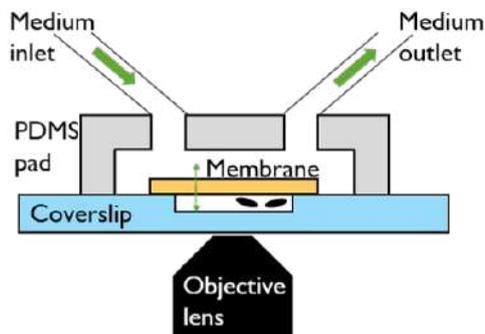


図 1: MPS, EMPS の断面模式図

[1] L. Oswald *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 483001 (2017).

[2] 井之上 一平 *et al.*, 生物物理 **41** (2), 111-113 (2001).

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^A, ハンブルク大^B

尾崎裕介^A, 長尾一馬^B, 段下一平^A, 笠松健一^A

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

^A*Dept. of Phys. Kindai Univ.*, ^B*ZOQ Hamburg Univ.*

Yusuke Ozaki^A, Kazuma Nagao^B, Ippei Danshita^A, Kenichi Kasamatsu^A

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)

極性金属における電流誘起軌道磁化と SnP への応用

東工大理^A, 創発物性科学研究セ^B, 東工大元素戦略セ^C

原大輔^A, M. S. Bahramy^B, 村上修一^{AC}

Current-induced orbital magnetization in polar metals and its application to SnP

Dept. Phys., Tokyo Inst. Tech.^A, TIES^B

Daisuke Hara^A and Shuichi Murakami^B

Keywords: 極性金属, 軌道磁化, polar metal, orbital magnetization

物質の磁化には電子スピンによる寄与（スピン磁化）の他に、軌道磁化と呼ばれる、電子が円環電流を作り、原子核付近に磁場を発生させることによる寄与がある。軌道磁化は物質内の電子の角運動量に関係する量であり、電子の角運動量の期待値としては書いてはいたが、結晶内のブロッホ状態から求める方法は分かっていなかった。しかし、2005年に Thonhauser [1] と Xiao [2] が別々に絶対零度における軌道磁化の表式を導出したことにより、有限温度での軌道磁化の表式が提案され、またこの表式を用いて具体的な物質やモデルで軌道磁化がどのように出るか計算されてきている。

時間反転対称性の破れていない系、つまり非磁性体では軌道磁化は対称性によりゼロである。一方そうした系に電流を流すと、系の結晶対称性によっては軌道磁化が出ることが最近理論的に提案された [3,4]。この理論で用いたモデルはらせん状の結晶構造をもち、古典的なソレノイドに対応する現象であるとみなせる。

我々は強誘電体のような構造を持つ金属である極性金属に着目した。極性金属は空間反転対称性が破れており、電流を流した時に軌道磁化が出現する可能性がある。本研究で用いた極性金属のモデルは2次元正方格子を積み重ねたものであるが、空間反転対称性を破るようにホッピングを入れている。この極性金属のモデルに電流を流した時に、確かに軌道磁化が現れることを理論的に示した。さらに、摂動法を用いて層間のホッピングが弱い場合に軌道磁化のホッピング依存性を計算し、極性金属での軌道磁化の物理的な描像を明らかにした。またその具体例として、極性金属である SnP に対して、電流誘起軌道磁化を計算した。

[1] T. Thonhauser, Davide Ceresoli, David Vanderbilt, and R. Resta, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 137205 (2005).

[2] Di Xiao, Junren Shi, and Qian Niu, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 137204 (2005).

[3] T. Yoda, T. Yokoyama, and S. Murakami, *Sci. Rep.* **5**, 12024 (2015).

[4] T. Yoda, T. Yokoyama, and S. Murakami, *Nano Lett.* **18**, 916 (2018).

探針の強磁性共鳴を用いた磁気共鳴力顕微鏡の設計開発

大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻
和泉 遼, 内藤 賀公, 李 艶君, 菅原 康弘

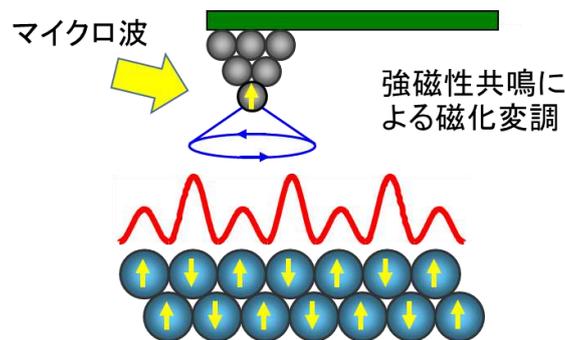
Development of Magnetic resonance force microscopy using tip-FMR
Department of Applied Physics, Osaka University

Ryo Izumi, Yoshitaka Naitoh, Yan Jun Li and Yasuhiro Sugawara

Keywords: 磁気共鳴力顕微鏡, 強磁性共鳴

表面の磁気的情報をナノスケールの空間分解能で測定する技術は、情報記録デバイス、スピントロニクス技術などへの応用に際して非常に重要である。特に、走査型プローブ顕微鏡に基づいた測定技術は、その優れた空間分解能のため重要な役割を担う。現在、力検出に基づいて磁気情報を検出する顕微鏡法として磁気力顕微鏡¹、磁気交換力顕微鏡²、磁気共鳴力顕微鏡³などがある。これらの技術は、試料表面の局所的磁気特性の測定に優れているが、ナノスケール分解能に関する報告は少なく、より高精度な測定技術の開発が求められる。

我々は現在、力検出に基づいて表面磁気情報をナノスケールで観察することを目的としている。ナノスケールの分解能達成のため、我々は、強磁性共鳴による探針の磁化変調を用いて、磁気情報を検出することを試みている。そのために現在、探針の強磁性共鳴を用いた磁気共鳴力顕微鏡の設計開発を行っている。今回のポスター発表では、本研究の現時点での実験結果について述べる。



[1] U. Hartmann, Annu. Rev. Mater. Sci. 29, 53–87 (1999).

[2] U. Kaiser, A. Schwarz, R. Wiesendanger, Nature 446, 522 (2007).

[3] D. Rugar et al., Nature 430, 329–332 (2004).

ハニカム格子模型におけるベリー曲率の軌道磁性に及ぼす影響

東大理

尾崎壮駿、小形正男

Berry Curvature Contribution to Magnetism in a Honeycomb Lattice Model

Department of Physics, University of Tokyo

Soshun Ozaki and Masao Ogata

Keywords: ベリー曲率, 軌道磁性, Berry curvature, orbital magnetism

これまでの研究で、異常ホール効果や軌道磁性などの物理量にベリー曲率が現れることが指摘されてきた。特に、軌道磁性に関しては、波束の議論を用いた半古典的な方法により軌道磁性が調べられ、そのなかでのベリー曲率の果たす役割が明らかにされた[1]。さらに、この理論を用いていくつかの物質モデルについて計算がなされている[2]。

一方で最近では、ブロッホ電子が作る軌道磁性に関する一般論が展開された[3]。これはベクトルポテンシャルに関する2次の摂動により計算されたもので、その範囲において厳密なものである。この一般論によると、ベリー曲率は明確な形で含まれており、軌道磁性に対するベリー曲率の効果を精密に議論することができると考えた。

本研究では、staggered on-site ポテンシャルとスピン軌道相互作用を含むハニカム格子模型について、[3]の一般論を用い、帯磁率の計算を行った。このモデルは、ブリルアンゾーンにおいて、K 点および K'点付近で大きなベリー曲率を持つことが知られている。この性質を利用し、ベリー曲率の軌道磁性に与える影響を調べた。さらに、パラメータを変化させることによってトポロジカル絶縁体相と通常の絶縁体相が移り変わることが知られており、そのような変化が帯磁率に影響を与えるかどうかは興味深い問題である。これについても議論する予定である。

[1] D. Xiao, M. -C. Chang, and Q. Niu, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1959 (2010).

[2] Y. Gao, S. A. Yang, and Q. Niu, *Phys. Rev. B* **91**, 214405 (2015).

[3] M. Ogata, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86**, 044713 (2017).

時間分解光電子顕微鏡を用いた GaAs 表面における光励起キャリアの超高速ダイナミクスの直接計測

筑波大学数物^A, 高エネルギー加速器研究機構^B

深見 優介^A, 福本恵紀^B, 佐々木正洋^A, 山田洋一^A

Direct observation of ultrafast photo-carrier dynamics on a GaAs surface using time-resolved photoemission electron microscopy

Tsukuba Univ^A, KEK^B

Yusuke Fukami^A, Keiki Fukumoto^B, Masahiro Sasaki^A and Yoichi Yamada^A

Keywords: 半導体, 表面・界面, 超高速, 光電子分光, 時間分解光電子顕微鏡

太陽電池・LED・トランジスタなどの半導体デバイス性能は、表面・界面に特有なエネルギーポテンシャル中での励起キャリアの動的特性に決定づけられる。しかし、励起キャリアのエネルギー緩和、電荷分離、拡散、放射・非放射再結合などのダイナミクスを直接計測する手法は少ない。本研究では、ポンププローブ分光と光電子顕微鏡を組み合わせた、時間・空間・エネルギー分解能を持つ時間分解光電子顕微鏡 (Time-resolved photoemission electron microscopy: TR-PEEM) 計測¹により、GaAs 基板表面において光励起された電子のダイナミクスを直接追跡することを研究目的とした。

図 1.(a),(b) に、n-GaAs(100) を 2.4 eV のポンプ光で励起し、それぞれ 4.00 eV と 4.64 eV のプローブ光で光電子放出した際の、遅延時間に対する光電子放出強度の変化とそのフィッティング解析結果を示す。4.00 eV のプローブ光では、図 2.(a) に示すように伝導帯底上端の電子のみを検出している。そのため、図 1.(a) の黄色の曲線として、表面で光励起された電子・正孔対の分離による時定数 1 ps 程度の光電子放出強度の減少が見えている。一方、4.64 eV のプローブ光では、図 2.(b) に示すように伝導帯底下端の電子まで検出している。それゆえ、電荷分離による表面光起電力 (Surface photo-voltage: SPV) の発生が引き起こす伝導帯底下端のエネルギー上昇を受けて、光電子の検出される効率が向上している。その結果、図 1.(b) の青色の曲線として、時定数 2 ps 程度の光電子放出強度の増大が見られた。本研究では、TR-PEEM における励起キャリアの超高速ダイナミクスの直接計測により、これまで捉えられていなかった SPV 発生過程の素過程を捉えることができた。

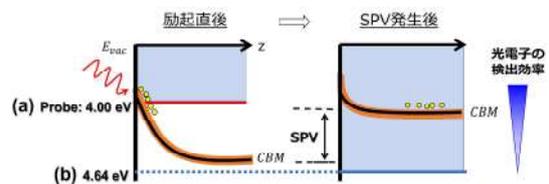
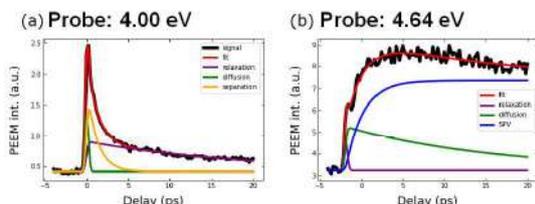


図 1: (a) 4.00 eV と (b) 4.64 eV のプローブ光を用いた際の、遅延時間に対する光電子放出強度の変化とそのフィッティング解析結果

図 2: n-GaAs のバンド図の変化と、(a) 4.00 eV と (b) 4.64 eV のプローブ光のエネルギーの関係

[1] K. Fukumoto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 053117 (2014).

PS-76

$S = 1/2$ 三角格子ランダム XXZ モデルの低温磁気相図

阪大理

幸城秀彦, 川村光

Low temperature magnetic phase diagram of the $S = 1/2$ random triangular-lattice XXZ model

Dept. of Earth and Space Science, Osaka Univ.

H. Kohshiro and H. Kawamura

近年, 反強磁性的相互作用にランダムネスを導入したフラストレートした $S = 1/2$ ハイゼンベルグモデルの基底状態として, 空間的にランダムにシングレットを形成する「ランダムシングレット」状態が実現することが提案されている [1]. 特に文献 [2] では, 三角格子上的の最近接相互作用モデルに対し, 反強磁性的相互作用のランダムネスを強くしていくと, 系の基底状態が反強磁性秩序状態から非磁気的なランダムシングレット状態へと転移することが, 数値対角化計算により示されている. 他方, 標準的なスピングラスモデルで想定されるような, ランダムな相互作用に強磁性的相互作用が含まれる場合や, 実際の物質では避けられない, 相互作用に異方性がある場合にもランダムシングレット状態が安定に存在するのかどうかについては, これまで明らかにされていなかった.

この点に関する知見を得るために, 反強磁性的および強磁性的相互作用をランダムに含む $S = 1/2$ 三角格子 XXZ モデルの基底状態を数値対角化法を用いて解析した. 系のハミルトニアンは, $\mathcal{H} = \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y + \gamma S_i^z S_j^z)$ で与えられ, 最近接交換相互作用 J_{ij} は図 1 に示すような平均 \bar{J} , 幅 Δ の一様分布に従うものとし, 分布幅 Δ を 1 に固定する.

これまで我々は異方性が容易軸的 ($\gamma > 1$) な場合と容易面的 ($0 < \gamma < 1$) な場合の両方で, 異方性が弱く, 強磁性的相互作用の割合も少なければ, ランダムシングレット状態が基底状態となることを明らかにした [3, 4].

今回の発表では, 前回まで詳しく解析されていなかった領域についても解析を行い, $\bar{J} - \gamma$ 相図全体を調べた結果を述べる. 今回得られた基底状態相図は, $\bar{J} \rightarrow \infty$ に対応するランダムネスのない XXZ モデルの先行研究 [5, 6] と整合的であることがわかった.

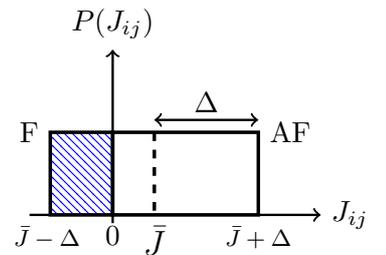


図 1 交換相互作用 J_{ij} の分布. 斜線部が強磁性的相互作用 (F) に対応し, それ以外の部分が反強磁性的相互作用 (AF) に対応する.

- [1] H. Kawamura, 日本物理学会誌 **72**,492 (2017).
- [2] K. Watanabe *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 034714 (2014).
- [3] 幸城秀彦, 川村光, 日本物理学会第 73 回年次大会, 24pK305-4 (2018).
- [4] 幸城秀彦, 川村光, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 10pC210-6 (2018).
- [5] F. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 017203 (2009).
- [6] H. C. Jiang *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 020409(R) (2009).

PS-77

DMFT を用いた強相関系の解析

京都大学理学研究科 物理学宇宙物理学専攻
物理学第一教室 凝縮系理論研究室

児藤 鑑

Analysis of strongly correlated systems using DMFT
Department of Physics Graduate School of Science, Kyoto
University
Akira Kofuji

Keywords : 強相関系,DMFT

強相関系を扱うにあたって有力な手法の一つである動的平均場理論 (DMFT) について紹介する。私たちの身の回りの物質の性質の多くがその内部の電子のふるまいによって決まっています。例えば金属と絶縁体の違いはバンド理論によって大まかに理解することができます。しかし、モット絶縁体はその単位胞内の電子数が奇数であるにもかかわらず絶縁体としてふるまい、これはバンド理論からの帰結に反する。それでは、モット絶縁体のこの振る舞いは何に依るのかというと電子間のクーロン斥力が重要な働きをしている。強いクーロン斥力が働けば、電子がサイト間を飛び移ってエネルギーの利得を得るよりも各サイトに電子が局在したほうがエネルギー的に得をすることになり、その系は絶縁体的なふるまいを示すことになる。これがモット絶縁体の単純な理解であり、電子相関がこの系の振る舞いの本質であることが分かる。この例のように相互作用を考慮することによって物質の多種多様な性質を理解することができるわけだが、実際に電子相関を取り入れるとなると、乱雑位相近似 (RPA) のように相関が弱い極限から近似するか、slave boson を用いて相関が強い極限から近似するというような方法などが存在する。一方で今回私が紹介する DMFT という手法は弱相関の領域から強相関の領域までを系統的に扱うことのできる近似手法である。DMFT は空間的な揺らぎの効果を無視して時間的な揺らぎの効果を取り入れる近似であり、格子上の電子の問題が有効媒質中での不純物問題を自己無撞着に解くことと等価になる。局所的な揺らぎが支配的な系ではこの近似はよい近似となっており、上で例として挙げたモット転移を記述することもできる。今回の発表ではこの DMFT という手法がモット転移を含めてどのような強相関系での現象を説明することに成功してきたのか、空間的な揺らぎの効果をどのようにして取り入れるのかについて、また DMFT を実行するにあたっては数値計算が不可欠なので数値計算の手法についても紹介したいと思う。

[1] Antoine Georges, Gabriel Kotliar, Werner Krauth, and Marcele J. Rozenberg, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 13 (1996).

[2] Ralf Bulla, Theo A. Costi, and Thomas Pruschke, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 395 (2008).

[3] 藤本聡、川上則雄 『量子多体系の物理』, (サイエンス社 2011).

スピナイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の気相液相転移における形状依存性東大物性研^A, 京大院工^B, 首都大理工^C元木大介^A, 河野洋平^A, 橘高俊一郎^A, 榊原俊郎^A, 高津浩^B, 門脇広明^CLiquid-gas transition of the spin ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ revisitedISSP, Univ. of Tokyo^A, Kyoto Univ.^B, Tokyo Metropolitan Univ.^CDaisuke Motoki^A, Yohei Kono^A, Shunichiro Kittaka^A, Toshiro Sakakibara^A, Hiroshi Takatsu^C, Hiroaki Kadowaki^D

近年凝縮系分野ではフラストレート磁性体の特異な物性に関心が集まっている。特に絶対零度においてもエントロピーが残存し、一見熱力学第三法則を無視する現象を示すなどその性質はとても興味深い。フラストレート磁性体の1つであるパイロクロア格子構造を持つスピナイスと呼ばれる磁性体では、熱揺らぎの効果として擬似的な磁気単極子を生じることが示されつつある。

$\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は典型的なスピナイス化合物であり、[111] 方向の磁場約 0.9 T で磁化が 2/3 プラトーからの気相液相型 1 次転移を示す。この転移は磁気単極子の結晶化転移と解釈されている。先行研究において磁化が約 0.9 T で不連続的に立ち上がり 1.5 T 付近で緩やかに飽和する、従来の理論モデルでは再現のできない磁化曲線の非対称性が報告されている [1]。このような非対称性は、磁気双極子相互作用および反強磁性相互作用を取り入れたスピナイスモデルのモンテカルロ計算では再現できない。昨年度の追実験 (図 1、2) から試料形状に基づく反磁場分布の影響が無視できないことがわかったので、今回はほぼ完全な球状の試料を準備して反磁場分布の影響を取り除いた上で測定を行った。その結果に基づき非対称性の原因について考察する。

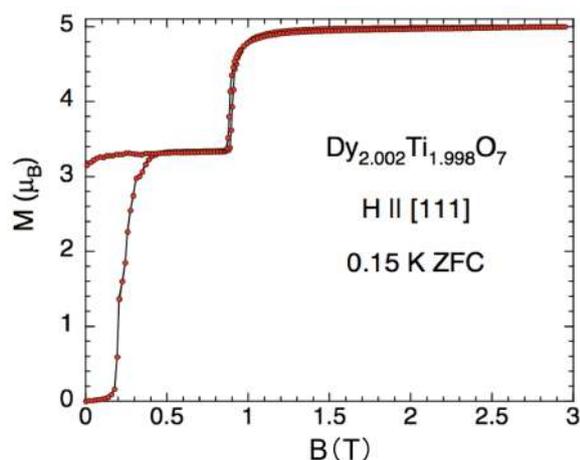
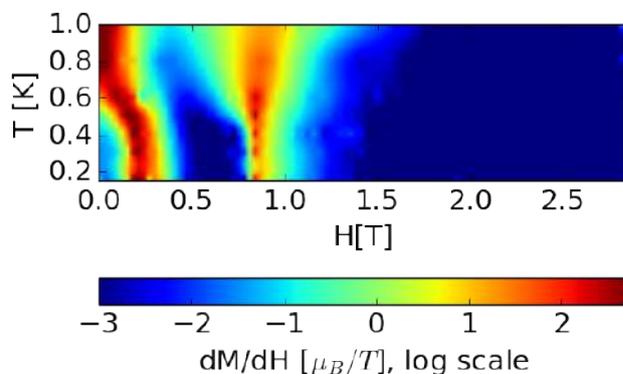
図 1 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の磁化曲線

図 2 微分磁化率の磁場温度依存性

[1] T. Sakakibara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 207205 (2003).

PS-79

異方的超伝導の現象論

京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻物理学第一教室凝縮系理論
野垣康介

Phenomenological theory of anisotropy superconductivity
Department of Physics, Kyoto University, Kyoto
Kosuke Nogaki

Keywords : 超伝導, 点群, **superconductivity, point group**

BCS理論はよく知られたS波超伝導の理論であるが、異方的超伝導を記述できない。そこでBCS理論を異方的超伝導に対して拡張する。さらに強結合効果やスピン-軌道相互作用が入った場合にも適用できる、一般化されたGL方程式の概念を紹介する。これは点群の既約表現から決定されるものであることを理解することを目指す。

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

PS-80

スピングラス物質へのスピンプンピングの理論

岡山大院自然^A, 岡山大基礎研^B

藤本 悠星^{AB}, 市岡 優典^{AB}, 安立 裕人^{AB}

Theory of spin pumping into spin-glass materials

Graduate School of Natural Science and Technology^A,

Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University^B

Yusei Fujimoto^{AB}, Masanori Ichioka^{AB}, Hiroto Adachi^{AB}

Keywords : スピン流, スピントロニクス, スピン輸送, スピングラス

近年, スピン角運動量の流れであるスピン流の物理が大きな進展を見せている [1]. これまでに様々なスピン流の生成手法及び観測手法が開発され, 多種多様な物理系でのスピン流のふるまいを議論できるようになりつつある.

このような背景のもと, 西暦 2000 年以降に新しく開発されたスピン流生成手法の一つに, スピンプンピングと呼ばれるものがある. これは, マイクロ波による強磁性共鳴で強磁性体内の磁化の歳差運動を誘起し, この歳差運動が強磁性体/標的物質の界面での交換相互作用を通して標的物質にスピン流を注入する方法である. スピンプンピングは界面での電荷移動を伴わないという著しい特徴を持ち, これまで様々な物質へのスピンプンピングの研究が行われてきた.

本研究で注目するのは, スピンがランダムに凍結したスピングラス物質へのスピンプンピングの実験 [2] である. ここ数年, スピングラス物質中のスピン輸送は様々な角度から注目を集めている [3] が, 一方で, スピングラスへのスピンプンピング実験に対応する理論は文献上に存在しない. そこで, 我々はスピングラス物質へのスピンプンピングの理論構築を試みた.

先行研究 [4] により, スピンプンピングによるスピン注入強度 G_s は標的物質の動的スピン帯磁率 $\chi(\omega)$ を用いて

$$G_s \propto \frac{1}{\omega} \text{Im}[\chi(\omega)]$$

のように表せることが知られている. そこで, 本研究ではスピングラスの Sherrington-Kirkpatrick モデルの平均場近似を再現する動的理論 [5] を用いて, スピングラス物質のスピン帯磁率から G_s を計算した.

詳しい内容については, 当日のポスターで発表する予定である.

[1] Spin Current, edited by S. Maekawa, S. Valenzuela, E. Saitoh, and T. Kimura (Oxford University Press, Oxford, 2017).

[2] R. Iguchi, et al., J. Phys. Conf. Ser. **266**, 012089 (2011).

[3] Y. Niimi, et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 196602 (2015)

[4] Y. Ohnuma, et al., Phys. Rev. B **89**, 174417 (2014).

[5] H. Sompolinsky and A. Zippelius, Phys. Rev. B **25**, 6860 (1982).

PS-81

金表面における水素の量子効果

東京大学 理学系研究科 物理学専攻

片岡 佑太, 杉野 修

Quantum Effect of Hydrogen on Gold Surface

Department of Physics, The University of Tokyo

Yuta Kataoka and Osamu Sugino

Keywords: 金表面, 第一原理計算

単純な元素である水素はその軽量性により、量子性が強く発現する。一般に量子トンネル効果は低温でのみ顕著に現れる事が知られているが、最近、金表面の実験により室温でも顕著である事がわかってきた。しかし金表面での量子トンネル効果の理論的な説明は進んでいない。量子ダイナミクスを第一原理計算から調べるための手法がようやく整備された。本研究では超列計算機を用いて密度汎関数法に基づいた経路積分分子動力学法により金(111)表面(図1,図2)における水素の量子効果について説明を進める。



図1: 金(111)表面(再構成前)

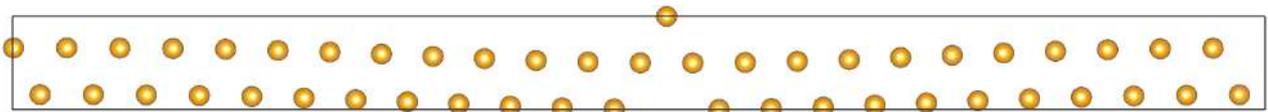


図2: 金(111)表面(再構成後)

磁気秩序由来の強誘電体でのマイクロ波共鳴の非相反性

東北大学理学研究科物理学専攻^A赤池瑞生^A, 増田英俊^A, 小野瀬佳文^ANonreciprocal microwave response in a ferroelectric caused by magnetic order
*Department of Physics, Graduate school of Science, Tohoku University^A*M. Akaike^A H. Masuda^A Y. Onose^A

Keywords : D.M相互作用, 強誘電体, ヘリカル磁性, 非相反性

物質の電氣的・磁氣的性質は物質の持つ対称性に強く依存しており、例えば強誘電性は空間反転対称性の破れを、強磁性は時間反転対称性の破れを要請する。さらに、この二つの対称性が同時に破れている場合にはマルチフェロイクス・電気磁気効果が存在しうる[1]。マルチフェロイクスの一種として磁気秩序由来の強誘電性がある。このタイプの強誘電体ではジャロシンスキ・守谷相互作用の逆の効果によってヘリカル磁気秩序が分極を作り出す[2](図1)。こういった磁気秩序と分極秩序が交わる場合には電気磁気効果が生じうる。電気磁気効果では複素屈折率が電磁波の入射方向で異なるという電磁波応答の非相反性が生じる。さらに、分極発生 of 全く逆のメカニズムで、分極方向を電場で指定することによってヘリカルスピンの巻き方(ヘリシティ)及び非相反性を制御することができる。本研究では、磁気秩序による強誘電体 LiCu_2O_2 におけるマイクロ波共鳴を利用した吸収係数の非相反性を測定すること、さらには電場による非相反性の電氣的制御を目指している。

LiCu_2O_2 (図2)は Cu^+ と Cu^{2+} の2つのCuイオンを含んでおり、 Cu^{2+} が一次元的な配置のヘリカルスピンを担っている。強誘電状態では分極方向とスピンのヘリシティの関連が測定されており[3]、逆DM相互作用に由来する効果と思われる。よって、電気磁気効果による非相反性が生じると予想される。5月現在ではまずマイクロ共鳴の測定を目指している。

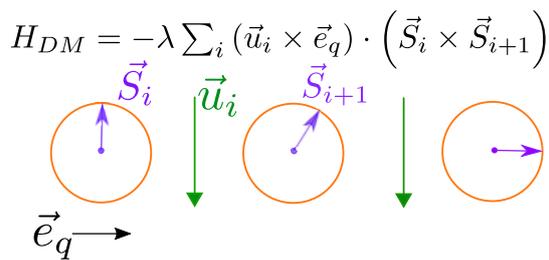
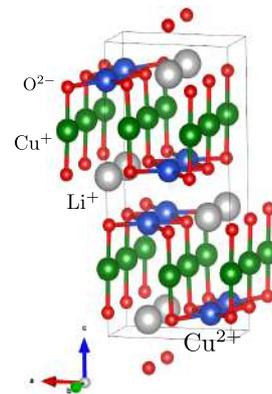


図1: 逆DM相互作用による分極の発生

図2: LiCu_2O_2 の結晶構造[1] W. Eerenstein *et al.*, Nature. **442**, 759-765 (2009).[2] H. Katsura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 027203 (2007).[3] S. Seki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 172201 (2008).

Kitaev chainに現れる 奇周波数クーパー対とマヨラナ粒子の関係

名大工

高木大治郎, 田村駿, 田仲由喜夫

Relationship between odd frequency Cooper pairs
and Majorana fermion appearing in Kitaev chain

Dept. of App. Phys., Nagoya Univ.

Daijiro Takagi, Shun Tamura, Yukio Tanaka

Keywords :

**Kitaev chain, odd-frequency pairing,
Majorana fermion, topological superconductor**

奇周波数クーパー対はマヨラナ粒子と密接に関係し、両者の振る舞いは低振動数の極限で一致する。奇周波数クーパー対はペア振幅が奇関数の周波数依存性を持つ新奇なクーパー対である。一方で、マヨラナ粒子は生成と消滅が等しい準粒子で、トポロジカル超伝導表面にゼロエネルギー状態として現れる。両者の関係について、奇周波数クーパー対はマヨラナ粒子を伴うことが明らかにされている [1].

トポロジカル超伝導体の代表的なモデルとして、1次元 p_x 波超伝導体の Kitaev chain がある。Kitaev chain のハミルトニアンは以下のように書ける:

$$\mathcal{H} = -t \sum_j \left(c_j^\dagger c_{j+1} + c_{j+1}^\dagger c_j \right) - \mu \sum_j c_j^\dagger c_j + \sum_j \left(\Delta c_j^\dagger c_{j+1}^\dagger + \text{H.c.} \right), \quad (1)$$

ただし、 j : サイト, t : ホッピング, μ : ケミカルポテンシャル, Δ : ペアポテンシャルである。この系は $|\mu| < 2t$ のときトポロジカル相であることが知られている。

本研究では、Kitaev chain の半無限系を考える。この系に再帰グリーン関数法 [2] を用いることで、奇周波数クーパー対およびマヨラナ粒子の空間依存性を数値的に比較した。また、 $\Delta = t$ の場合については解析的な計算を行った。その結果、トポロジカル転移点近傍を含むトポロジカル領域において、奇周波数クーパー対とマヨラナ粒子の振る舞いが低振動数の極限で一致することを明らかにした [3].

[1] Y. Asano and Y. Tanaka: Phys. Rev. B **87** (2013) 104513.

[2] A. Umerski: Phys. Rev. B **55** (1997) 5266.

[3] D. Takagi, S. Tamura, and Y. Tanaka: arXiv:1809.09324 (2018).

薄膜化したワイル半金属における電子状態

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻

高見澤大知

Electronic state in a thin film form of Weyl semimetals
Department of Applied Physics, The University of Tokyo
Taichi Takamizawa

Keywords: トポロジ、ワイル半金属

ワイル点と呼ばれる特異点を有するトポロジカルなバンド構造を持つワイル半金属は、ワイル点周りのベリー曲率に由来する特異な量子伝導現象を生じることから大きな注目を集めている。最近、シャンダイトと呼ばれる物質の一つである $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ において巨大な異常ホール効果が観測された[1]。この物質は、Coイオンからなるカゴメ格子が積層した擬 2 次元的な構造を持つ強磁性金属である。第一原理計算によって求められた電子状態には、フェルミエネルギー付近にワイル点が見出され、異常ホール効果の原因とされている。さらに、この物質を薄膜化することで、量子異常ホール効果が現れる可能性が理論的に示唆されている[2]。しかしながら、ワイル半金属は 3 次元系に現れる電子状態であるため、2 次元性の強い薄膜において、その電子状態がどのように変化するかは自明ではない。さらに $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ では、強磁性による時間反転対称性の破れがワイル半金属を実現するうえで本質的な役割を果たしているが、薄膜化によって磁性が変化することも考えられる。これらの問題を念頭に置いて、本研究では、3 次元から 2 次元へと系が変化する際に、ワイル半金属の性質がどのように変化するかを理論的に明らかにすることを目的としている。本発表では、ワイル半金属に対するいくつかの理論模型を用いて、系が薄膜化に伴って 3 次元から 2 次元へ移行する際に、ワイル半金属に特有なフェルミアークと呼ばれる表面状態がどのように変化するかについて調べた結果を議論する。

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

[2] L. Muechler *et al.*, preprint (arXiv:1712.08115).

擬スピン $3/2$ の系におけるコンダクタンスの理論

発表者: 金澤 彰太郎^A, 共同研究者: 小林 伸吾^{A,B}, 川口 由紀^A
名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻^A 名古屋大学高等研究院^B
Theory of tunneling conductance in $j=3/2$ superconductors

Shotaro Kanazawa^A, Shingo Kobayashi^{A,B}, Yuki Kawaguchi^A

Department of Applied Physics, Nagoya University^A

Institute for advanced research, Nagoya University^B

Keywords : spin-orbit coupling, charge transport, Superconductivity

電子には電荷の他にスピンという自由度があります。スピン自由度はスピン軌道相互作用を通して物性に影響します。このスピン軌道相互作用は非常に小さな電力で制御できるため、スピントロニクスへの応用が期待されています。磁場で制御していたスピンを電氣的に制御することにより電気回路をより単純化することが可能になります。そのため、スピン軌道相互作用は特にデバイス開発において研究されています [1]。また、スピン軌道相互作用は超伝導体において重要な役割を果たしています。超伝導体中では、電子がクーパー対というペアを組んでいます。スピン軌道相互作用の影響でスピンの揃ったクーパー対が現れます。このクーパー対はスピンを運ぶことができ、超伝導スピントロニクスという新しい分野を切り開いています [2]。

近年、擬スピン $j=3/2$ を持つ超伝導体 (YPtBi) が発見されました [3]。ここで、擬スピンとはスピンと軌道自由度を合成したものです。 $j=1/2$ の超伝導体の場合はシングレットもしくはトリプレットのクーパー対が実現されます。一方で $j=3/2$ の超伝導体ではクインテット (五重項) もしくはセプテット (七重項) も許されます [4]。これらのクーパー対により新奇な超伝導現象が期待できます。

本研究では $j=3/2$ のスピンをもつ超伝導のトンネルコンダクタンスの計算を行いました。三次元の常伝導/超伝導接合を考え、トンネルコンダクタンスを計算しました。トンネルコンダクタンスより、クーパー対の対称性を推測することができます。もし従来と異なるクーパー対が実現されていることが分かれば、超伝導スピントロニクスに新しい自由度を与えることができると考えています。

参考文献

- [1] I.M.Miron,G.Gaudin,S.Auffret,b.Rodmacq,*et al.*, Nature Materials volume **9**, 230 (2010)
- [2] Jacob Linder and Jason W. A. Robinson Nature Physics **11**, 307 (2015)
- [3] N. P. Butch, P. Syers, K. Kirshenbaum, A. P. Hope, and J. Paglione Phys. Rev. B **84**, 220504(R)
- [4] P. M. R. Brydon, Limin Wang, M. Weinert, D. F. Agterberg Phys. Rev. Lett. **116**, 177001 (2016)

アクティブマターにおける「量子異常ホール効果」

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻^A

曾根和樹^A, 蘆田祐人^A

Anomalous Topological Active Matter

Department of Applied Physics, University of Tokyo^A

Kazuki Sone^A and Yuto Ashida^A

Keywords : アクティブマター, トポロジカル絶縁体, 量子異常ホール効果, 流体方程式, 非エルミート系, active matter, topological insulator, quantum anomalous Hall effect, hydrodynamic equation, non-Hermitian systems

トポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル物質は物性物理においてホットなテーマとなっている。近年になって、開放系などを記述する非エルミート系や結合振動子、流体、光学系などの古典的な系においても同様の性質を持つ系が存在することが分かってきている。それらは、試料の端に局在し、摂動や不純物に対し安定に存在するエッジモードを持ち、その安定性や局在性から工学的応用可能性も高いと期待される。一方で、動物や生体分子のように内部に蓄えたエネルギーを利用して自ら動く能力を持った粒子やその集合体をアクティブマターと呼び、統一的に扱う研究が盛んに行われている。アクティブマターは生物系のモデルとして、また新たな非平衡現象が創発する舞台として大きな役割を持つと考えられている。最近のいくつかの研究でトポロジカルなエッジモードを持つアクティブマターの系が考案された。それらの系では定常流が持つ全渦度を全実効磁場として利用することで、トポロジカルな現象として知られる量子ホール効果の対応物を構成している。しかし、定常流の全渦度を残すために特殊な構造や回転力を与える必要があり、それらが無いようなより自然な条件の下では全渦度が0になることが示せる。我々の研究では、全磁場を必要としない量子異常ホール効果との対応物を構成することで、より自然な状況の下でトポロジカルなエッジモードを持つアクティブマターの系を発見した。これにより、実験的な実現性が上がり、生体现象の解析などへの応用可能性も広がった。

今回の発表では先行研究の簡単なレビューを行いつつ、我々の研究結果をエッジモードの存在を示す数値計算の結果も交えて紹介する。

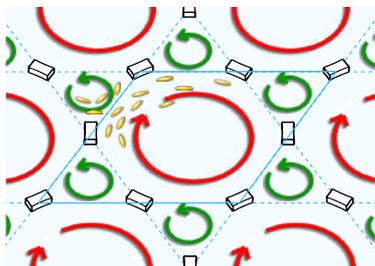


図 1: 量子異常ホール効果と対応するアクティブマターの系

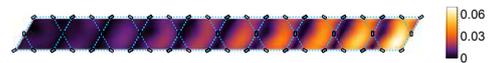


図 2: エッジモードの振幅の空間分布

[1] K. Sone and Y. Ashida, arXiv: 1905.08999.

イジングマシンを用いたベイズ的最適化

東北大情報^A, 東工大科技院^B, (株) Jij^C, (株) シグマアイ^D, (株) デンソー^E
越川亜美^A, 大関真之^{ABCD}, 門脇正史^E, 観山正道^{ACD}, 田中和之^A

Combinatorial Bayesian Optimization using Ising solvers

Graduate School of Information Sciences, Tohoku Univ.^A
Institute of Innovative Research, TITech^B Jij Inc.^C Sigma-i Co. Ltd.^D
DENSO CORP.^E

Ami S. Koshikawa^A, M. Ohzeki^{ABCD}, T. Kadowaki^E, M. J. Miyama^{ACD}, and
T. Tanaka^A

Keywords: ベイズ的最適化, 量子アニーリング, スピングラス, Bayesian Optimization, Quantum Annealing, Spin Glass

ベイズ的最適化とは、関数形が不明な関数に対して逐次に入出力の情報を得ることで関数値の最小化を試みる手法である。この手法は、入力値を指定してから出力値を得るまでに非常にコストがかかる場合に使用され、例えば機械学習やマテリアル設計等に用いられている。近年提案された組合せ問題に対するベイズ的最適化 [1] では、獲得関数に Quadratic unconstrained binary optimization (QUBO) 形式を導入し、最適化にシミュレーテッド・アニーリング (SA) と半正定値計画問題 (SDP) を用いた。この最適化はアルゴリズムの計算時間や収束性で重要な部分である。本研究ではさらに、量子アニーリングマシンである D-Wave 2000Q と、富士通デジタルアニーラ (DA) を用いて性能比較を行なった。図 1 は、スピンの数が 10 の Sherrington-Kirkpatrick 模型のスピングラス相に対して本手法を適用した結果である。左側は局所磁場がない場合、右側は局所磁場をかけた場合を示している。横軸は繰り返し回数を、縦軸は残留エネルギーを示す。実線は 10 回同じ問題を解いた時の平均値を示しており、網掛け部分はその標準偏差を示す。本手法はランダムサーチと比較して短いステップで最適解に到達できたが、今回の計算条件では、用いたソルバーの違いによる性能の違いは大きく見られなかった。

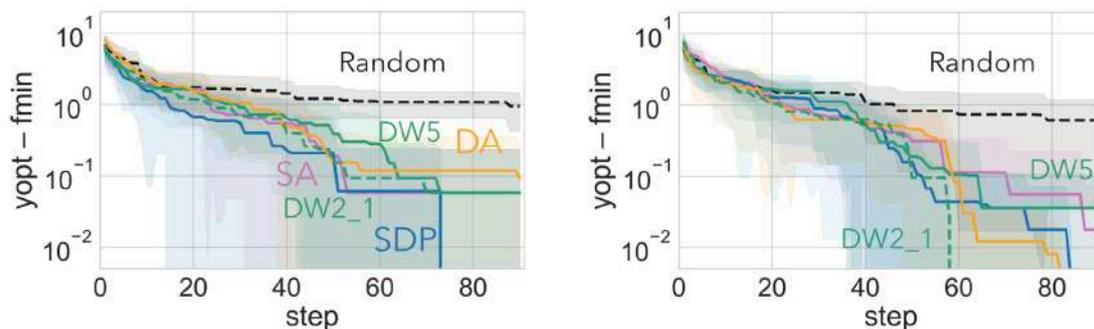


図 1: SK 模型のスピングラス相の問題に本手法を適用した場合の、ベイズ的最適化の繰り返し回数と残留エネルギーの関係。(左) 局所磁場がない場合 (右) 局所磁場がある場合。線は 10 回同じ問題を計算した時の平均値を示し、網掛け部分はその標準偏差を示す。黒破線はランダムサーチの結果を示す。マゼンタ、青、緑実線、緑破線、オレンジは獲得関数の最適化をする際に用いたソルバーの違いを示しており、それぞれ SA, SDP, D-Wave 2000Q, D-Wave 2000Q low-noise, 富士通 DA の結果である。

[1] R. Baptista and M. Poloczek, Proceedings of the 35th ICML, **80** (2018) 462.

リヒテンベルク図形のシミュレーションと分岐解析

北海道大学大学院理学院物性物理学専攻
八重尾 剣三朗

Simulation and bifurcation analysis of the Lichtenberg figure
Graduate School of Science Hokkaido University
Department of Condensed Matter Physics
Kenzaburo Yaeo

リヒテンベルク図形とは、絶縁体の内部や表面に絶縁破壊が起こった際にみられる分岐パターンである。空气中を進展する雷の放電はリヒテンベルク図形の一つである。これまでに、リヒテンベルク図形に対していくつかのシミュレーションモデルが提案されている。本研究では、絶縁破壊モデル[1]を用いてリヒテンベルク図形を数値的に生成し、その分岐の構造を実際のリヒテンベルク図形と比較する。

絶縁破壊モデルとは、次のような確率過程である。破壊された点のつくるクラスターが等電位となるような電位分布を計算する。この電位分布に基づいて次の破壊点を確率的に選択し、クラスターを成長させる。新たなクラスターが等電位となるように電位分布を再度計算し、クラスターを成長させていく。

分岐構造を解析する手法として、本研究ではホートンの第1法則に注目する。分岐パターンにおいて、末端の枝を1次、1次の枝が合流した枝を2次、という要領で枝の次数づけをおこなう

(図1)。次数 ω の枝の本数を N_ω とすると、多くの分岐パターンで

$$N_\omega \propto R_b^{-\omega}$$

という関係式(ホートンの第1法則)が成り立つことが知られている[2]。 R_b は分岐比と呼ばれ、分岐の構造を特徴づける量である。

絶縁破壊モデルのシミュレーションにより得られた分岐パターンを図2に示す。この図形に対する分岐解析の結果(図3)より、分岐比 $R_b = 4.4$ が得られた。実際のリヒテンベルク図形の画像から求めた分岐比は $R_b = 4.0$ であり、絶縁破壊モデルによる分岐比は実際に分岐比に近い値であることが分かった。

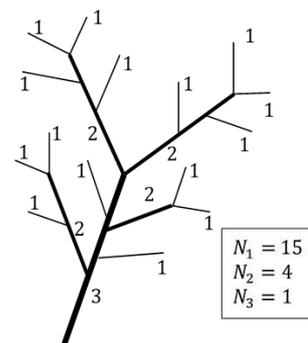


図1 枝の次数づけ

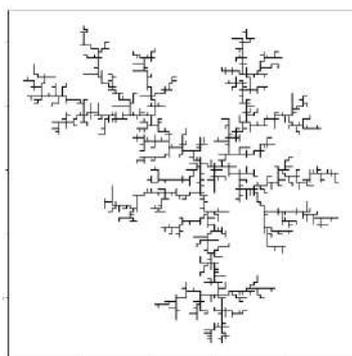


図2 シミュレーション結果(クラスターサイズ 1500)

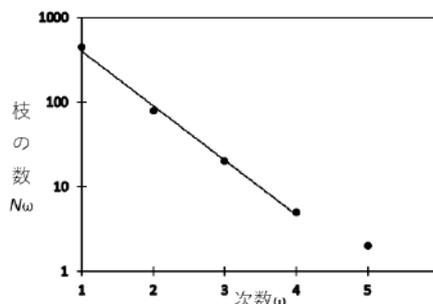


図3 図2のパターンの分岐解析の結果。分岐比は $R_b = 4.4$

参考文献

- [1] L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann, Phys. Rev. Lett. **52**, pp. 1033-1036 (1984).
- [2] 桃井緑美子訳, フィリップ・ボール著, 『枝分かれ』、早川書房、2012.

断熱量子計算のための2体ハミルトニアンによる誤り抑制

大阪大学 基礎工学研究科
鈴木遼太郎

Keywords: 断熱量子計算、誤り訂正理論、ハミルトニアンガジェット

量子情報をノイズの影響から守ることは、量子コンピュータを実現するための大きな課題である。量子コンピュータには様々なモデルがあり、特に回路モデルにおいては量子誤り訂正理論の研究が数多くなされてきた。一方で、断熱量子計算モデルの誤り訂正理論は回路モデルに比べて未発達である。断熱量子計算は、初めにイジング模型の基底状態を求めるために考案され、後に最適化問題にも適用できることが分かった^[1,2]。さらに、回路モデルと解ける問題のクラスが等価であることも示された^[3]。

断熱量子計算の誤りを訂正する方法は未解決問題であるが、誤りを抑制する方法についてはいくつか知られている。最初に提案された方法は、stabilizer 符号を用いた理論である^[4]。しかしこの方法では、任意の量子計算を行うためには6体ハミルトニアンを用いる必要があり、物理的には実現しがたい。物理的に実現しやすい2体ハミルトニアンを用いて量子計算を行いたい、stabilizer 符号では誤り抑制をすることが不可能であると証明された^[5]。これを解決するために、stabilizer 符号を非可換な演算子に一般化した、subsystem 符号を用いて誤り抑制する方法が提案された^[6,7]。面白いことに、1次元横磁場イジングモデルは、2体ハミルトニアンでも誤り抑制されることが示された。しかし、任意の量子計算を行うためには2次元横磁場イジングモデルを用いなければならない。この発表では、subsystem 符号を用いても、2体ハミルトニアンでは2次元イジングモデルを誤り抑制できないことを示し、さらに摂動論を用いて近似的に2体ハミルトニアンによって万能断熱量子計算を誤り抑制できることを示す。

- [1] T. Kadowaki *et al.*, Phys.Rev.E. 58,5 (1998)
- [2] E. Farhi *et al.*, arXiv:quant-ph/0001106(2000)
- [3] D. Aharonov *et al.*, SIAM Rev., 50(4), 755–787. (2008)
- [4] S. P. Jordan *et al.*, PHYSICAL REVIEW A 74, 05322(2006)
- [5] I. Marvian *et. al*, PRL 113, 260504 (2014)
- [6] Z. Jiang *et al.*, Quantum Inf Process (2017)
- [7] M. Marvian *et al.*, PRL 118, 030504 (2017)

全結合強磁性 p スピンモデルに対しての

リバースアニーリングのダイナミクス

東京工業大学 理学院^A, 東京工業大学 科学技術創成研究院^B
東北大学 情報科学研究科^C 南カリフォルニア大学^D
山城 悠^A, 大桑 雅己^A 西森 秀稔^{B,C} ダニエル A. リダー^{B,C}

Dynamics of reverse annealing for the fully-connected p-spin model

^A*Department of Physics, Tokyo Institute of Technology,*

^B*Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology*

^C*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University*

^D*Departments of Electrical Engineering, Chemistry, and Physics & Astronomy,
University of Southern California*

Yu Yamashiro^A, Masaki Ohkuwa^A, Hidetoshi Nishimori^{B,C}, Daniel A. Lidar^D

Keywords: 断熱量子計算, 量子アニーリング, Adiabatic quantum computation, Quantum annealing

量子揺らぎを用いたメタヒューリスティックとして、量子アニーリングが提案され注目を集めています。また、横磁場のみを用いた量子アニーリングが主に用いられていますが、最近、拡張された形式の量子アニーリングによってアルゴリズムの性能を向上させる研究が行われています。興味深い手法として、リバースアニーリングと呼ばれる古典的初期状態に対して横磁場による揺らぎで解空間を探索する手法が提案され、量子アニーリングの計算時間を指数的に増大させると考えられている量子一次相転移を回避するという結果が統計力学的な解析によって示されました[1]。我々は横磁場量子アニーリングの拡張の一つであるリバースアニーリングが量子ダイナミクスにおいて実際に指数関数的に従来の量子アニーリングより優れていることを数値計算により示し、さらに D-Wave デバイスと同じプロトコルのリバースアニーリングの量子ダイナミクスの結果を示します。

[1] Masaki Ohkuwa, Hidetoshi Nishimori, and Daniel A. Lidar, Phys. Rev. A 98, 022314 (2018).

PS-91

非線形系における Stochastic electrodynamics

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻
山本 有理子

Stochastic electrodynamics of non-linear system
Department of Nuclear Engineering, Kyoto University
Graduate School of Engineering
Yuriko Yamamoto

Keywords : stochastic electrodynamics, 非線形

Stochastic electrodynamics(SED) とは、与えられた力と空間全体を満たすゼロ点場 (ZPF) による力の作用下における荷電粒子の系を取り扱う理論であり、また、完全に古典的な電磁力学、すなわち、ニュートン力学とマクスウェルの電磁理論によって成り立っている。この理論は、1960年代に Trevor Marshall[1] や、1970年代に Timothy Boyer[2] によって発展し、いくつかの線形系に対しては古典的にも関わらず量子力学や量子電磁力学の結果と一致している一方で、非線形系などにおいては結果が一致しない。そのため、非線形系に対して慎重に SED を使うことが重要となる。

本ポスター発表では、SED についての概説、及び、[3] のレビューを行う予定である。[3] は非線形系の例である水素原子の基底状態について SED におけるシミュレーションを行なっている。

[1] T.W. Marshall, Proc. Roy. Soc. A **276**, 475 (1963)

[2] T.H. Boyer, Phys. Rev. D **11**, 790 (1975)

[3] Th.M. Nieuwenhuizen, M.T.P. Liska, Phys. Scr. **T165**, 014006 (2015)

リバーサアニーリングを用いた CDMA の統計力学的解析

東北大学大学院 情報科学研究科^A, 東京工業大学科学技術創成研究院^B,
株式会社 Jij^C, 株式会社シグマアイ^D

荒井 俊太^A, 大関 真之^{A,B,C,D}, 田中 和之^A

Statistical physics analysis of code-division multiple-access
multiuser demodulator with reverse annealing
*Graduate School of Information Sciences, Tohoku
University^A, Institute of Innovative Research, Tokyo Institute
of Technology^B, Jij Inc.^C, Sigma-i Inc.^D*

Shunta Arai^A, Masayuki Ohzeki^{A,B,C,D}, Kazuyuki Tanaka^A

Keywords : 情報統計力学, 量子アニーリング, 量子スピングラス

符号分割多重接続 (Code-division multiple access, CDMA) は複数の端末と単一の基地局間の無線通信を実現するための技術の一つであり, 3G の携帯電話や Wi-Fi 等に使われている. 問題設定としては N 人のユーザが原情報 $\xi_i \in \pm 1$ を同期して, 一斉に伝送路を通して基地局に送る状況を考える. 伝送路にはガウスノイズ ϵ^k が存在し, 各ユーザの情報が互いに干渉し合うので, 原情報をそのまま送るだけでは基地局で各ユーザの情報を特定することは困難である. そこで CDMA では拡散符号と呼ばれるランダムに生成されるビット列 $\eta_i^k \in \pm 1 (i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K)$ を利用して変調を行う. K は各ユーザに予め割り当てられている拡散符号の長さを表す. ユーザは原情報 ξ_i をそのまま送る代わりに拡散符号をかけた $\sum_{k=1}^K \eta_i^k \xi_i$ を送る. 基地局では

$$y^k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \eta_i^k \xi_i + \epsilon^k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (1)$$

を受け取る. 基地局ではこの信号と拡散符号を利用して, 事後分布を求め復調を行う. 復調の理論的な評価はレプリカ法を用いることで可能である. 今回は量子揺らぎを用いて, 復調を行う場合を考える. 先行研究では量子揺らぎを用いた復調は熱揺らぎのみを用いた復調に比べ, 性能が悪化すると報告している [1].

本研究ではリバーサアニーリング [2] と呼ばれる手法を CDMA の問題に適用することで上記の問題が解消するのかを解析する. リバーサアニーリングは前回の解を利用し, その周辺を量子揺らぎを用いてローカルサーチするというアルゴリズムである. このアルゴリズムは最近話題に上がることが多い量子アニーラにも実装されている. 前回の推定結果を利用して再度アニーリングを繰り返すことで, よりエネルギーの低い解を得ることが期待されるが, どの程度現情報に近い情報を持っていれば復調が効率的に行われるかは非自明な問題である. 本研究では量子揺らぎを用いてモデル化した CDMA に対して, リバーサアニーリングの枠組みで定式化を行い, 最初に用意する解の候補がどの程度真の解に近ければ推定の効率が向上するのかをレプリカ法を用いて性能評価を行った [3].

[1] Y.Otsubo et al, Phys.Rev.E, 2014

[2] M.Ohkuwa et al, Phys.Rev.A, 2018

[3] S.Arai et al, in preparation

PT 対称な非ユニタリー 3 ステップ量子ウォークにおけるバルク-エッジ対応とエッジ状態の時間発展

北大工^A, 京大理^B

河崎真樹男^A, 望月健^A, 川上則雄^B, 小布施秀明^A

Bulk-edge correspondence and dynamics of multiple edge states of a non-unitary three-step quantum walk with PT symmetry

Hokkaido Univ.^A, Kyoto Univ.^B

Makio Kawasaki^A, Ken Mochizuki^A, Norio Kawakami^B, Hideaki Obuse^A

Keywords : 非エルミート系、量子ウォーク、バルク-エッジ対応

近年、非エルミートなハミルトニアンで有効的に記述される開放系が注目を集めている。非エルミートなハミルトニアンがパリティ-時間反転 (PT) 対称性を有する場合、全ての固有エネルギーが実数になり得り、それに伴う特異な現象が起こることが予測されている。PT 対称な量子系は、光子の流出効果を取り入れた非ユニタリーな量子ウォークによって実験的に実現され [1]、エッジ状態の存在確率が時間発展に伴い他状態の存在確率と比較して指数関数的に大きくなることなどが示された。

非エルミート性は、系のトポロジカルな性質をより豊かにする。非エルミート系では、二種類のギャップが現れることや、対称性クラスの数が増えることが明らかになった [2]。さらに、エルミート系では成立するバルク-エッジ対応が、非エルミート系では成立しなくなることが報告されている。しかし、非エルミート系でバルク-エッジ対応が成立しなくなる理由は未だ完全には理解されていない。

本研究では、高いトポロジカル数を有する PT 対称な開放量子系のバルク-エッジ対応を調べるために、[1] の拡張研究として、PT 対称な非ユニタリー 3 ステップ量子ウォークを調べた [3]。数値的にバルク-エッジ対応が成立していることを検証した他、通常の量子ウォークの実験で得られる確率分布の時間変化から、エッジ状態の数を識別する方法を提案した。

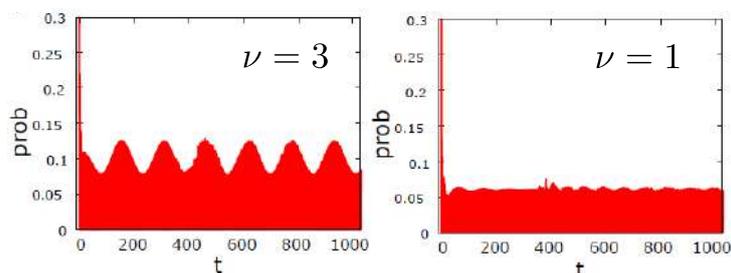


図 1: 粒子の存在確率の時間変化。左:エッジ状態数が 3 の場合。右:エッジ状態数が 1 の場合。

[1] L. Xiao, *et al.*, Nat. Phys. **13**, 1117 (2017).

[2] K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Ueda, and M. Sato, arXiv:1812.09133.

[3] M. Kawasaki, K. Mochizuki, N. Kawakami, and H. Obuse, arXiv:1905.11098.

PS-95

von-Neumann 代数を用いた線形応答理論の研究

所属 東北大学理学研究科, 材料科学高等研究所^A,
東北大学材料科学高等研究所^B
発表者 奥村聡^A, 共同研究者名 Max Lein^B

Keywords : von-Neumann 代数, 同時観測可能, 線形応答理論

物理量の測定に関する公理として以下が要請される :

要請 1. (i) 物理量 A に同伴するスペクトル測度を E_A とする. 任意の Borel 集合 $J \subset \mathbb{R}$ に対して, $X(A, \psi)$ の値が J に属する確率, すなわち測定値が J の中に属する確率は $\frac{\|E_A(J)\psi\|^2}{\|\psi\|^2}$ に等しい.

(ii) 物理量 A を測定したとき, 測定値が集合 J の中に見出されたとすれば, 測定直後の状態は, 演算子 $E_A(J)$ の値域 $R(E_A(J))$ の要素によって記述される状態となる.

(ii) について, 一般に, 単独の物理量の測定では状態ベクトルまでは定まらないことを意味する. 雑に言うと, 物理量 A の測定によって, $a \in \mathbb{R}$ という値が得られたとき, その直後の状態は物理量 A が a の値をもつ状態であるが, そんな状態は一意的に定まるかどうかはわからないということである. 例えば, スピンをもつ量子的粒子 1 個からなる量子系において, 粒子の位置だけを測定し, ある値が得られたとしてもスピンの状態がどうなっているかについてはよくわからないままなので, そのような測定によって状態は一意的に指定されていない. この場合, 状態を詳細に指定しようとするならば, スピンの測定も行う必要がある. 発表では, このような状態の詳細な指定をすることとき, 自然な構造として von-Neumann 代数が現れることを見る.

また, このような von-Neumann 代数を用いるのは数学的な抽象化としての側面を持つだけでなく線形応答理論への応用があることを見る.

[1] 新井朝雄 量子力学の数学的構造 I,II, 朝倉書店, (1998).

[2] 新井朝雄 量子現象の数理, 朝倉書店, (2006).

[3] G.D.Nittis and Max Lein, *Linear Response Theory An Analytic Algebraic Approach*, Springer-Verlag, (2017).

[3] Jacques Dixmier, *Von Neumann Algebras*, Elsevier, (1981).

[4] O. Bratteli and D.W. Robinson, *Operator Algebras and Quantum Statistical Mechanics 1*, Springer-Verlag, (1987).

[5] O. Bratteli and D.W. Robinson, *Operator Algebras and Quantum Statistical Mechanics 2*, Springer-Verlag, (1997).

[6] 竹崎正道 作用素環の構造 岩波書店, (1983).

エキシトニック絶縁体の熱伝導率について

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
寶田真太

Thermal conductivity of excitonic insulator
Department of Physics, University of Tokyo
Shinta Takarada

Keywords : エキシトニック絶縁体, excitonic insulator

半導体や半金属中で、電子と正孔がクーロン力によって束縛状態 (エキシトン) を形成し、それがBCS的あるいはBEC的に凝縮した状態はエキシトニック絶縁体と呼ばれる。これについては、1960~70年代にその存在が予測され理論的に様々な議論がされてきた。その一つに、エキシトニック相において液体 He の超流動に類似した低温での超熱流が期待されたが、理論計算によるとそのような超熱流は起こらないことがわかった、ということがある [1][2]。

しかし、近年エキシトニック絶縁体の候補物質が実際に見つかるようになり、2004年にはエキシトニック絶縁体候補物質の $\text{TmSe}_{0.45}\text{Te}_{0.55}$ において、低温での熱伝導率の増大が観測された [3]。この研究によると $\text{TmSe}_{0.45}\text{Te}_{0.55}$ の相図と熱伝導率は下図 1、2 のようになる。この図を見ると、特定の圧力下で低温での熱伝導率の増大、転移温度付近での熱伝導率の増大など、熱伝導率の特徴的な温度依存性が見られている。

[2] の理論計算によると熱伝導率は温度とともに減少すると考えられており、実験で得られたような熱伝導率の増大は起こらないように思われる。本研究では、このような増大の原因としてエキシトン素励起による熱伝導が起こっている可能性を考え、数値計算を通してその原因を探る。

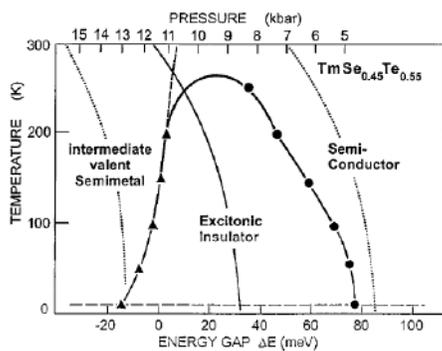


図 1: $\text{TmSe}_{0.45}\text{Te}_{0.55}$ の相図 [3]

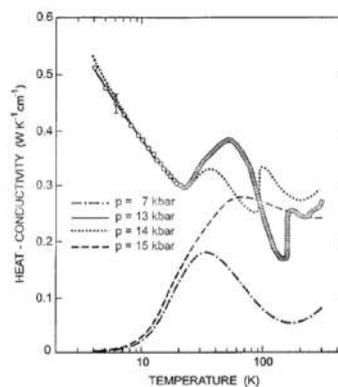


図 2: $\text{TmSe}_{0.45}\text{Te}_{0.55}$ の熱伝導率 [3]

- [1] 間瀬正一 日本物理学会誌 **28**, 596 (1973).
- [2] J.Zittartz, Phys. Rev. **165**, 605 (1968).
- [3] P.wachter *et al.*, Phys. Rev.B **69**, 094502 (2004).