

# 統計物理学研究室

## 1. メンバー

教授：根本 幸児	011-706-3441	<a href="mailto:nemoto@statphys.sci.hokudai.ac.jp">nemoto@statphys.sci.hokudai.ac.jp</a>
准教授：北 孝文	011-706-2687	<a href="mailto:kita@phys.sci.hokudai.ac.jp">kita@phys.sci.hokudai.ac.jp</a>
助教：奥田 浩司	011-706-3442	<a href="mailto:okuda@statphys.sci.hokudai.ac.jp">okuda@statphys.sci.hokudai.ac.jp</a>
助教：速水 賢	011-706-2694	<a href="mailto:hayami@phys.sci.hokudai.ac.jp">hayami@phys.sci.hokudai.ac.jp</a>

DC3：須田 祐介, 司 嘯天

DC2：Joshua Ezekiel Sambo, 河野 航,

DC1：大内 まり絵

MC2：佐藤 駿哉, 円谷 允俊, 三浦 孝祐, 森田 大貴,

Muhammad Zafur Abror Rajabi, 桐越 研光, 八代 愛美

MC1：中田 康仁, 比嘉 駿, 白川 義朗, 松本 拓哉, 村田 達志

B4：疋田 理樹, 口町 和香, 鶴谷 周平, 山家 椋太

## 2. 研究成果

根本 幸児：

### マスター方程式によるネットワーク上の感染症ダイナミクスの解析

感染モデルとしてよく知られているモデルの一つにsusceptible-infected-susceptible (SIS) 感染モデルがあるが、このモデルでは感染率に対して「死滅-蔓延」転移が連続転移であり、爆発的な感染症の広がりを説明することができない。そこで我々はレギュラーランダムグラフ上でSISモデルの一つの拡張であるsusceptible-weakened-susceptible-infected-susceptible (SWSIS) 感染モデルの振る舞いについて調べた。これはこれまで我々が調べたSWSISモデルの拡張でありより新奇な転移の存在が期待されていた。まず、SISモデルとの類似点として(1)転移点が初期感染者割合 $\rho$ に依存すること、相違点として(2) $\rho$ の値に関わらず不連続転移になることを示した。まず、平均場方程式よりその転移の定性的なメカニズムを解析し、つぎにモンテカルロシミュレーションで実際にそのような振る舞いを引き起こすことを確かめた。さらに、対応するAMEを用いて数値計算を行いそれがシミュレーションと合致する結果を示すこと、およびそこから転移の様子を表す相図を作ること成功した。また、コミュニティ構造を持つネットワークとしてSISモデルとSWSISモデルとのハイブリッドモデルを提案し、そのAME方程式を分析すると、平均場解析を越えた新たな方法として有力であることがわかり、実際にその拡張に成功した。レギュラーランダムグラフでの数値解析も可能なフレームワークとなっているので今後の解析に役立つものと期待される。

北 孝文:

### 1. 超伝導体における帯電効果

磁場中の金属や半導体では、ローレンツ力に起因する帯電が起こる。超伝導体では、このローレンツ力による帯電に加えて、ペア・ポテンシャルが空間的に変化することに起因する帯電効果、状態密度に傾きがあることによる帯電効果も重要になる。それらを微視的・定量的に評価する方程式を導出し、3つの帯電機構の相対的な大きさを理論的に評価した。

### 2. 超伝導体における粒子数・位相揺らぎの起源

超伝導の基底状態に対するバーディーン・クーパー・シュリーファー(BCS)波動関数を、多体相関を取り込みに拡張した。そして、相関効果により凝縮相と準粒子相に揺らぎが生じ、凝縮粒子数の揺らぎが生じることを明らかにした。そして、この機構により、孤立超伝導体においても、位相が確定しているという提案を行った。

### 3. 非一様なボーズ-アインシュタイン凝縮相に対する変分理論

一様なボーズ-アインシュタイン凝縮(Bose-Einstein condensation, 略してBEC)相に対する多体相関を取り込んだ変分波動関数を、非一様系に拡張し、そのエネルギーや安定性を議論した。

### 4. ボーズ-アインシュタイン凝縮相における臨界揺らぎ

BEC相の素励起は、従来、長波長で音波の分散関係を示すボゴリョボフ・モードであると広く考えられてきた。しかし、ボゴリョボフ理論から出発して摂動展開理論を構成すると、赤外発散が現れ、意味のある結果が得られない。そこで、新たなアプローチとして、汎関数繰り込み群の手法をBEC相に適用できるように定式化した。そして、ボゴリョボフ・モードが、有限温度の4次元以下、絶対零度の3次元以下で存在しないことを明らかにした。(T. Kita, arXiv: 1903.05230)

奥田 浩司:

### 1.有限時間熱機関の研究

非平衡現象の理論的研究として、有限時間熱機関の研究をおこなった。物理学では、熱機関の効率は熱力学の基本的課題として古くから扱われてきた。特に重要な結果は、熱機関の効率の上限を与えるCarnot 効率の発見である。通常Carnot 効率が実現されるのは、準静的極限の場合だけである。しかし、準静的熱機関は無限の時間をかけて有限の仕事を取り出すという点で、パワー（仕事率）が0であり、現実的な熱機関としては役に立たない。現実の熱機関は、有限時間で動作することで効率を犠牲にする代わりに有限のパワーを得ている。そこで、準静的でない有限時間で動作する熱機関の性質を調べることは熱力学の重要な課題である。

この分野の理論的な興味として、熱機関の効率とパワーの関係に関して最近重要な進展があった。準静的な可逆熱機関が Carnot効率を達成できることは平衡熱力学の帰結である

が、（有限パワーの）有限時間熱機関が Carnot 効率を達成できるかどうかは平衡熱力学の範囲内では答えの出ない問題である。この問題に対し、Shiraishi ら(2016)は、マルコフ過程に従う熱機関という十分に一般的な枠組みの中で、効率とパワーの間にはトレードオフ関係がある、つまり、効率を Carnot 効率に近づけようとすればパワーが 0 に近づいてしまうことを示した。しかし一方で、具体的な熱機関のモデルの研究において、有限パワーで Carnot 効率の熱機関が実現できるという結果がいくつか出てきている。例えば、Holubec ら(2017)は、ブラウン粒子を用いた有限パワーカルノーサイクルにおいて Carnot 効率を実現できることを示した。

この結果に着目して、M2 学生の三浦孝祐君、名古屋大学の泉田勇輝氏とともに研究をおこない、有限パワーブラウン粒子カルノーサイクルでは、Holubec らが用いていた特殊なプロトコルに限らず、さまざまなプロトコルで Carnot 効率を実現できることを示すことができた。しかし、Holubec らのブラウン粒子カルノーサイクルのモデル自体に問題があることが見付き、その問題を解決することができるかを現在研究中である。

## 2.非局所結合振動子系のキメラ状態の研究

単純な動力学系がたくさん集合した系では、その間の相互作用によりマクロに複雑な動的現象がしばしば現れる。それを理解するための重要なキーワードが同期現象であり、同期現象の理論的研究に最もよく用いられる基本的モデルが結合振動子系である。

この研究は、D3 学生の須田君と共におこない、1 次元上に並んだ同一振動数の振動子が一定範囲内の他の振動子と相互作用している非局所結合振動子系に現れるキメラ状態を扱った。キメラ状態は、元は全て同一の振動子である系に現れる、振動子が同期している coherent 領域と同期していない incoherent 領域が共存している状態である。キメラ状態は発見から 20 年近く経っているにもかかわらず、力学系としての明確な特徴付けができていない部分も残されている。

我々は、非局所結合位相振動子系において、キメラ状態が集団的に振動している breathing chimera を発見し、この状態が定常キメラからの Hopf 分岐によって生じることを示すことができた。さらに、この状態に適応できるオーダーパラメータの自己無撞着解析手法を開発し、数値シミュレーション結果を説明することができた。

速水 賢:

### 1. トロイダル多極子に対する量子力学的演算子の定式化

固体中における電子は結晶場やスピン軌道相互作用といった様々な要因により、異方的な電荷分布や磁荷分布を示す。このような異方性は多極子によって特徴づけられ、系の電氣的・磁氣的応答や輸送現象を対称性や微視的な観点から理解する上で役に立つ。一般に多極子は空間反転対称性および時間反転対称性の有無に応じて電気多極子、磁気多極子、磁気トロイダル多極子、電気トロイダル多極子の 4 種類に分類されるが、これらの中でも 2

つのトロイダル多極子が原子サイトに“局所的”に誘起される可能性についてはほとんど議論されてこなかった。我々は、電磁氣的なスカラー・ベクトルポテンシャルに関する多極子展開を行うことにより、トロイダル多極子の量子力学的演算子表現を導出に成功した。また、これらの磁気・電気トロイダル多極子が局所パリティ混成系において活性となることを示し、それらが秩序化した際に生じる交差相関現象を明らかにした。

## 2. スピン軌道結合金属におけるNeel/Bloch型スキルミオン

本研究において我々は、スピン軌道相互作用を有する遍歴磁性体模型においてどのような多重Q磁気秩序相が発現するかを詳細に調べた。具体的には、正方格子におけるラッシュュバスピン軌道相互作用をもつ近藤格子模型において、局在スピンと遍歴電子スピン間に働く交換相互作用に関する摂動展開を行い、局在スピン間に生じる有効交換相互作用を導出することにより、有効スピン模型を構築した。得られた模型に対して、モンテカルロ・シミュレーションを行うことにより、どのような磁気秩序相が生じ得るかを系統的に調べ上げ、その結果、波数空間における異方的で対称的な交換相互作用および反対称的な交換相互作用が様々な多重Q磁気秩序相の発現に重要な役割を果たしていることを明らかにした。特に、ラッシュュバスピン軌道相互作用を有する磁性体模型において、従来のNeel型スキルミオンが現れるだけでなく、Bloch型スキルミオンが発現する可能性を理論計算の立場から提案した。

## 3. 固体中における多極子の分類論

多極子は固体中の1原子上の異方的な電荷分布や磁荷分布を表すのに用いられており、電子が強く局在化しているf電子系を中心に研究が進展してきた。ここでは、単純な磁気双極子(スピン)秩序だけでなく、原子に局在した電気四極子や磁気八極子といった非自明な電子自由度が現れ、新しい自発的な秩序や揺らぎをもたらすことが知られている。一方近年では、f電子系のみならず、様々な系における電子自由度を多極子の観点から理解しようとする試みがされている。こうした従来の多極子概念の拡張は、トロイダル多極子や奇パリティ多極子といった更なる非従来型多極子の記述を可能とするため、それに伴う新規物性が期待されている。本研究において我々は、32の結晶点群の元で活性化する多極子自由度とそれらがもたらす物性を網羅的に調べ上げた。まず、実空間および波数空間における多極子の微視的枠組みを構築することにより、4つの多極子(電気多極子、磁気多極子、磁気トロイダル多極子、電気トロイダル多極子)がどのような結晶点群や電子の基底関数において活性となるかを明らかにした。さらに、電子状態におけるバンド構造の変形や、電気磁気効果や磁気弾性効果における応答テンソルの性質を多極子の視点からまとめた。こうした多極子による電子自由度の一般的記述は、輸送現象や励起構造、交差相関現象を統一的に理解・予測する上で有益な情報を与えるだけでなく、電場、電流、スピン流、磁場、弾性場、熱流といった種々多様な外場応答に対するさらなる交差相関現象を示す新規物質の探索に指針をもたらすことが期待される。

### 3. 成果発表（レフェリー制のあるジャーナルには \* 印を付ける）

#### <原著論文>

1. "Sudden spreading of infections in an epidemic model with a finite seed fraction", Takehisa Hasegawa, and Koji Nemoto, \*Euro.Phys.J. B 91 (2018) 58.
2. "Theoretical Analysis of Bistability in Kuramoto Model with Connectivity-Frequency Correlations", Toshiki Nagasaki, Satoru Tokuda, Koji Nemoto, and Masato Okada, \*J. Phys. Soc. Jpn. 87 No.1 (2018) 014004.
3. W. Kohno, T. Kirikoshi, and T. Kita, "*Ground-State Wave Function with Interactions between Different Species in M-Component Miscible Bose-Einstein Condensates*", \*J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 034002 (2018).
4. H. Ueki, M. Ohuchi, and T. Kita, "*Charging in a Superconducting Vortex Due to the Three Force Terms in Augmented Quasiclassical Equations of Superconductivity*", \*J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 044704 (2018).
5. X. Si, W. Kohno, and T. Kita, "*Number-Phase Fluctuations in Isolated Superconductors*", \*J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 104703 (2018).
6. W. Kohno, T. Kirikoshi, and T. Kita, "*Variational Wave Function for Inhomogeneous Bose-Einstein Condensate with 3/2-Body Correlations*", \*J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 124004 (2018).
7. Yusuke Suda and Koji Okuda, "Breathing multichimera states in nonlocally coupled phase oscillators", \*Phys. Rev. E, 97 (2018) 042212.
8. Y. Yanagi, S. Hayami, and H. Kusunose, "*Manipulating magnetoelectric effect -Essence learned from  $Co_4Nb_2O_9$* ", \*Phys. Rev. B **97**, 020404 (2018).
9. S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, "*Emergent odd-parity multipoles and magnetoelectric effects on a diamond structure: implication to 5d transition metal oxides  $AOsO_4$  ( $A=K, Rb, \text{ and } Cs$ )*", \*Phys. Rev. B **97**, 024414 (2018).
10. S. Hayami and H. Kusunose, "*Microscopic Description of Electric and Magnetic Toroidal Multipoles in Hybrid Orbitals*", \*J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033709 (2018).
11. S. Hayami and Y. Motome, "*Néel- and Bloch-Type Magnetic Vortices in Rashba Metals*", \*Phys. Rev. Lett. **121**, 137202 (2018).
12. S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi, and H. Kusunose, "*Classification of atomic-scale multipoles under crystallographic point groups and application to linear response tensors*", \*Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).
13. R. Takagi, J. S. White, S. Hayami, R. Arita, D. Honecker, H. M. Rønnow, Y. Tokura, and S. Seki, "*Multiple- $q$  noncollinear magnetism in an itinerant hexagonal magnet*", \*Sci. Adv. **4**, eaau3402 (2018).

### <会議抄録等>

1. S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, "*Mean-field study of correlation-induced antisymmetric spin-orbit coupling in a two-orbital honeycomb model*", Physica B: Condensed Matter **536**, 649-653 (2018).
2. Y. Yanagi, S. Hayami, and H. Kusunose, "*Theory of magnetoelectric response in  $Co_4Nb_2O_9$* ", Physica B: Condensed Matter **536**, 107-110 (2018).
3. S. Hayami and Y. Motome, "*Multiple-Q Magnetic States in Spin-Orbit Coupled Metals*", IEEE Transactions on Magnetics **55**, 1500107 (2018).

### <著書>

#### 《単著》

1. 北 孝文「演習しよう 熱・統計力学」(数理工学社、2018年4月1日)

4-1. 学術講演(国際学会・国際シンポジウム)(発表者に \* 印を付ける)(開催年月日を入れる)

### <一般講演>

#### 《口頭発表》

1. \*八城 愛美, 速水 賢: 「Odd-parity multipoles and magneto-current effect」The 4th Emallia Conference 2018 (北海道大学、2018年7月23日)
2. \*松本 拓哉, 速水 賢: 「Nonreciprocal magnon excitations on a breathing kagome lattice」The 4th Emallia Conference 2018 (北海道大学、2018年7月23日)

4-2. 学術講演(国内学会・国内その他)(発表者に \* 印を付ける)

### <招待講演>

1. \*速水 賢: 「軌道混成によるハイブリッド多極子」研究会「反転対称無き系における多極子応答」(北海道大学、2018年1月23日)
2. \*速水 賢: 「トロイダル多極子自由度に基づく物質設計」J-Physics トピカルミーティング ものづくりシリーズ第3回「物質探索最前線」(首都大学東京、2018年8月6日~7日)
3. \*速水 賢: 「多極子の拡張・一般化と交差相関物性」日本物理学会 2018年秋季大会 共催シンポジウム講演(同志社大学、2018年9月9日~12日)
4. \*速水 賢: 「フラストレート磁性体におけるスキルミオン結晶相」基研研究会「スピン系物理の最前線」(京都大学、2018年10月31日~11月2日)
5. \*速水 賢: 「結晶点群の下での多極子の分類と交差相関物性」東京大学物性研究所 量子物質セミナー(東京大学物性研究所、2019年12月28日)

## <一般講演>

### 《口頭発表》

1. \*長谷川雄央, 根本幸児: 「複雑な接触伝播モデルの初期状態依存性II」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)
2. 須田裕介\*, 奥田浩司: 「非局所結合位相振動子系におけるキメラ状態の非定常性」日本物理学会 2018 年年次大会 (東京理科大学, 2018 年 3 月 22 日-25 日)
3. 須田裕介\*, 奥田浩司: 「非局所結合位相振動子系におけるキメラ状態の非定常性II」日本物理学会 2018 年秋期大会 (同志社大学, 2018 年 9 月 9 日-12 日)
4. \*桐越研光, 河野航, 北孝文: 「BEC相における 3/2 体相関と一粒子スペクトル」日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22 日~25 日)
5. \*河野航, 桐越研光, 北孝文: 「3/2 体相関を含む非一様なポーズアインシュタイン凝縮に対する変分波動関数の構成」日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22 日~25 日)
6. \*速水 賢, 楠瀬 博明, 求 幸年: 「5d電子系ダイヤモンド構造物質 $\text{AOsO}_4$ (A=K, Rb, Cs) における奇パリティ多極子と電気磁気効果」日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22 日~25 日)
7. \*速水 賢: 「局所的な軌道混成に由来するトロイダル多極子がもたらす新奇マルチフェロイクスの開拓」J-Physics 平成 30 年度領域全体会議(後半キックオフミーティング) (東北大学、2018 年 5 月 24 日~26 日)
8. \*速水 賢: 「電気トロイダル多極子と交差相関現象」第 1 回ETQ研究会「多極子秩序と超伝導」 (北海道大学、2018 年 8 月 8 日~9 日)
9. \*大内まり絵, 植木輝, 北孝文: 「Abrikosov格子状態の渦電荷」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)
10. \*速水 賢, 柳 有起, 楠瀬 博明, 求 幸年: 「 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  における電気トロイダル四極子秩序の可能性」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)
11. \*柳 有起, 速水 賢, 求 幸年, 楠瀬 博明: 「 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  における多極子秩序と非相反応答」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)
12. \*速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明: 「結晶点群の下での多極子の分類論」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)
13. \*中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣: 「 $\kappa$ 型分子性導体におけるスピン分裂」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)
14. \*中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣: 「 $\kappa$ 型分子性導体におけるスピン流生成」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9 日~12 日)

## 《ポスター発表》

1. 三浦孝祐\*, 泉田勇輝, 奥田浩司: 「有限パワーブラウン粒子カルノーサイクルにおけるカルノー効率の実現可能性」日本物理学会2018年秋期大会(同志社大学, 2018年9月9日-12日) 講演番号 12aPS-92
2. \*速水 賢, 楠瀬 博明: 「軌道混成によるハイブリッド多極子」J-Physics 平成29年度領域全体会議(東京大学物性研究所, 2018年3月15日~17日)
3. \*八城 愛美, 速水 賢: 「Odd-parity multipoles by orbital hybridization in noncentrosymmetric tetragonal system」J-Physics 平成29年度領域全体会議(東京大学物性研究所, 2018年3月15日~17日)
4. \*河野航, 北孝文: 「電子-フォノン相互作用による超伝導を記述する変分波動関数」日本物理学会2018年秋季大会(同志社大学, 2018年9月9日~12日)
5. \*八城 愛美, 速水 賢: 「奇パリティ結晶場の下で誘起されるトロイダル多極子と電気磁気効果」日本物理学会2018年秋季大会(同志社大学, 2018年9月9日~12日)
6. \*松本 拓哉, 速水 賢: 「ブリージングカゴメ磁性体における非相反マグノン励起」日本物理学会2018年秋季大会(同志社大学, 2018年9月9日~12日)
7. \*松本 拓哉, 速水 賢: 「ブリージングカゴメ磁性体における非相反マグノン励起」基研研究会「スピン系物理の最前線」(京都大学, 2018年10月31日~11月2日)
8. \*松本 拓哉, 速水 賢: 「ブリージングカゴメ磁性体におけるトロイダル多極子と非相反マグノン励起」J-Physics: Tropical Topical Meeting (琉球大学, 2018年12月13日~12月14日)

## 7. 科研費、助成金等の取得状況

### 根本 幸児

1. 「マスター方程式によるネットワーク上の感染症ダイナミクスの解析」科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金) 基盤研究(C)(一般) 平成28年度~平成31年度

### 北 孝文

1. 「超流動体と超伝導体における巨視的量子コヒーレンスと素励起の理論的研究」山田科学振興財団研究援助(2018年~2020年)

### 速水 賢

1. 「局所的な軌道混成に由来するトロイダル多極子がもたらす新奇マルチフェロイクスの開拓」科学研究費補助金 新学術領域研究(研究領域提案型)「J-Physics: 多極子伝導系の物理」公募研究(2018~2019年度)
2. 「遍歴磁性体におけるカイラル磁気秩序相の起源解明と特異な磁気・非相反伝導の探求」学術研究助成基金助成金 若手研究(2018~2020年度)

## 8. その他



根本 幸児

1. 理学部教務委員会委員長

速水 賢

1. 日本物理学会若手奨励賞(領域 8)「トロイダルモーメントと交差相関物性の微視的な理論研究」(2018 年 10 月 19 日)