

統計物理学研究室

1. メンバー

教授：根本 幸児	011-706-3441	nemoto@statphys.sci.hokudai.ac.jp
准教授：北 孝文	011-706-2687	kita@phys.sci.hokudai.ac.jp
助教：奥田 浩司	011-706-3442	okuda@statphys.sci.hokudai.ac.jp
助教：速水 賢	011-706-2694	hayami@phys.sci.hokudai.ac.jp

DC3：河野 航	DC3：Joshua Ezekiel Sambo	
DC2：大内 まり絵		
DC1：円谷 允俊	DC1：三浦 孝祐	DC1：八代 愛美
DC1：桐越 研光		
MC2：佐藤 駿哉	MC2：中田 康仁	MC2：比嘉 駿
MC2：松本 拓哉	MC2：村田 達志	
MC1：口町 和香	MC1：疋田 理樹	MC1：八重尾 剣三朗
MC1：白川義朗	MC1：鶴谷 周平	MC1：山家 椋太
B4：布谷 幹太	B4：渡部 風太	B4：嶋貫 将
B4：早坂 英海		

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

我々はレギュラーランダムグラフ (RRG) 上で感染モデルとしてよく知られている susceptible-infected-susceptible (SIS) 感染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、SISモデルとの類似点として(1)転移点が初期感染者割合 ρ に依存すること、相違点として(2) ρ の値に関わらず不連続転移になることを示した。その後、 $W \rightarrow S$ チャネルの回復率 μ を絞っていく振る舞いから、より統一的な理解が得られることがわかり、その振る舞いを調べた。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たところ、 $\mu \rightarrow 0$ でフローの縮退が起こることにより不連続転移が連続転移に移行することがわかった。また、臨界指数も通常の $\beta=1$ となり、この場合だけ特別の値であることを示した。 $\mu > 0$ では $W \rightarrow S$ チャネルが臨界性に寄与していることと対照的である。つぎにRRG上の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示すことを確かめた。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 μ 空間を加えた転移の様子を表す相図を作ることに成功した。また、二次元および

三次元正方格子上的SWSISモデルでも同様な連続転移→不連続転移の振る舞いをする
ことがわかり今後の解析が期待される。

北 孝文:

1. ボーズ-アインシュタイン凝縮相における臨界揺らぎと異常次元

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ュボフ・モードであると広く考えられてきた。しかし、ボゴリュ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、ボゴリュボフ・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。さらに、有限温度における1粒子密度行列が、長距離において、異常次元 η を伴う冪乗則に従って非対角長距離秩序の値である凝縮粒子密度 n_0 に近づくことを明らかにした。さらに、 $d=4$ 次元直下で η を評価し、 $\eta=0.1811(4-d)^2$ の表式を得た。また、この異常次元の出現は、一様BEC相の極低温の性質に大きく影響を及ぼし、比熱等に非解析的な温度依存性が出現することを指摘した。

2. 相関効果を取り込んだ有限温度変分理論

多体相関を取り込んだ有限温度変分理論を構築した。具体的に、グラントポテンシャルを変分パラメータを含むグリーン関数の汎関数として構成した。そして、この定式化を一様BEC相に適用し、平均場近似では無視されていた3/2対相関が、特に長距離領域で顕著に現れることを明らかにした。

3. d波超伝導体の表面電荷

銅酸化物高温超伝導体の[110]表面を念頭に、d波超伝導体の表面近傍における電荷の再配置を、拡張準古典方程式を用いて理論的に研究した。そして、表面近傍における超伝導秩序変数の空間変化、あるいは、フェルミ面近傍における状態密度の傾きの存在により、外部磁場なしでも、表面に電荷が蓄積されることを明らかにした。さらに、この電荷の蓄積により、ゼロバイアス近傍の局所状態密度に非対称性が出現することがわかった。

速水 賢:

1. スピン軌道結合金属Cd₂Re₂O₇における電気トロイダル四極子秩序

奇パリティ多極子秩序の可能性が実験的に示唆されている5d電子系パイロクロア化合物Cd₂Re₂O₇を対象とし、実験で観測された約200Kと120Kにおける2つの構造相転移が、奇パリティ多極子の一つである電気トロイダル四極子の秩序形成により引き起こされている可能性を理論的に明らかにした。特に、スピン軌道相互作用の効果を取り込んだ強束縛模型を拡張多極子の概念を用いて解析することにより、正四面体ユニットに内包された電気トロイダル四極子に対応する秩序変数の微視的な表式を導出した。また、こうした電気トロイダル四極子自由度が秩序化することにより、運動量空間において波数に依存したスピ

ン分裂バンド構造が生じること、それに伴う電流誘起磁気効果や非相反伝導現象が生じることを明らかにした。

2. コリニアな磁気秩序のもとで生じるスピン分裂バンド構造

スピン軌道相互作用のないコリニアな反強磁性秩序を対象とし、どのような格子構造および微視的な模型パラメタの下で、スピン分裂を示すバンド構造やスピン流生成といった創発スピン軌道物性が生じるかを理論的に調べた。その結果、ミクロな多極子の表現論を用いることにより、反強磁性クラスター構造とクラスター間のボンド自由度間に働く有効スピン軌道結合がスピン軌道相互作用と同様な影響をもたらすことを明らかにした。また、有効スピン軌道相互作用の表式をミクロな多極子の立場から導出することにより、波数空間に関して対称なスピン分裂が生じること、およびそれらが生じるために必要な格子構造およびホッピングパラメタの条件を見出した。さらに、スピン分裂のもとで期待されるスピン流生成や磁気弾性効果といった物性現象を 32 の結晶点群に対して系統的に解析した。

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、熱機関の効率熱力学の基本的課題として古くから扱われており、熱機関の効率の上限が Carnot 効率で与えられることは良く知られている。通常 Carnot 効率を実現されるのは、準静的極限の場合だけである。しかし、準静的（可逆）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と考えられる。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、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るればパワーが 0 に近づいてしまうことを示した。平衡熱力学からは、準静的熱機関であれば Carnot 効率を得られることが示されるのみでありその逆は言えないので、Shiraishi らの結果は非平衡熱機関の基本的性質を示したものと言える。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唆している。

この結果に着目して、D1 学生の三浦孝祐君、東京大学の泉田勇輝氏とともにブラウン粒子カルノーサイクルの研究をおこない、温度差の小さいときに緩和時間が小さい極限で Carnot 効率と有限パワーが両立可能であることを示すことができた。さらにこの系において成立する効率とパワーの間のトレードオフ関係式を導出し、両立可能であるとの結果は

トレードオフ関係式と矛盾していないことを理論的に示すことができた。

2. 三角形型ブラウニアンモーターの効率の研究

マイクロサイズの生物では、ブラウニアンモーターによって熱揺ぎから仕事を取り出している可能性が示唆されており、M2 学生の比嘉駿君とともに、そのようなブラウニアンモーターの研究を行った。

この研究では Van den Broeck ら(2004) によって提案された三角形型ブラウニアンモーターを具体例として用いてその効率を数値シミュレーションと理論解析で調べた。その結果、数値シミュレーションと理論解析の結果はおおよその一致を見たが、得られた効率の値は非常に小さく、効率を大きくするための改善手法の開発が今後必要と考えている。

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. T. Kita, "A Renormalization-Group Study of Interacting Bose-Einstein Condensates: Absence of the Bogoliubov Mode below Four ($T > 0$) and Three ($T = 0$) Dimensions", *J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 054003 (2019).
2. T. Kirikoshi, W. Kohno, and T. Kita, "Variational Approach to Many-Body Problems Incorporating Many-Body Effects at Finite Temperatures", *J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 064005 (2019).
3. T. Kita, "Specific Heat of Superfluid ^4He : Why Does It Deviate From the T^3 Law at Low Temperatures", *J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 085002 (2019).
4. T. Kita, "A Renormalization-Group Study of Interacting Bose-Einstein Condensates: II, Anomalous Dimension η for $d < 4$ at Finite Temperatures", *J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 104003 (2018).
5. S. Hayami and Y. Motome, "Effect of magnetic anisotropy on Skyrmions with a high topological number in itinerant magnets", *Phys. Rev. B **99**, 094420 (2019).
6. S. Hayami, Y. Yanagi, H. Kusunose, and Y. Motome, "Electric Toroidal Quadrupoles in Spin-Orbit-Coupled Metal $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ ", *Phys. Rev. Lett. **122**, 147602 (2019).
7. M. Yatsushiro and S. Hayami, "Atomic-Scale Magnetic Toroidal Dipole under Odd-Parity Hybridization", *J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 054708 (2019).
8. M.-T. Suzuki, T. Nomoto, R. Arita, Y. Yanagi, S. Hayami, and H. Kusunose, "Multipole expansion for magnetic structures: A generation scheme for symmetry-adapted orthonormal basis set in crystallographic point group", *Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019).
9. S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, "Magnetic Vortex Induced by Nonmagnetic Impurity in Ferromagnets: Magnetic Multipole and Toroidal around the Vacancy", *J.

Phys. Soc. Jpn. **88**, 063702 (2019).

10. M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo, " *Spin current generation in organic antiferromagnets*", *Nat. Commun. **10**, 4305 (2019).
11. S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, " *Momentum-Dependent Spin Splitting by Collinear Antiferromagnetic Ordering*", *J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123702 (2019).

<会議抄録等>

1. 北 孝文：「物性物理学と対称性 — 超伝導」，数理科学 2019 年 3 月号「対称性と物理学」
2. 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明, "ミクロな多極子による電子物性の表現論 (その 1)", 固体物理 **54**(3), 131-145 (2019).

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)

<基調講演>

<招待講演>

1. *T. Kita, "A Renormalization-Group Study of Interacting Bose-Einstein Condensates: Absence of the Bogoliubov Mode below Four ($T > 0$) and Three ($T = 0$) Dimensions", *International Conference on Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics* (14–20 July 2019, Prague, Czech Republic)
2. *S. Hayami, "Neel- and Bloch-type magnetic vortices in Rashba metals", SPIE Optics + Photonics 2019, Spintronics XII (11-15 August 2019, California, United States)
3. *S. Hayami, "Augmented multipoles and cross-correlated couplings", J-Physics 2019 International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics, Tutorial session (Lecture) (17-21 September 2019, Hyogo, Japan)
4. *S. Hayami, "Momentum-Dependent Spin Splitting by Collinear Antiferromagnets without Atomic Spin-Orbit Coupling", J-Physics 2019 International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics (17-21 September 2019, Hyogo, Japan)
5. *S. Hayami, "Classification of Atomic-Scale Multipoles under Crystallographic Point Groups", The International Conference on SCES 2019 (23-28 September 2019, Okayama, Japan)

<一般講演> 《口頭発表》

1. *M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo: 「Organic antiferromagnet as a spin current generator」 The International Conference on SCES 2019 (23-28 September 2019, Okayama, Japan)

2. *S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome: 「Numerical study on magnetic hedgehog lattices in noncentrosymmetric metals」 JSPS Core-to-Core Program International meeting “Core-to-Core Final Meeting in Jaca (2019)” (2-6 September 2019, Jaca, Spain)

《ポスター発表》

1. *T. Kita, “A Renormalization-Group Study of Interacting Bose-Einstein Condensates: Absence of the Bogoliubov Mode below Four ($T > 0$) and Three ($T = 0$) Dimensions”, *International Conference on Quantum Fluids and Solids* (7–13 August 2019, Edmonton, Alberta, Canada)
2. *M.-T. Suzuki, T. Nomoto, R. Arita, Y. Yanagi, S. Hayami, H. Kusunose, V. T. N. Huyen, K. Yamauchi, and T. Oguchi: 「Multipole expansion for magnetic structures and its application to the study of anomalous Hall effect in antiferromagnet」 The International Conference on SCES 2019 (23-28 September 2019, Okayama, Japan)
3. *S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome: 「Magnetic Hedgehog Crystals in Noncentrosymmetric Metals」 The International Conference on SCES 2019 (23-28 September 2019, Okayama, Japan)
4. *R. Yambe and S. Hayami: 「Noncoplanar Double- Q State in d - p Model with Strong Spin-Charge Coupling」 The International Conference on SCES 2019 (23-28 September 2019, Okayama, Japan)
5. *M. Yatsushiro and S. Hayami: 「Odd-Parity Multipole Order in CeCoSi」 The International Conference on SCES 2019 (23-28 September 2019, Okayama, Japan)
6. *M. Yatsushiro and S. Hayami: 「Crosscorrelation phenomena by odd-parity multipoles in CeCoSi」 J-Physics 2019 International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics (17-21 September 2019, Hyogo, Japan)
7. *T. Matsumoto and S. Hayami: 「Nonreciprocal magnon by symmetric anisotropic exchange interaction on a honeycomb antiferromagnet」 J-Physics 2019 International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics (17-21 September 2019, Hyogo, Japan)
8. *S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome: 「Numerical study of magnetic hedgehog lattices in itinerant electron systems」 V International Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures (8-12 July 2019, Petrozavodsk, Russia)
9. *S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome: 「Numerical study of magnetic hedgehog crystals in itinerant chiral magnets」 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (29-31 May 2019, Tokyo, Japan)

10. *M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo: 「Organic antiferromagnet as a spin current generator」 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (29-31 May 2019, Tokyo, Japan)
11. *S. Okumura, S. Hayami, Y. Kato, and Y. Motome: 「Numerical study of 3Q and 4Q hedgehog crystals in 3D spin-charge coupled systems」 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (22-24 May 2019, Tokyo, Japan)

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: 「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」日本物理学会第 74 回年次大会(九州大学, 2019 年 3 月 14 日-17 日)

<一般講演> 《口頭発表》

1. *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）
2. *河野航, 桐越研光, 北孝文: 「3/2 体相関を含む非一様なボ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）
3. *速水 賢: 「微視的な多極子自由度とスピン分裂を示すバンド構造の関係」J-Physics 地域研究会 -札幌（北海道大学, 2019 年 7 月 22 日~23 日）
4. *八城 愛美, 速水 賢: 「f 電子系金属 CeCoSi における奇パリティ多極子秩序」J-Physics 地域研究会 -札幌（北海道大学, 2019 年 7 月 22 日~23 日）
5. *速水 賢: 「ボンド自由度を用いた拡張多極子 -Cd₂Re₂O₇ における電気トロイダル四極子秩序を例にとって-」J-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と展望」（明治大学, 2019 年 1 月 21 日~22 日）
6. *速水 賢: 「多極子の拡張・一般化と交差相関物性」J-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と展望」（明治大学, 2019 年 1 月 21 日~22 日）
7. *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）
8. *八城 愛美, 速水 賢: 「CeCoSi における奇パリティ多極子秩序の理論的研究」日本物理学会第 74 回年次大会（同志社大学, 2019 年 3 月 14 日~17 日）
9. *松本 拓哉, 速水 賢: 「異方的な交換相互作用をもつフラストレート磁性体におけるスキルミオン結晶相」日本物理学会第 74 回年次大会（同志社大学, 2019 年 3 月 14 日~17 日）
10. *中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣: 「κ 型分子性導体における対称性の破れと輸送特性」日本物理学会第 74 回年次大会（同志社大学, 2019 年 3

月 14 日~17 日)

11. *山家 椋太, 速水 賢: 「強いフント結合をもつ d - p 軌道混成モデルにおける多重 Q 磁気秩序」日本物理学会第 74 回年次大会 (同志社大学, 2019 年 3 月 14 日~17 日)
12. *中 惇, 速水 賢, 楠瀬 博明, 柳 有起, 求 幸年, 妹尾 仁嗣: 「 κ 型分子性導体における異常ホール効果」日本物理学会 2019 年秋季大会 (同志社大学, 2019 年 9 月 10 日~13 日)
13. *奥村 駿, 速水 賢, 加藤 康之, 求 幸年: 「3 次元遍歴電子系における多重 Q 磁気ヘッジホッグ格子の数値的研究」日本物理学会 2019 年秋季大会 (同志社大学, 2019 年 9 月 10 日~13 日)
14. 三浦孝祐*, 須田裕介, 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の可逆性」日本物理学会 2019 年次大会 (九州大学, 2019 年 3 月 14 日-17 日) 講演番号 15aG214-5
15. 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の可逆性 2」日本物理学会 2019 年秋期大会 (岐阜大学, 2019 年 9 月 10 日-13 日) 講演番号 11pK28-12

《ポスター発表》

1. *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)
2. 比嘉駿*, 奥田浩司: 「三角形型ブラウニアンモーターのエネルギー効率」日本物理学会 2019 年秋期大会 (岐阜大学, 2019 年 9 月 10 日-13 日) 講演番号 13aPS-52

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を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)
3. 「結晶の磁気異方性に基づいた新しいスキルミオン結晶の理論的探索」豊田理化学研

研究所 豊田理研スカラー (2019 年度)

4. 「微視的多極子の秩序による創発スピン軌道物性の開拓」科学研究費補助金 基盤研究 (C) (2019~2021 年度) 研究代表者：楠瀬 博明 教授 (明治大学)
5. 「反転対称性の破れた磁性体における非相反マグノンの研究」科学研究費補助金 基盤研究 (B) (2019~2022 年度) 研究代表者：佐藤 卓 教授 (東北大学)

8. その他

1. 松本 拓哉:
J-Physics 2019 International Conference ポスター賞 (2019 年 9 月 18 日-21 日)
2. 八城 愛美:
J-Physics 2019 International Conference ポスター賞 (2019 年 9 月 18 日-21 日)
3. 八城 愛美:
International Conference on SCES 2019 ポスター賞 (2019 年 9 月 23 日-28 日)