

近畿大学工学部 理学科物理学コース
総合理工学研究科 理学専攻物理学分野
2021年度 年次報告

令和4年7月21日

目次

素粒子実験研究室	2
素粒子現象論研究室	4
場の量子論・素粒子論研究室	7
ソフトマター物理学研究室	11
物性理論研究室	14
量子多体物理学研究室	18
量子制御研究室	23
固体電子物理研究室	27
生物物理学研究室	29
生命動態物理学研究室	32
一般相対論・宇宙論研究室	35
宇宙論研究室	39
高エネルギー天体物理学研究室	42

素粒子実験研究室

加藤 幸弘 教授
学部生 4 名

研究の概要

- **MPGD を用いた ILD-TPC 検出器の開発**

次世代電子陽電子衝突型加速器計画 (ILC) は国際協力実験計画であり、日本への誘致を目指している。本研究室では、荷電粒子の検出する飛跡検出器の研究開発を、ヨーロッパとアジアの研究者と共同で進めている。ILC で用いられる飛跡検出器は、非常に高精度 (100 μm 程度) で飛跡を同定しなければならないために、研究室が参加している ILD-TPC グループは、ガス増幅部に GEM (Gas Electron Multiplier) を用いたタイムプロジェクションチェンバー (TPC) の採用を目指して様々な研究を行っている。特に、電子増幅時に生成されたイオンの検出器内への広がりを抑制する新たなゲート装置を 2016 年度に開発し、性能調査を 2016 年 11 月にドイツ電子シンクトロン研究所 (DESY) の電子ビームを用いて行って、得られたデータの解析を継続している。

- **GEM を用いた荷電粒子検出器開発のための基礎研究**

GEM を用いた荷電粒子検出器開発として、2016 年度より絶縁体に低焼結セラミックス (LTCC) を用いた GEM の開発を始めた。LTCC-GEM は放電耐性に優れているとともに 1 万倍を超える増幅率まで到達する。また、プラスチックよりも硬度があるのでたわみが少なく、物理的に孔を開けるために安価で自由に孔構造を変更することができる。この利点を生かして、ガス増幅によって大量に生成された陽イオンが検出部に侵入する (Ion Backflow) 割合を抑制する方法を検討している。孔配置が異なる 2 枚の LTCC-GEM を重ねてガス増幅部の電場構造に変化を与えることで、生成された陽イオンの GEM 極板での吸収割合を十分に増加させることがどうかを simulation を用いて評価している。

- **宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験のための超電導光検出器の開発**

これまでに行われたニュートリノ振動観測実験によって、ニュートリノは質量をもっていることが確認された。3 種類のニュートリノには質量差があるので、重いニュートリノは軽いニュートリノへと輻射崩壊する。宇宙には宇宙初期に生成され、宇宙空間に一様に存在すると予言されている ”宇宙背景ニュートリノ” がある。ニュートリノの寿命は非常に長いですが、宇宙背景ニュートリノが崩壊すれば、崩壊によって微弱なエネルギーをもつ光子 (35 meV 程度) が生成される。このような微弱なエネルギーをもつ光子を検出することによって、ニュートリノ崩壊を観測できる。微弱なエネルギーの光子を検出するために

は、エネルギーギャップの小さい超伝導光検出器が必要であり、そのために超伝導光検出器の開発を行っている。

学術論文（査読付）

1. “Measurement of the charge asymmetry of electrons from the decays of W bosons produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}=1.96\text{TeV}$ ”
T. Aaltonen, *et al.*(CDF Collaboration, 404 authors)
Physical Review D **104**(9), 092002(27p)(2021), Nov.1

学士論文

- 「Python による確率分野の電子教材と授業計画の作成」
- 「Python を用いた中学物理の仕事とエネルギーの単元における電子教材と学習指導案」
- 「GEM モデルを用いた電子増幅率における絶縁体の厚さと孔径、電圧の3つの関係」
- 「Arduino を用いた部屋の照明制御装置の製作」
- 「火力発電機の発電原理がわかるシステムの作成」

学内委員

- 総合理工学研究科専攻長
- 物理学コース ネットワーク委員
- 物理学コース 人権教育・ハラスメント防止委員

素粒子現象論研究室

大村 雄司 講師
修士 1 名 学部生 6 名

研究の概要

- レプトクォーク模型に関する研究

LHCb 実験や B ファクトリー実験で、素粒子標準模型の予言値と実験結果の不一致が報告されている。その問題の解決策としてレプトンとクォーク両方に結合するレプトクォークと呼ばれる粒子が注目を集めている。それを踏まえ、論文 Phys. Rev. D **104**, no.7, 075008 (2021) で、スピン 1 のレプトクォークを予言する模型を具体的に構築し、実際にその問題の解決策となり得るか、そしてその実験的検証方法は何かという研究を行った。

- パリティ対称性を持つ模型に関する研究

未解決である strong CP 問題と階層性問題の解決策としてパリティ対称性と超対称性を持つ模型を研究した。特にパリティ対称性を持つと、たとえ高いエネルギーでパリティ対称性が自発的に破れたとしてもフレーバー物理などでの観測量に予言として現れる。論文 JHEP **06**, 125 (2021) で、その予言値を数値的に解析した。

学術論文（査読付）

1. “TeV-scale vector leptoquark from Pati-Salam unification with vectorlike families”
S. Iguro, J. Kawamura, S. Okawa and Y. Omura
Phys. Rev. D **104**, no.7, 075008 (2021)
doi:10.1103/PhysRevD.104.075008
2. “Higgs flavor phenomenology in a supersymmetric left-right model with parity”
S. Iguro, J. Kawamura, Y. Omura and Y. Shigekami,
JHEP **06**, 125 (2021)
doi:10.1007/JHEP06(2021)125

学士論文

- 「場の量子論と標準模型」
- 「量子色力学における SU(3) 対称性と漸近的自由性について」
- 「対称性の自発的破れとゲージボソンの質量」
- 「暗黒物質とその存在証拠」
- 「暗黒物質候補と WIMP ミラクル」
- 「弱い相互作用と WIMP 暗黒物質模型」

国内学会・研究会講演

1. Yuji Omura (presenter), Shohei Okawa
「Impact of light dark matter on Higgs physics」
ILC Workshop on Potential Experiments ILCX2021 オンライン [27 Oct. 2021]
2. Yuji Omura (presenter), Shohei Okawa
「Light mass window of lepton portal dark matter」
素粒子現象論研究会 2021 オンライン [8 Nov. 2021]
3. Yuji Omura (presenter), Shohei Okawa
「Light mass window of lepton portal dark matter」
新ヒッグス勉強会 (大阪大学) [27 Nov. 2021]
4. Yuji Omura (presenter), Syuhei Iguro, Junichiro Kawamura, Shohei Okawa
「TeV-scale vector leptoquark from Pati-Salam unification with vectorlike families」
日本物理学会 第 77 回年次大会 オンライン [16 Mar. 2022]

競争的外部資金

- 2019 年-2023 年 科学研究費 (基盤 C)
「暗黒物質模型の分類分けに基づく真空構造の解明」
研究代表者:大村 雄司 直接経費 700,000 円 (2021 年度)

学内委員

- 図書広報委員、WEB 委員会小委員（前期）
- 学生委員（後期）
- 1 年生担任（前、後期）

学外委員

- 「基研研究会 素粒子物理学の進展 2021」世話人（連絡責任者）

場の量子論・素粒子論研究室

三角 樹弘 准教授

学部生 6 名

研究指導委託 博士 1 名 修士 3 名

研究の概要

- **リサージェンス理論を用いた相転移現象の解明**

リサージェンス理論とは場の量子論の摂動級数をボレル変換・ボレル和により再定義することで非摂動効果の解析を行う体系を指す。我々は、場の量子論における相転移現象が、摂動的ボレル変換が持つ特異点の衝突と散乱として記述されること、さらに相転移次数が衝突する特異点の数と散乱角から読み取れることを一般的に証明した。この成果は、摂動級数のみから相転移現象を理解できることを示した初めての結果であり、素粒子論から物性論まで幅広い分野で応用が進むものと考えられる。(PTEP, 2021, 103B04)

- **グラフ理論の観点に基づく格子場の理論の理解**

格子場の理論は時空間を格子化し、素粒子に対応する変数である「場」を格子上に定義することで、数学的に厳密に場の量子論を定式化する理論である。我々は、格子場の理論を代数学におけるグラフ理論として捉え直せることを発見し、格子理論の諸々の問題をグラフ理論の問題に焼き直すことが可能であることを示した。中でも、格子理論におけるダブラーと呼ばれる自由度数が、グラフの位相幾何学的不変量として得られることなど、格子理論への新しい知見の獲得につながっている。(JHEP, 2022(02), 104)

- **Exact-WKB 法を用いた周期ポテンシャル量子系の厳密量子化条件の導出**

Exact-WKB 法は代数解析学におけるシュレディンガー型の固有値方程式をストークスグラフと呼ばれる図を用いて求める手法であり、我々の研究グループを中心に近年物理現象への応用研究が進んでいる。ここでは、さまざまな物理現象で登場する周期ポテンシャルを持つ量子力学系にこの手法を応用し、エネルギー固有値や分配関数を導出するための厳密な量子化条件の導出、さらに摂動的寄与の非摂動寄与の関係 (リサージェンス関係) の解明に成功した。(JHEP, 2021(07), 096)

メディア掲載

- 「Understanding Phase Transitions in Supersymmetric Quantum Electrodynamics With Resurgence Theory」

JPS HOT Topics No.1, 063 (2021)
DOI:10.7566/JPSHT.1.063

学術論文 (査読付)

1. “Lattice fermions as spectral graphs”
Jun Yumoto, Tatsuhiko Misumi
Journal of High Energy Physics, **2022**(02), 104 (2022) (2月号)
DOI:10.1007/jhep02(2022)104
2. “Effective field theory of magnons: Chiral magnets and the Schwinger mechanism”
Masaru Hongo, Toshiaki Fujimori, Tatsuhiko Misumi, Muneto Nitta, and Norisuke Sakai
Physical Review B, **104**(13), 134403 (2021) (10月号)
DOI:10.1103/physrevb.104.134403
3. “Quantum phase transition and resurgence: Lessons from three-dimensional $N=4$ supersymmetric quantum electrodynamics”
Toshiaki Fujimori, Masazumi Honda, Syo Kamata, Tatsuhiko Misumi, Norisuke Sakai, Takuya Yoda
Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2021**(10), 103B04 (2021) (10月号)
DOI:10.1093/ptep/ptab086
4. “Exact-WKB, complete resurgent structure, and mixed anomaly in quantum mechanics on S^1 ”
Naohisa Sueishi, Syo Kamata, Tatsuhiko Misumi, Mithat Unsal
Journal of High Energy Physics, **2021**(07), 096 (2021) (7月号)
DOI:10.1007/jhep07(2021)096

国際学会・研究会講演

1. Tatsuhiko Misumi (presenter)
「Application of resurgence theory to quantum theories」
RIMS online workshop ”Exact WKB Analysis, Microlocal Analysis, Painleve Equations and Related Topic” Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University [12 Oct. 2021]

2. Tatsuhiko Misumi (presenter)
「Applications of Resurgence Theory to Quantum Theories: ZN-twist, Exact-WKB and Phase Transition」
”Applicable resurgent asymptotics: Summary meeting” Isaac Newton Institute of Mathematical Sciences, University of Cambridge [17 Jun. 2021]

国内学会・研究会講演

1. 湯本純 (presenter), 三角樹弘
「グラフ理論に基づいた格子 Dirac 演算子の新たな解析方法と S4 上における格子 fermion の解析」
日本物理学会 第 77 回年次大会, 講演番号 15pA533-9, オンライン [Mar. 2022]
2. 湯本純 (presenter), 三角樹弘,
「グラフ理論に基づいた格子 Dirac 演算子の新たな解析方法」
第 26 回奥羽越素粒子研究会, オンライン [Nov. 2021]
3. 湯本純 (presenter), 三角樹弘,
「spectral graph theory を用いた格子 Dirac 演算子の新たな解析方法」
基研研究会 素粒子物理学の進展 2021, 京都大学基礎物理学研究所 オンライン [Sep. 2021]
4. 三角 樹弘 (presenter)
「S1 コンパクト化とトーフト量子異常」
基研国内モレキュール型研究会「周期駆動系におけるカイラル量子異常」京都大学基礎物理学研究所 [8 Aug. 2021]
5. 三角 樹弘 (presenter)
「リサージェンス理論で挑む量子非摂動現象の解明」
広島大学 第 64 回 (2021 年度第 2 回) Core-U セミナー [16 May. 2021]

競争的外部資金

- 科学研究費補助金 基盤研究 (C) 2019 年度-2022 年度「量子異常・リサージェンス・格子理論を組み合わせた非摂動解析」 19K03817
研究代表者:三角 樹弘 直接経費 800,000 円 (2021 年度)

学内委員

- 理工学部図書広報委員会委員、SNS 小委員会委員長（後期）
- 物理学コースオープンキャンパス係（前，後期）

学外委員

- 文部科学省 学術変革領域研究 (A) 専門委員会審査委員
- ケンブリッジ大学ニュートン研究所 プラグラム世話人 「Applicable resurgent asymptotics: towards a universal theory 」
- 日本学術振興会 特別研究員等審査会専門委員，卓越研究員候補者選考員会書面審査委員及び国際事業委員会書面審査委員・書面評価委員

ソフトマター物理学研究室

堂寺 知成 教授
修士1名 学部生6名

研究の概要

- **ソフト準結晶 — 学問分野の創成** 「準結晶」の発見は20世紀後半の物質科学上の大発見で2011年にノーベル賞が与えられた。本研究室では「高分子準結晶」を理論的に予測、さらに実験的に発見した。2011年ノーベル化学賞発表の際にも高分子準結晶は言及され、学問の発展に貢献してきた。ソフトマター準結晶の普遍性と物性の理論的研究をさらに推進し、21世紀の準結晶物理学の新たな潮流を創造することが本研究室の重要な目標である。スロベニアのステファン研究所 Zihelr 博士と国際共同研究し、ソフトマター準結晶を通して凝縮系物理学の基礎的概念の新たな構築を目指している。その成果は Nature、Nature Materials、Nature Communications に発表された。近年、中蔵丈一郎氏は従来の準結晶概念を覆す「青銅比タイリング構造」とその仲間を発見し、2回の日本物理学会学生優秀発表賞、近畿大学院大学院学長賞を受賞した。さらにソフトマター準結晶の革新を目指し、英国との国際共同研究を行なっている。
- **ラビリンス — 世にも奇妙なソフトマターの自己組織化現象** ソフトマター物理学は、20世紀末に成立した新しい物理学の1分野である。ソフトマターとよばれる物質群には、高分子、コロイド、液晶、界面活性剤、生体物質などがあるが、本研究室ではソフトマターの自己組織化現象に注目している。これまでアルキメデス相、高分子準結晶、モザイク準結晶、メゾスコピックダイヤモンド相、双曲タイル構造など常識を打ち破る構造を次々に発見し、その統計物理学的計算研究を推進している。近年は特に Schoen 博士の発見した Gyroid 曲面を例としたソフトマター3重周期極小曲面、周期的ラビリンス（迷路）構造に興味を持っている。3重周期極小曲面上の Hexagulation Number の提案が最近の成果である。Gyroid 曲面に関連して、オーストラリアとの国際共同研究を行なっている。
- **分野を越えた横断的研究** ソフトマター物理学だけでなく、固体物理学、光学、ナノテクノロジー、結晶学、数学、化学などとの境界領域を横断的に研究することも本研究室の特徴である。近年、3D プリンターや音響の研究者と交流している。

修士論文

- 「拡張 HCSS ペアポテンシャルによるチュービングトラライアングルタイリングの形成」
- 「拡張 HCSS ペアポテンシャルを用いた新規 6 方準結晶のモンテカルロシミュレーション」

学士論文

- 「階段型ポテンシャルで相互作用するソフト粒子系におけるクラスター準結晶の自己組織化」
- 「多孔質媒体における音の伝播の研究」
- 「相転移の統計力学」
- 「ジャイロイド構造の音響効果測定」
- 「自己組織化」
- 「海洋の様々な波」

国際学会・研究会講演

1. Tomonari Dotera (Invited Talk), Kota Morimoto, Andrew Archer, Alastair Rucklidge, “Quasiperiodic tiling and density wave pictures in hexagonal quasicrystals”
Materials Research Meeting 2021 (MRM21) (PACIFICO YOKOHAMA) [14 Dec. 2021]
2. Mikoto Takase (poster), Tomonari Dotera, “Tübingen triangle tilings formed by hard-core/square-shoulder particles”
Materials Research Meeting 2021 (MRM21) (PACIFICO YOKOHAMA) [16 Dec. 2021]

国内学会・研究会講演

1. 森本康太 (poster)、堂寺知成
「拡張 HCSS ペアポテンシャルを用いた新規 6 方準結晶のモンテカルロシミュレーション」
日本物理学会第 77 回年次大会、オンライン、[18 Mar 2022]

競争的外部資金

- 2020年度科研費 基盤研究(C)
ソフトマター準結晶と準周期タイリング理論の革新的展開 [課題番号 19K03777]
研究代表者:堂寺知成 直接経費 501,620円 (2021年度)
- 令和2年度(2020年度)二国間交流事業共同研究・セミナー
ソフトマター準結晶と液晶スカーミオンのデザイン-革新的物質構造の発見 [課題番号 JPJSBP1 20195005]
研究代表者:堂寺知成 配分額 1900,000円 (2021年度)

その他

学内委員

- コース主任(前期)
- 総合理工学研究科理学専攻副専攻長(後期)

物性理論研究室

笠松 健一 准教授
修士 1 名 学部生 7 名

研究の概要

本研究室では、ナノケルビン (10^{-9} K) の超低温まで冷却された中性原子気体における量子多体现象や、ボース・アインシュタイン凝縮した体系で起こる超流動現象に関する理論的研究を行っている。本年度の成果は以下のとおりである。

- **2 成分超流体における量子ケルビンヘルムホルツ不安定性が誘起するパターン形成のダイナミクス**

古典流体におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性の理論を拡張し、相分離した 2 成分ボース-アインシュタイン凝縮体のせん断流不安定性が引き起こす非線形ダイナミクスを理論的に研究した。Gross-Pitaevskii 方程式の系統的な数値シミュレーションにより、様々なパターン形成のダイナミクスを明らかにした。また、超流体に拡張して定義されたウェーバー数によってパターンの挙動が特徴づけられることを示し、量子流体系に特有の微視的な側面を明らかにすることができた。

- **2 成分ボース凝縮体の異なる成分に属した量子渦対のダイナミクス**

円形の箱型ポテンシャルに捕捉された混合 2 成分ボース-アインシュタイン凝縮体において、異なる成分に属する 2 つの量子渦のダイナミクスを、Gross-Pitaevskii 方程式の数値解析を用いて研究した。2 つの渦が初期に同位置にある場合、成分間の相互作用によって、動的不安定性が生じて渦の分割が起こり、その後はそれぞれの渦の循環に依存して非自明な挙動を示すことを明らかにした。

- **モット絶縁相近傍で実現する光格子中の 2 成分ボース気体における量子液滴**

外部トラップポテンシャルがある 2 成分 Bose-Hubbard 系における量子液滴の動的形成について理論的に研究した。具体的には、二重充填のモット絶縁体に囲まれた中心領域の超流動体は二相間の量子相転移の不連続性により自己束縛され、量子液滴を形成する。我々は、2 次元系における時間依存グッツヴィラー方程式のシミュレーションを用いて、トラップポテンシャルの制御により液滴の特徴的な振る舞いを誘発する方法を示した。また、この液滴の静的・動的特性は、6 次の非線形性まで考慮した有効ギンツブルグ・ランダウ理論によって定性的に記述できることを示した。

メディア掲載

- Physics Magazine (American Physical Society) 「Superfluid Interface Mixes Classical and Quantum Behavior」 2021年8月13日
- 近畿大学プレスリリース 「世界初！2種類の超流動体の界面模様の形成機構を解明 量子流体力学の発展につながる研究成果」
2021年8月19日
毎日新聞 Web、SankeiBiz、などで紹介される。
- 近畿大学プレスリリース 「超低温の原子の気体が液滴となる新たな形成機構を解明 気体と液体の両方の特徴をもつ、物質の新しい状態」
2022年3月3日
マイナビニュースで紹介される。

学術論文（査読付）

1. “Quantum droplet of a two-component Bose gas in an optical lattice near the Mott insulator transition”
Yoshihiro Machida, Ippei Danshita, Daisuke Yamamoto, and Kenichi Kasamatsu
Physical Review A **105**, L031301 [6 Pages] (2022) (3月号)
DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.L031301>
2. “Dynamics of Two Quantized Vortices Belonging to Different Components of Binary Bose-Einstein Condensates in a Circular Box Potential”
Junsik Han, Kenichi Kasamatsu, and Makoto Tsubota
Journal of Physical Society of Japan **91**, 024401 [10 Pages] (2022) (1月号)
DOI : <https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.024401>
3. “Pattern formation of quantum Kelvin-Helmholtz instability in binary superfluids”
Haruya Kokubo, Kenichi Kasamatsu, and Hiromitsu Takeuchi
Physical Review A **104**, 023312 [16 Pages] (2021) (8月号)
DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.104.023312>

修士論文

- 「Bose-Einstein 凝縮体における流体力学的不安定性の検証」

学士論文

- 「機械学習を用いたイジング模型の相構造の研究」
- 「2成分 Bose-Einstein 凝縮体中の渦糸における Kelvin 波について」
- 「2成分ボースアインシュタイン凝縮体で生成される massive-vortex の運動」
- 「1次元フェルミ超流動体におけるダークソリトンのシミュレーション」
- 「回転するフェルミオンの超流動体における量子渦格子の研究」
- 「BCS-BEC クロスオーバー領域のフェルミ超流動体における渦の生成と臨界速度」
- 「2次元 XY 模型の相転移」

国際学会・研究会講演

1. Haruya Kokubo (presenter), Kenichi Kasamatsu, and Hiromitsu Takeuchi
“Phase diagram of pattern formation in binary Bose-Einstein condensates with shear flow”
International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2021 (QFS2021) オンライン [11 Aug. 2021]

国内学会・研究会講演

1. 小久保治哉 (presenter), 笠松健一
「小規模 Bose-Einstein 凝縮体における渦生成の臨界速度」
日本物理学会 第 77 回年次大会 オンライン [17 Mar. 2022]
2. 笠松健一 (presenter), 松居哲生
「巻数-位相表示での Wigner 準分布関数と経路積分を用いた U(1) 量子振り子の時間発展の研究」
日本物理学会 第 77 回年次大会 オンライン [17 Mar. 2022]
3. 韓俊植 (presenter), 笠松健一, 坪田誠
「ボックスポテンシャルにトラップされた 2 成分 Bose-Einstein 凝縮体中で異なる成分に属する渦のダイナミクス」
日本物理学会 第 77 回年次大会 オンライン [15 Mar. 2022]

4. 笠松健一 (presenter), 松居哲生
「巻数-位相表示とコヒーレント表示での切断 Wigner 近似による U(1) 及び SU(2) 量子ダイナミクス」
日本物理学会 2021 年秋季大会 オンライン [22 Sep. 2021]
5. 小久保治哉 (presenter)
「2次元超流動体における量子ケルビンヘルムホルツ不安定性のパターン形成」
2021 年 量子物性若手交流研究会 オンライン [7 Sep. 2021]

競争的外部資金

- 2018-2021 年度 科学研究費 (基盤 C) 「光格子中の長距離相互作用を有する冷却原子系における非平衡量子ダイナミクスの解明」
研究代表者: 笠松 健一 直接経費 600,000 円 (2021 年度)

その他

- 小久保 治哉 (M2) 近畿大学大学院 総合理工学研究科 大学院部長賞 [17 March 2022]

学内委員

- 予算委員会委員 (前、後期)
- 学生活活性化委員会委員 (前、後期)

学外委員

- Scientific Reports (Nature publishing group) Editorial board member
- Condensed matter (MDPI) Editorial board member

量子多体物理学研究室

段下 一平 (准教授)

金子 隆威 (PD)、鏡原 大地 (PD)

後藤 慎平 (PD)、Mikkelsen, Mathias (PD)

学部生 6名

研究の概要

- **量子多体系の数値計算手法の開発**

量子多体系を厳密対角化法で解析すると、数値計算のコストが系のサイズに対して指数関数的に増大する。そのため、多くの場合現実的な実験と対応する結果を得るためには、より効率的な計算手法が必要である。行列積状態とは一次元量子多体系の波動関数を効率的に記述する方法であるが、有限温度の量子状態への応用にはいくつかの障害があった。今年度の研究で、random-phase matrix product states with trotter gates (RPMPST) という行列積状態を用いて有限温度の量子状態を効率よく記述する数値計算手法を開発した。この RPMPST 法を用いて zig-zag ladder 格子上的 Heisenberg 模型の熱力学的性質を解析し、purification という従来の手法で取り扱いが困難であるパラメータ領域でも RPMPST 手法では解析が可能であることを明らかにした。

切断 Wigner 近似 (TWA) 法は量子ダイナミクスにおける量子ゆらぎの効果を近似的に含める準古典的な手法で、具体的には、そのために初期のウィグナー関数を確率分布として古典ダイナミクスの初期状態をサンプリングする。今年度の研究で、SU(3)TWA 法という Bose-Hubbard 模型の強相関領域に適した TWA 法の性能のさらなる向上を目指して SU(2)TWA 法である程度の成功を収めている離散的な TWA(DTWA) 法を SU(3)TWA 法に拡張した。

- **光格子中の Bose 気体の量子非平衡ダイナミクス**

冷却気体系からなるアナログ量子シミュレータは非常に制御性と清浄性が高いため、新奇な量子多体現象の発見に有用である。昨年度の研究では、光格子中の Bose 気体における量子クエンチ後の量子非平衡ダイナミクスを調べた。Mott 絶縁体状態を初期状態とし、超流動状態への量子相転移が起こる転移点近傍に光格子の深さをクエンチした後の一粒子相関の伝搬の様子を調べた。空間 1次元系では行列積状態を用いた厳密計算が実験結果とよく一致し、このことから量子シミュレーションの精度の高さが実証された。一方、空間 2次元系では弱相関領域で妥当性が確認されている Gross-Pitaevskii 平均場理論に基づく TWA 法を試したが、実験結果と定量的な一致は得られず、今後の数値計算手法開発の課題として残された。今年度の研究で、上記の SU(3)DTWA 法を

用いて2次元系の実験結果の再現を目指した。結果として、SU(3)DTWA法が短時間のダイナミクスを定量的に記述できることがわかったが、相関の伝搬速度を抽出できるほど長い時間のダイナミクスを定量的に記述できないこともわかった。そこで、全く別の数値計算手法である projected entangled pair states (PEPS) 法という2次元空間に適したテンソルネットワーク法を用いて実験の数値シミュレーションをしたところ、相関の伝搬速度を抽出できるほどの長時間ダイナミクスを定量的に記述できることがわかった。そのようにPEPS法の当該問題への妥当性が実証できたので、これまで未開拓であったパラメータ領域においてもPEPS法を用いて相関伝搬速度を計算した。

メディア掲載

- マイナビニュース「近大など、二次元での量子シミュレーションの性能を検証する新手法を確立」
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220323-2301346/>
2022年3月23日
- マイナビニュース「約-270℃まで冷却した原子は気体と液体の特徴を持つことが判明、近大が確認」
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220304-2285228/>
2022年3月4日

学術論文（査読付）

1. “Tensor-network study of correlation-spreading dynamics in the two-dimensional Bose-Hubbard model”
R. Kaneko and I. Danshita
Communications Physics, **5**, 65 (2022).
DOI:10.1038/s42005-022-00848-9
2. “Transition between vacuum and finite-density states in the infinite-dimensional Bose-Hubbard model with spatially inhomogeneous dissipation”
S. Asai, S. Goto, and I. Danshita
Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2022**, 033I01 (2022).
DOI:10.1093/ptep/ptac011
3. “Quantum droplet of a two-component Bose gas in an optical lattice near the Mott insulator transition”
Y. Machida, I. Danshita, D. Yamamoto, and K. Kasamatsu
Physical Review A, **105**, L031301 (2022).
DOI:10.1103/PhysRevA.105.L031301

4. “SU(3) truncated Wigner approximation for strongly interacting Bose gases”
K. Nagao, Y. Takasu, Y. Takahashi, and I. Danshita
Physical Review Research, **3**, 043091 (2021).
DOI:10.1103/PhysRevResearch.3.043091
5. “Nonergodic dynamics of the one-dimensional Bose-Hubbard model with a trapping potential”
M. Kunimi and I. Danshita
Physical Review A, **104**, 043322 (2021).
DOI:10.1103/PhysRevA.104.043322
6. “Matrix product state approach for a quantum system at finite temperatures using random phases and Trotter gates”
S. Goto, R. Kaneko, and I. Danshita
Physical Review B, **104**, 045133 (2021).
DOI:10.1103/PhysRevB.104.045133
7. “Reentrance of the Disordered Phase in the Antiferromagnetic Ising Model on a Square Lattice with Longitudinal and Transverse Magnetic Fields”
R. Kaneko, Y. Douda, S. Goto, and I. Danshita
Journal of the Physical Society of Japan, **90**, 073001 (2021).
DOI:10.1103/PhysRevB.104.045133

学士論文

- 「イオントラップ系における局在フォノンの超流動現象の発現機構」
- 「冷却原子 Bose 凝縮系の遠隔実験装置 Albert を用いた Bogoliubov 励起の異常トンネル効果の観測に向けて」
- 「量子シミュレータの遠隔利用による Bose-Hubbard 模型の非平衡ダイナミクスの観測に向けて」
- 「光格子を用いて Maple leaf 格子中の Bose 粒子系を実現する方法の提案」
- 「符号反転した次近接相互作用を持つ Ising 模型で記述される Rydberg 原子集団における表面臨界現象」
- 「2次元量子 Ising 模型における相関伝搬速度の近似手法を用いた解析に向けて」

国際学会・研究会講演

1. Ippei Danshita (presenter, invited)
“Comparison between optical-lattice quantum simulations and numerical simulations in quench dynamics of the Bose-Hubbard model”
Workshop on Quantum Information Science with Cold Atoms オンライン [24 June 2021]

国内学会・研究会講演

1. 鏡原 大地 (presenter), M. Mikkelsen, 金子 隆威, 段下 一平
「Rabi 結合とスピン依存ホッピングを持つ 3 次元引力 Fermi-Hubbard 模型における超流動相転移」
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
2. M. Mikkelsen (presenter), R. Kaneko, D. Kagamihara, I. Danshita
「Resonant superfluidity in a Rabi-coupled spin-dependent」
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
3. 金子 隆威 (presenter), 段下 一平
「低次元縦横磁場反強磁性 Ising 模型における相関伝搬の群速度」
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
4. 中村 優希 (presenter), 金子 隆威, 段下 一平
「符号反転した次近接相互作用を持つ Ising 模型で記述される Rydberg 原子集団」
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
5. 金子 隆威 (presenter), 段下 一平
「テンソルネットワーク法による 2 次元縦横磁場反強磁性 Ising 模型のクエンチダイナミクスの計算」
日本物理学会秋季大会, オンライン [2021 年 9 月 21 日]
6. 金子 隆威 (presenter), 堂田 佳秀, 後藤 慎平, 段下 一平
「正方格子縦横磁場反強磁性 Ising 模型の基底状態相図に現れるリエントラント」
日本物理学会年次大会, オンライン [2021 年 3 月 13 日]
7. 後藤 慎平 (presenter, invited)
「Lindblad 形式で探る観測誘起転移」
理論研究会：量子多体系の相形成とダイナミクス, オンライン [2021 年 4 月 20 日]

競争的外部資金

- 2021-2023 年度 JST 創発的研究支援事業「テンソルネットワーク法と量子シミュレータで切り拓く新奇量子多体现象」
研究代表者:段下 一平 直接経費 4,080,000 円 (2021 年度)
- 2020-2022 年度 科学研究費(若手)「強くエンタングルした状態の数値シミュレーション:行列積表現によるサンプリング」
研究代表者:後藤 慎平 直接経費 800,000 円 (2021 年度)
- 2021-2023 年度 科学研究費(若手)「2次元テンソルネットワーク手法を用いた量子多体系の実時間ダイナミクスの研究」
研究代表者:金子 隆威 直接経費 1,900,000 円 (2021 年度)
- 2018-2022 年度 科学研究費(基盤S)「光格子中超低温原子気体の軌道及びスピン自由度を駆使した新量子物性の開拓」
研究代表者:高橋 義朗(京都大学大学院), 研究分担者:段下 一平 直接経費 4,400,000 円 (2021 年度)
- 2016-2021 年度 JST CREST 研究「冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発」
研究代表者:高橋 義朗(京都大学大学院), 主たる共同研究者:段下 一平 直接経費 5,200,000 円 (2021 年度)
- 2018-2027 年度 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 基礎基盤研究「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」
研究代表者:大森 賢治(分子科学研究所), 共同研究者:段下 一平 直接経費 7,341,000 円 (2021 年度)

学内委員

- 入試委員(前、後期)
- 3年生担任(前、後期)
- ロシアワーキンググループ委員(前、後期)

学外委員

- 学術論文誌 Journal of the Physical Society of Japan の編集委員

量子制御研究室

近藤 康 教授
博士研究員 2 名, 学部生 6 名

研究の概要

- **核磁気共鳴 (NMR) 装置の開発と応用**

NMR は比較的簡単な装置で量子力学的な対象 (原子核のスピン) を操作し測定できる実験手法である。その応用分野は広く、医療における MRI (Magnetic Resonance Imaging) から最先端の物性研究まで幅広い分野で使われている。

2018 年には、電気電子工学科の菅原先生と協力して開発したフェライト磁石を用いた静磁場による NMR 装置を改良して、化学シフトが検出できるまで磁場の均一度を向上させた。

次の項目にも関係するが、これらの卓上型 NMR 装置による量子アルゴリズムの実装にも成功している。

- **量子コンピュータ、特に NMR 量子コンピュータ**

古典コンピュータが 0 と 1 を用いた 2 進数を使って論理演算を行うのに対し、量子コンピュータは量子力学に基づき、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ と見なすことができる二つの状態を論理演算の基礎に置く。量子コンピュータの研究と言っても、その本質は量子力学の研究である。

今、量子コンピュータの分野は非常に面白い。まるで、アメリカの西部開拓時代のようにちょっと危ない雰囲気がある (詐欺師まがいの研究者がいたり、早撃ちの決闘のようにできるだけ早く論文を出さないと競争に負ける、などのことがある)。しかしながら、とても「元気」のある領域である。

化学分析に用いる NMR 装置を用いて、実験的にアルゴリズムの研究を行ってきた。簡単な Deutsch-Jozsa のアルゴリズムからスタートして、「量子テレポーテーション」の実験にも成功している。2008 年度から装置の開発も始めた。

2017 年 10 月から、NTT の物性基礎研究所の斎藤志郎氏がチーム・リーダーの「超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング」の CREST 研究の主たる共同研究者になった。近畿大学では、「量子センサ実現に向けた理論の開発と NMR による原理実証」を行う。この予算で 2021 年度は 2 名の博士研究員 (PD) を採用した。

最近、溶液中の分子を近似的な孤立系とみなして、緩和の研究を行っている。2021 年度には基盤研究 (C) にも採択された。

- **学生実験装置の開発**

コンパクトで簡単に操作できるけれど、教育的な価値のある実験が行える装置を「開発」し、それをを用いた実験の指導法を「研究」している。

これまでに、等電位線、光の干渉、コンデンサーの充放電、相互誘導、高温超伝導、共振回路などの実験を行う装置を作ってきた。「開発」した装置による実験手引き書は私のホームページにて閲覧可能である。また、「物理学実験教育の新しい試み（近畿大学理工学部通信、第31号）」も参照のこと。

- **2021年度の発表論文の概要**

1. 高感度な磁場センサーとして超伝導量子ビットを用いる研究をCREST研究の一環として行っている。その超伝導量子ビットをセンサーとして活用するだけでなく、測定対象を冷却するために使用できることを示した。
2. センサーの数 n が増えるほど、感度が向上することが知られている。通常ノイズ下のセンサーの感度は \sqrt{n} に比例して向上するが、特殊な場合には n に比例して良くなる場合があることを示した。

学術論文（査読付）

1. “Polarizing electron spins with a superconducting flux qubit”
Shingo Kukita, Hideaki Ookane, Yuichiro Matsuzaki, Yasushi Kondo, Physical Review A 105(1) 2022年1月28日
2. “Heisenberg-Limited Quantum Metrology Using Collective Dephasing”
Shingo Kukita, Yuichiro Matsuzaki, Yasushi Kondo, PHYSICAL REVIEW APPLIED 16(6) 2021年12月

学士論文

- 「物体の運動の3次元データの取得」
- 「Deep-Neural-Networkによる楽譜自動作成システム」
- 「オフレゾナンス・エラーに耐性を持つ対称な複合量子ゲート」
- 「3Dプリンターによる磁場の空間分布の測定」
- 「Si(111)-7x7の表面構造」
- 「ダヴィンチの橋の構造原理、解析および模型製作」

国内学会・研究会講演

1. 大兼英朗, 久木田真吾, 松崎雄一郎, 近藤康
「超伝導磁束量子ビットを用いた電子スピン冷却」
日本物理学会秋季大会 (2021) 21aA2-10
2. 久木田真吾, 木屋晴貴, 近藤康
「オフレゾナンスエラーに耐性を持つ複合量子ゲートの幾何学的意味」
日本物理学会秋季大会 (2021) 22pA2-8
3. 久木田真吾, 木屋晴貴, 近藤康
「二種類のエラーにロバストな新しい複合量子ゲート」
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022) 16aE11-1
4. 木屋晴貴, 久木田真吾, 近藤康
「Off-Resonance Error に耐性を持つ複合量子ゲートの一般的な構成法」
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022) 16aE11-2

競争的外部資金

- 戦略的創造研究推進事業、研究タイプ「チーム型 (CREST)」
研究領域：量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出
研究課題：超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング
期間：2017 年 10 月 1 日より 2023 年 3 月 31 日まで (予定)
研究代表者：齋藤 志郎
研究題目：量子センサ実現に向けた理論の開発と NMR による原理実証
主たる共同研究者：近藤 康
2021 年度直接経費：789 万円
- 基盤研究 (C)
分野：半導体, 光物性および原子物理関連
研究題目：NMR 量子コンピュータの手法による開放系の研究
研究代表者：近藤 康
2021 年度直接経費：80 万円

学外活動

- 近畿大学附属中学校体験実験
近畿大学 2021 年 8 月 27 日

- 泉北高校 SSH 「恒星間宇宙旅行」講演
オンライン 2020年12月21日

学内委員

- 教務委員（前期）
- 基礎物理学世話人（前、後期）
- コース主任（後期）

学外委員

- 日本物理学会領域1量子エレクトロニクス世話人

固体電子物理研究室

増井 孝彦 准教授
学部生 7名

研究の概要

- 鉄系超伝導体の電気化学的合成と電子回路の作成

近年、当研究室では電気化学法による超伝導試料の作製に取り組んでいるが、電解液の特性を決定するためのサイクリックボルタンメトリー (CV) の測定系をオペアンプによって構成された自作アナログ回路に置き換え、FeSe 膜の作成を行った。

- 高温超伝導体 ReBCO における Y サイトの Al 置換の検証

銅酸化物高温超伝導体 ReBCO の Re サイトへ収まる原子種にはかなりの自由度があり、Al についても報告例があったことからその置換可能性について検証を行った (Y. Yu *et al.*, 1997)。粉末 X 線回折の評価では Re サイトへの Al 導入については否定的な結果が得られ、むしろ Ba との置換可能性が示唆された。

学術論文 (査読付)

1. “Unsupervised clustering for identifying spatial inhomogeneity on local electronic structures”
Hideaki Iwasawa, Tetsuro Ueno, Takahiko Masui, Setsuko Tajima
npj Quantum Materials (Nature) (2022)(2月号)
ISBN : <https://doi.org/10.1038/s41535-021-00407-5>

学士論文

- 「鉄系超伝導体 FeSe の電気化学的合成と電子回路の作成」
- 「Phonopy と Quantum Espresso によるフォノンの第一原理計算」
- 「DV-X α 法を用いた銅酸化物超伝導体 YBa₂Cu₃O_{7- δ} 系の電子状態計算」
- 「容量法による複素誘電率の測定」
- 「銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 の Ni-Zn 同時置換効果」

- 「単相 $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の作成と最適ドーピングに対応するアニール温度の調査」
- 「高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ における Y サイトの Al 置換の検証」

競争的外部資金

- 2020-2022 年度二国間交流事業「角度分解光電子分光による銅酸化物高温超伝導体における電子・格子相互作用の解明」
研究分担者：増井 孝彦

学外活動

- 近畿大学 理工学部 中学校理科体験実験 2021 年 8 月 27 日

その他

- 教員採用試験春期対策講座 【専門】理科実験(物理) 2022 年 3 月 1 日～3 月 11 日

学内委員

- 学生委員（前期）、教務委員（後期）、教員養成カリキュラム委員（前、後期）
- 33 号館物理実験室世話人（前、後期）

生物物理学研究室

矢野 陽子 准教授

学部生 8 名

研究の概要

- **マランゴニ対流生成消滅にともなう自己組織化膜形成ダイナミクスの研究**
マランゴニ対流は、表面張力が場所によって異なる場合に自発的に生じる対流のことである。一般に界面で自己組織化膜が形成されるとき、しばしばマランゴニ対流を伴う。本研究では、マランゴニ対流によって、界面に生成消滅する自己組織化膜の形成過程を、表面張力および時分割 X 線反射率測定によって観測する。界面の電子密度分布の時間変化から、両親媒性分子の自己組織化機構を分子レベルで理解することを目指す。
- **タンパク質の界面吸着ダイナミクスの観測**
タンパク質は非常に複雑で多種多様の構造を持つ。これは、個々のタンパク質分子が生体内中に存在する何千という異なる分子をわずかな三次元的相互作用で認識することで、その機能を発現するというしくみによる。本研究では、タンパク質が熱力学的な最安定構造（ネイティブ状態）から、外部環境の変化に応じて変性（アンフォールド状態）する際の構造変化を追跡することで、最安定構造を決めるファクターについて検討している。放射光施設の高輝度 X 線を用い、構造変化の様子を実時間計測する手法の開拓も行っている。

学術論文（査読付）

1. “Visualization of the Orientation of Amphipathic Peptides at the Air-water Interface by X-ray Reflectometry”
Mari Okuno, Makoto Itagaki, Taka-aki Ishibashi, and Yohko F. Yano
Analytical Science, **37**, 1505 (2021) (11 月号)
DOI: <https://doi.org/10.2116/analsci.21P068>
2. “Understanding the dynamics of a lipid monolayer on a water-surface under a Marangoni flow”
Yohko F. Yano, Toshiaki Ina, and Tomoya Uruga
Colloids and Interfaces, **5**, 31 (2021) (6 月号)
DOI: <https://doi.org/10.3390/colloids5020031>

学術論文（査読なし）

1. “A Marangoni-Driven Molecular Automaton”
Y. F. Yano H. Tada, E. Arakawa, W. Voegeli, T. Ina, T. Uruga and T. Matsushita
Photon Factory Highlights 2020 (2021)
ISSN 2432-4035
2. “液体表面に生じるマランゴニ対流の微視的観測”
矢野陽子, Wolfgang Voegeli, 荒川悦雄, 伊奈稔哲, 宇留賀朋哉
放射光, **35**, 22-31 (2022) (1月号)
ISSN : 0914-9287

学士論文

- 「Python によるポアズイユ流れのシュミレーション実験」
- 「蛍光 X 線による物質の測定」
- 「赤外分光法による卵白の加熱及びタンパク質分解酵素による構造変化測定」
- 「移流拡散方程式のシミュレーション」
- 「相対湿度の分布を伴う大気の熱平衡」
- 「マランゴニ対流による表面張力の自発振動の振幅と膜弾性率の関係性」
- 「フーリエ赤外分光計 (FT-IR) を用いたセラミドを構成するラメラ構造の水分量測定」
- 「生分解性プラスチックの分解過程における構造解析」

国際学会・研究会講演

1. Yohko F. Yano(Invited talk)
Proteins at liquid interfaces, Pacificchem2021, Hawaii [19 Dec. 2021]
2. Yohko F. Yano(Presenter)
Marangoni-driven spontaneous oscillation of surface tension, Pacificchem2021, Hawaii [18 Dec. 2021]

3. Yohko F. Yano(Presenter)

Periodic structural changes in a self-assembled monolayer under spontaneous oscillation of surface tension, Pacificchem2021, Hawaii [20 Dec. 2021]

学外活動

- 『SPring-8 秋の学校』グループ講習「ソフト界面の構造解析」 講師
高輝度光科学研究センター, 2021年12月19日 - 22日

運営

学内委員

- 施設設備委員
- 体育会フィギュアスケート部部长

学外委員など

- SPring-8 ユーザー協同体「ソフト界面科学研究会」代表
- 大阪府原子炉問題審議会委員
- 文部科学省 学術変革領域研究 (A) 専門委員会審査委員

生命動態物理学研究室

西山 雅祥 准教授
上之家由美子 (研究員)
学部生 6 名

研究の概要

- 環境感受性蛍光タンパク質の開発と評価

これまでの研究では、蛍光タンパク質 GFP の変異体の構築と分光特性の評価を行ってきた。蛍光タンパク質の β バレル構造に変異を与え発色団へに水分子がアクセスしやすくさせると、環境感受性が変化することが明らかにされていたが、その詳細なメカニズムは不明なままであった。本研究では、各種の蛍光タンパク質の β バレル構造にグリシンを挿入させた変異体を構築し、pH、温度、圧力、および疎水性変化により分光特性の変化を調べた。各実験条件の比較考察により、 β バレル構造へのグリシン挿入が発色団周辺の水素結合ネットワークに大きな影響を与えることが判明した。また、高圧力下の蛍光分光の結果からは、圧力の増大とともに蛍光強度を増加させる知見も得られており、生きた細胞内の圧力センサーとしても利用できることが示された (T.J. Morikawa et al. Biophys Physicobio 18 2021)。

- 高圧力下における哺乳類細胞の遺伝子発現量と形態変化

高圧力を機械刺激として利用して、マウス胚性線維芽 (MEF) 細胞およびマウス胚性幹 (ES) 細胞に対する影響を評価した。高圧力チャンバー内に MEF 細胞を封入し観察した所、糸状仮足や葉状仮足の収縮が観察された。こうしたダイナミックな MEF 細胞形態の変化は、細胞と基板との結合が弱まることで引き起こされていると考えられる。次に、機械刺激に応じて発現量を変化させる遺伝子を対象にして、加圧による発現量の変化を調べた。MEF 細胞では、細胞死に関連する遺伝子 (DAP3) の発現量がアップレギュレーションがされた方、その他の遺伝子には大きな変化はみられなかった。同様にして、細胞分化に関連する遺伝子にも、発現量に大きな変化はなかった。その一方で、Oct4 や Sox2 などの多能性に関連する遺伝子では、MEF だけでなく ES 細胞においても、アップレギュレーションがみられた。以上の結果から、静水圧は哺乳類細胞の多能性遺伝子を活性化することが示された (K. Okamoto et al. Bio Open 10 2021)。

学術論文（査読付）

1. “Glycine insertion modulates the fluorescence properties of *Aequorea victoria* green fluorescent protein and its variants in their ambient environment”
Takamitsu J. Morikawa, Masayoshi Nishiyama, Keiko Yoshizawa, Hideaki Fujita and Tomonobu M. Watanabe.
Biophysics and Physicobiology, **18**, 145-158 (2021)
DOI: 10.2142/biophysico.bppb-v18.016
2. “Pressure-induced changes on the morphology and gene expression in mammalian cells”
Kazuko Okamoto, Tomonobu M. Watanabe, Masanobu Horie, Masayoshi Nishiyama, Yoshie Harada and Hideaki Fujita.
Biology Open, **10**, bio058544 (2021)
DOI:10.1242/bio.058544
3. “高圧力下での鞭毛運動の活性化イメージング”
八木俊樹, 西山雅祥
高圧力の科学と技術, **31**, 66-73 (2021)
DOI:10.4131/jshpreview.31.66

学術論文（査読なし）

1. “高圧力下で蘇る鞭毛運動”
八木俊樹, 西山雅祥
化学, **76**, 41-45 (2021)

学士論文

- 「スマホカメラを用いた透過型分光器の作製と評価」
- 「光ピンセット法の開発」
- 「熱水噴出孔を模倣した温度差環境の構築と大腸菌の温度走性イメージング」
- 「大腸菌遊泳運動の圧力応答」
- 「ブタ精子鞭毛運動の温度変調イメージング」
- 「麻酔薬の圧拮抗作用の実時間イメージング」

国際学会・研究会講演

1. Kazuko Okamoto, Tomonobu Watanabe, Masanobu Horie, Masayoshi Nishiyama (presenter), Yoshie Harada, and Hideaki Fujita
「Pressure-induced changes on the morphology and gene expression in mammalian cells」
“66th Biophysical Society Annual Meeting, USA” オンライン [11 Feb. 2022]

国内学会・研究会講演

1. 西山雅祥 (presenter)
「減圧力顕微鏡の開発」
“2022 年生体運動研究合同班会議プログラム” 名古屋 [7 Jan. 2022]

競争的外部資金

- 2019-2021 年度 科学研究費 (基盤 B) 「リズムカルな鞭毛運動を誘起する分子マシナリの力学制御」
研究代表者:西山 雅祥 直接経費 2,900,000 円 (2021 年度)

学内委員

- 就職担当委員 (前、後期)
- 2 年生担任 (前、後期)

学外委員

- 日本生物物理学会 分野別専門委員 (高圧)

一般相対論・宇宙論研究室

石橋 明浩 教授
博士3名 修士4名 学部生6名

研究の概要

- **ブラックホール時空の有質量摂動論**

今年度は、背景時空が局所的に反ドジッター (AdS) 時空となる、いわゆるトポロジカル・ブラックホールおよびその特別な場合について、様々なボソン場の線形摂動のマスター方程式の大域解の構成と安定性解析を行った。すでに様々な有質量および零質量線形摂動場に対して、力学自由度が独立した形式のマスター方程式は得られており、その一般解も超幾何関数を用いて具体的に求められている。本年度は、それらの一般解から、適切な境界条件を満たす大域解を構成する際に、境界条件と波動（特に不安定モード）の関係を精密かつ網羅的に決定することを行った。

中心特異点の解消された量子ブラックホール、あるいは古典論における現象論的モデルの正則ブラックホールは、ブラックホール表面である事象の地平面の他に、内部に別の地平面（コーシー地平面）を持つ。このようなコーシー地平面の存在は、一般相対論・重力理論における未解決問題である宇宙検閲官仮説に反する。そこで、正則ブラックホール内部のコーシー地平面の安定性解析を目的として、正則ブラックホールを模倣する時空を、ドジッターや反ドジッター時空領域と古典的荷電ブラックホール解との時空接続により構成することを試みた。大学院学生とともに遂行した。

- **量子補正荷電ブラックホールの構成と大域構造**

漸近安全性における厳密繰り込み群的手法に基づく量子補正したブラックホール時空の構成を、静的球対称荷電ブラックホールの場合に試みた。量子補正により中心にある曲率特異点が、ミンコフスキー時空、ドジッターや反ドジッターなどの正則な時空領域となる場合、あるいは弱い特異点が発生する場合があります。量子補正された球対称荷電ブラックホールの大域構造を考察した。

- **「極限宇宙」の問題**

光的エネルギー条件、特に共形不変な「CANEC」や「重み付きANEC」の研究を行った。昨年度までに AdS/CFT 対応を用いた考察により、強結合量子場に対する重み付き ANEC の成否について、閉じた宇宙を表す時空上で議論することができた。今年度は、この重み付き ANEC を、量子場の効果が本質

的となると予想されるホーキング輻射により蒸発過程にあるブラックホール時空上で検討した。この場合、時空は閉じた宇宙にはなっていないが、蒸発過程にあるブラックホール地平面の振舞いは閉じた宇宙とよく似た構造をもっているため、これまでの ANEC 研究を応用することができ、結局、われわれの提案した重み付き ANEC は、蒸発するブラックホール時空上で成立し得ることを示すことができた。

学術論文（査読付）

1. "The averaged null energy condition on holographic evaporating black holes" Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda, JHEP 03 (2022) 104 • e-Print: 2111.05151 [hep-th]
2. "Quantum improved charged black holes" Akihiro Ishibashi, Nobuyoshi Ohta, Daiki Yamaguchi, Phys.Rev.D 104 (2021) 6, 066016 • e-Print: 2106.05015 [hep-th]
3. "First law of entanglement entropy in AdS black hole backgrounds" Akihiro Ishibashi and Kengo Maeda, Phys.Rev.D 104 (2021) 2, 026004 • e-Print: 2104.01862 [hep-th]

学術論文（査読なし）

1. 理工学総合研究所紀要 研究報告「令和2年度日本物理学会年次大会シンポジウム「ロジャー・ペンローズと相対論」招待講演（令和3年3月15日）の報告」

博士論文

- 「ブラックホール時空上の線形摂動場のダイナミクス」

修士論文

- 「時空接続による正則ブラックホールモデルの構成とその安定性解析」
- 「ブレーンワールドモデルの発展とホログラフィー原理との関係」
- 「漸近 AdS 時空における有質量ボソン場のダイナミクス」

学士論文

- 「事象の地平面の面積の振る舞いでみるブラックホール第二法則」
- 「ブラックホールのトポロジー」
- 「定常回転ブラックホールの事象の地平面と Killing ベクトル」
- 「ブラックホールの表面重力と第 0 法則」
- 「ブラックホールと熱力学第一法則との関係」
- 「ブラックホールの一意性及び Hawking 放射」

国際学会・研究会講演

1. International workshop "String theory, gravity, and cosmology" (SGC2021) Pohang, S.Korea, 招待講演 "Averaged Null Energy Conditions and Holography"

国内学会・研究会講演

1. 天文・天体物理若手夏の学校 招待講演 「BMS 対称性とメモリー効果」 2021 年 8 月 23 日 (オンライン実施)
2. 大阪市立大セミナー 2021 年 5 月 21 日 「重力波とエントロピー」
3. 京都大学基礎物理学研究所セミナー 2021 年 12 月 23 日 「Averaged null energy conditions and holographic evaporating black hole」
4. 研究会：重力理論と弦理論の新基軸 「Causality and Positivity」 招待講演 大分県別府市 2022 年 3 月 30 日
5. JGRG onlinewebinar 「Averaged null energy conditions and holographic evaporating black hole」 招待講演 2022 年 3 月 30 日
6. 領域会議：「Black and singularities from Quantum Information」 京都大学基礎物理学研究所 2022 年 3 月 8 日
7. 研究会：相対論と重力理論の現在・過去・未来 「Kinematics vs Dynamics in General Relativity」 招待講演 大阪市立大 2022 年 3 月 12 日

競争的外部資金

- 学術変革領域研究 (A) 「量子情報を用いた量子ブラックホールの数理解明」
研究代表者 石橋明浩 直接経費 2,900,000 円 (2021 年度)
- 基盤研究 (C) 「ブラックホール時空の有質量摂動論」 研究代表者 石橋明浩
直接経費 1,000,000 円 (2021 年度)
- 学術変革領域研究 (A) 「極限宇宙の物理法則を創る - 量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」 (研究代表者 高柳匡) 研究分担者 石橋明浩 100,000 円 (2021 年度)
- 基盤研究 (C) 「AdS/CFT 双対性を用いた曲がった時空での強結合場の解析」
(研究代表者 前田健吾) 研究分担者 石橋明浩 300,000 円 (2021 年度)

学外活動

- 第 14 回宇宙 (天文) を学べる大学合同進学説明会 2021 年 5 月 31 日 各大学個別説明会 補助 (オンライン)

書籍・出版物 (電子書籍・電子出版物含む)

- 数理学 2022 年 1 月号 「物理学におけるさまざまな視点と普遍性」サイエンス社

学内委員

- 理工学部人権教育・ハラスメント防止委員会委員長 (前期)
- 総合理工学研究科 大学院委員会委員 (前期・後期)
- 基本構想推進委員会
- 大学院生サミット実行委員 (後期)

学外委員

- 日本物理学会代議員

宇宙論研究室

井上 開輝 教授
修士1名 学部生7名

研究の概要

- **Subaru HSC サーベイによる重力レンズ天体の探査**

Subaru HSC サーベイとは Hyper Supreme Cam (HSC) という広視野観測装置を取り付けた Subaru 望遠鏡による可視光・近赤外線領域における広視野サーベイである。我々は、Subaru HSC サーベイで得られた銀河マップを用いて、重力レンズ天体を探す試みを行っている。レンズ天体を用いて、レンズ銀河に付随するダークマターの制限を行ったり、光源となる銀河の像を再構築することによって、遠方銀河の詳細に迫ることができる。今回、我々は Subaru HSC サーベイの PDR2 公開データに含まれている銀河 6250 万個から、機械学習を用いて銀河スケールの重力レンズ候補天体 206 例を新たに発見した (R. Canameras et al. A&A 653, 2021)。

- **eROSITA サーベイによる中間赤外銀河と活動銀河核の探査**

WISE 衛星で観測された中間赤外 (W4) 銀河カタログと X 線宇宙望遠鏡 eROSITA で観測された eFEDS サーベイデータのクロスマッチングから、中間赤外銀河と活動銀河核 (AGN) 合わせて 692 天体の様々な物理的性質を調査した。その結果、82% の天体は X 線で明るい活動銀河核であることが分かった。また、5% の天体は AGN の強い輻射圧により外部の星間物質を吹き飛ばす AGN フィードバック相にあることが分かった (T. Yoshiki et al. A&A 661 2022)。

- **スーパーボイドにおける銀河形成**

銀河形成の理解において、外部の影響が小さい低密度環境における銀河の進化を調べることは大変重要である。10-20Mpc/h 程度の半径を持つ宇宙ボイド中では、宇宙の平均密度程度の環境に比べ銀河進化が遅くなり、星形成銀河の割合が増大することが示唆されている。しかし、サンプルの揺らぎが大きいため、確定的なことは未だ不明である。我々は、銀河形成における環境効果を調べるため、半径が 200Mpc を超えるスーパーボイド中における銀河分布の観測を提案する。スーパーボイドの膨張率は宇宙の平均的な値よりも高く、スーパーボイド内部で密度揺らぎの成長が遅くなる。その結果、銀河がゆっくり進化するため、銀河の数密度は減少するが、銀河バイアスや星形成銀河の割合の増大が予測される。スーパーボイドは典型的なボイドに比べ、そのサイズが圧倒的に大きいので、1つのサンプルでも銀河の環境効果を調べるのが可能である。我々は、手初めに Subaru/HSC により、赤方偏移 0.4 近くにある宇宙マイ

クロ波背景輻射「コールドスポット」周辺の H α エミッター (HAE) のマッピング観測を行うことを提案する。HAE のクラスタリングから、銀河形成に与える影響を調べる (K.T. Inoue 日本天文学会 2022)。

学術論文 (査読付)

1. “The eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS): A multiwavelength view of WISE mid-infrared galaxies/active galactic nuclei”
Yoshiki Toba, Teng Liu, Tanya Urrutia, Mara Salvato, Junyao Li, Yoshihiro Ueda, Marcella Brusa, Naomichi Yutani, Keiichi Wada, Atsushi J. Nishizawa, Johannes Buchner, Tohru Nagao, Andrea Merloni, Masayuki Akiyama, Riccardo Arcodia, Bau-Ching Hsieh, Kohei Ichikawa, Masatoshi Imanishi, Kaiki T. Inoue, Toshihiro Kawaguchi, Georg Lamer, Kirpal Nandra, John D. Silverman, and Yuichi Terashima
Astronomy and Astrophysics, **661**, A15 (2022) (3月号)
DOI:10.1051/0004-6361/202141547
2. “HOLISMOKES. VI. New galaxy-scale strong lens candidates from the HSC-SSP imaging survey”
R. Canameras, S. Schuldt, Y. Shu, S. H. Suyu, S. Taubenberger, T. Meinhardt, L. Leal-Taixe, D. C. -Y. Chao, K. T. Inoue, A. T. Jaelani, and A. More
Astronomy and Astrophysics, **653**, id.L6, 10 (2021) (9月号)
DOI:10.1051/0004-6361/202141758
3. “The eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS): An X-ray bright, extremely luminous infrared galaxy at $z = 1.87$ ”
Yoshiki Toba, Marcella Brusa, Teng Liu, Johannes Buchner, Yuichi Terashima, Tanya Urrutia, Mara Salvato, Masayuki Akiyama, Riccardo Arcodia, Andy D. Goulding, Yuichi Higuchi, Kaiki T. Inoue, Toshihiro Kawaguchi, Georg Lamer, Andrea Merloni, Tohru Nagao, Yoshihiro Ueda, and Kirpal Nandra
Astronomy and Astrophysics, **649**, L11 (2021) (4月号)
DOI:10.1051/0004-6361/202140317

学士論文

- 「天文学チャットボットの開発」
- 「自然言語処理」
- 「畳み込みニューラルネットワークによる画像の識別」

- 「位置天文学に関する 3DCG の作成」
- 「銀河による重力レンズとシミュレーション」
- 「超大質量ブラックホール連星を含む SIE モデルの重力レンズ現象」
- 「MG0414+0534 近傍の暗黒矮小銀河のサブミリ波放射」

国内学会・研究会講演

1. Kaiki Taro Inoue (presenter), Rhythm Shimakawa, Atsushi J. Nishizawa, and Teppei Okumura
「スーパーボイドにおける銀河形成」
日本天文学会春期年会 オンライン [4 Mar. 2021]

競争的外部資金

- 2018 年度 国立天文台チリ観測所 ALMA 共同科学研究事業 「ALMA による暗黒矮小銀河とダークマターの解明」 区分 A 2018-07A
研究代表者:井上 開輝 直接経費 790,000 円 (2021 年度)

学外活動

- 「第 14 回宇宙（天文）を学べる大学」合同進学説明会 講演
大阪市立科学館 2021 年 6 月 13 日

学内委員

- 理工学部図書広報委員会委員長、WEB 委員会小委員長（前、後期）
- 物理学コース WEB サイト係（前、後期）
- 4 年生担任（前、後期）
- 理工学部同窓会幹事（前、後期）

高エネルギー天体物理学研究室

信川 久実子 講師
学部生 6 名

研究の概要

- X 線天文衛星すざくによる超新星残骸の観測

超新星残骸 (以下 SNR) の多くは、電離が優勢なプラズマ (IP) を持ち、やがて電離と再結合が平衡状態 (CIE) になるが、近年幾つかの SNR で再結合が優勢なプラズマ (RP) が発見されている。3C 400.2 は、2つの先行研究で RP が存在すると報告されているが (Broersen et al. 2015; Ergin et al. 2017)、両者は互いに矛盾する結果を報告している。我々は、この矛盾がバックグラウンドの評価方法に起因すると考え、すざく衛星のデータを用いてバックグラウンドを丁寧に評価した上でプラズマ状態を調査した。その結果、3C 400.2 のプラズマは CIE プラズマと IP の 2 成分で説明できることを見出した [学士論文 1]。

3C 396 (G39.2-0.3) は、中央にパルサー風星雲があり、西側の衝撃波が分子雲と相互作用している SNR である。先行研究では、SNR プラズマは、温度 $kT_e \sim 0.6-1$ keV、電離タイムスケール $n_e t \sim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ の IP で表された (e.g., Harrus & Slane 1999)。このようなパラメータをもつプラズマは、検出可能な鉄 K 輝線を放射している可能性があるが、3C 396 で鉄 K 輝線バンドの詳細な調査は行われていない。そこですざくを用いて鉄 K 輝線の測定を行い、SNR の高温プラズマ由来と考えられる He 状鉄イオンからの K 輝線を $\sim 6\sigma$ の有意度で発見した。また中性鉄からの K 輝線 (以降中性鉄輝線) を $\sim 2\sigma$ の有意度で検出した。中性鉄輝線は、有意と言えないものの、低エネルギー宇宙線 ($\lesssim 10^8$ eV) と分子雲の相互作用に由来するものだろう [学士論文 2]。

低エネルギー宇宙線は、太陽磁気圏による遮蔽により地球では直接観測できない。ガンマ線も放射しないため、高エネルギー宇宙線のような間接観測も難しい。3C 396 のように、低エネルギー宇宙線と分子雲の衝突で発生する中性鉄輝線を観測することは、低エネルギー宇宙線観測の新たな手法である。我々は、銀河面上かつ銀河中心の西側領域に位置する超新星残骸で、中性鉄輝線の系統調査を開始した [学士論文 3]。宇宙線測定のプローブである電離率、中性鉄輝線、ガンマ線放射という 3 つの観測量は、異なるエネルギーの宇宙線に起源を持つため、同じ場所で 3 つとも観測することで、広帯域な宇宙線の情報が得られる。しかし、SNR における電離率の測定はわずか 3 例である。我々は中性鉄輝線とガンマ線が観測されている W44 で、ALMA を用いた電離率測定の観測提案を行い、採択された。

- **次期 X 線天文衛星 XRISM 搭載 X 線 CCD の開発**

2022 年度打ち上げ予定の XRISM 衛星用 X 線 CCD を開発している。本年度は、筑波宇宙センターで取得したフライトモデル (実機) を用いた冷却試験のデータを用いた性能評価 [学士論文 4] と、Goffset の調査を行なった。XRISM 用 CCD 素子では、1 ピクセルイベントよりも複数ピクセルにまたがったイベントの方が波高値が高くなるという現象があり、その波高値の差を Goffset とよんでいる。Goffset の物理的メカニズムは分かっておらず、較正手法に不定性があった。我々はノイズが Goffset に影響を与えているという仮説のもと、シミュレーションを用いてノイズと Goffset の関係を調べ、ノイズが増加すると Goffset も増加すること、あるノイズ値での Goffset が実データを再現することを確認した。さらにシミュレーションデータから算出した補正パラメータを用いて実データの波高値を補正したところ、Goffset が解消することを確認した [学士論文 5]。

- **次世代 X 線天文衛星用検出器 XRPIX の開発**

次世代 X 線天文衛星用ピクセル検出器として、京都大学や高エネルギー加速器研究機構が中心となって XRPIX を開発してきた。本研究室でも XRPIX の開発や評価実験を行うため、その評価システムを立ち上げ [学士論文 6]、問題なく性能評価を行えることを確認した [学士論文 7, 8]。

- **超小型衛星 SpaceTuna1 の開発**

超小型衛星 SpaceTuna1 の開発を、理工学部電気電子工学科の前田佳伸准教授および株式会社エクセディと共同で行なっている。SpaceTuna1 には日本カーバイド工業株式会社と共同開発した再帰性反射シートを装着する。ミッションの主目的は、軌道上の衛星に地上からレーザーを照射し、反射強度を地上の望遠鏡で測定することである。本年度初めに実施された JAXA の安全審査 phase-0/I/II を経て、フライトモデルの組み立てや各試験を行った。本年度末現在、安全審査 phase-III の準備を行なっている。

学術論文 (査読付)

1. “Discovery of a Wind-blown Bubble Associated with the Supernova Remnant G346.6–0.2: A Hint for the Origin of Recombining Plasma”
H. Sano, H. Suzuki, K. K. Nobukawa, M. D. Filipovic, Y. Fukui, T. J. Moriya
Astrophysical Journal, **923**, 15 (2021)
DOI: 10.3847/1538-4357/ac1c02
2. “X-Ray Emission from the PeVatron-candidate Supernova Remnant G106.3+2.7”
Y. Fujita, A. Bamba, K. K. Nobukawa, H. Matsumoto
Astrophysical Journal, **912**, 133 (2021)
DOI:10.3847/1538-4357/abf14a

学術論文（査読なし）

1. “Measurement of Low-energy Cosmic Rays”
K. K. Nobukawa
New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond. ASP Conference Series, Vol. **528**, Astronomical Society of the Pacific (2021), p.415

学士論文

1. 「X線天文衛星すざくによる超新星残骸 3C 400.2 のプラズマ状態の調査」
2. 「X線天文衛星すざくによる超新星残骸 3C 396 からの鉄輝線の発見」
3. 「超新星残骸における低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線の探査」
4. 「X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における撮像モードごとの性能評価」
5. 「X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 素子における Goffset のシミュレーション」
6. 「次世代 X線天文衛星用 SOI ピクセル検出器の実験システムの構築及び素子の不具合について」
7. 「次世代 X線天文衛星用 SOI ピクセル検出器の動作条件の最適化」
8. 「次世代 X線天文衛星用 SOI ピクセル検出器におけるイベントパターンを用いた電子雲半径の推定」

国内学会・研究会講演

1. 信川久実子 (招待講演)
「低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線探査と今後の展望」
SNR Workshop 2022、オンライン開催 [2022年3月28日-29日]

競争的外部資金

- 科学研究費助成事業 若手研究「宇宙 X 線精密観測による低エネルギー宇宙線の銀河面分布とスペクトルの初測定」
研究代表者: 信川久実子 直接経費 500,000 円 (2021 年度)
- 公益財団法人山田科学振興財団 2020 年度研究援助「X 線観測を用いた新手法による低エネルギー宇宙線の探査と起源の解明」
研究代表者: 信川久実子 直接経費 2,500,000 円 (2020–2021 年度)
- 科学研究費助成事業 国際共同研究強化 (B) 「遠方 AGN 探査による宇宙再電離光子源解明のための革新的 X 線撮像分光器の開発研究」
研究分担者: 信川久実子 直接経費 500,000 円 (2021 年度)
- 科学研究費助成事業 基盤研究 (C) 「超精密 X 線分光を用いた運動測定とプラズマ診断による銀河中心領域の活動史の解明」
研究分担者: 信川久実子 直接経費 100,000 円 (2021 年度)

学外活動

- 大阪府立北野高等学校 第一学年 課題研究に関する講演会
「課題研究の進め方」2022 年 1 月 21 日
- 第 192 回 六稜トークリレー講師
「エックス線で観る天の川銀河」2021 年 7 月 17 日
- 大阪府立北野高等学校 第二学年 課題研究に関する講演会
「課題研究の進め方」2021 年 7 月 9 日
- 大阪府立北野高等学校 WWL 課題研究「系外惑星の研究」指導 (2021 年度)

学内委員

- 安全管理・衛生委員 (前、後期)
- 物理学コース Slack 係 (前、後期)

学外委員

- 高エネルギー宇宙物理連絡会 運営委員 (2021–2022 年度)