

物理学教室年次研究報告

2023年度

大阪公立大学 大学院理学研究科・理学部
物理学教室

目次

序.....	1
2023年度物理教室談話会.....	2
研究報告	
<u>基礎物理学講座</u>	
素粒子論研究室.....	11
原子核理論研究室.....	15
宇宙物理研究室.....	19
数理物理（場の理論・弦理論）研究室.....	23
数理物理（表現論）研究室.....	27
<u>宇宙・高エネルギー講座</u>	
高エネルギー物理学研究室.....	30
宇宙・素粒子実験物理学研究室.....	34
電波天文学研究室.....	38
宇宙線物理学研究室.....	42
重力波実験物理学研究室.....	46
<u>物性物理学講座</u>	
素励起物理学研究室.....	50
電子相関物理学研究室.....	54
非線形物理学研究室.....	57
量子動力学研究室.....	59
生体光物理研究室.....	63
生体・構造物性物理学研究室.....	67
光エレクトロニクス物理研究室.....	69
光物性物理学研究室.....	71
レーザー量子物理学研究室.....	75
超低温物理学研究室.....	79

分子磁性研究室	82
構造物性研究室	85
熱電物性研究室	88

2023 年度 物理学教室「年次報告」序文

大阪公立大学が発足しての2年、つまり府大・市大の物理が統合されて公立大物理学教室が発足しての2年が過ぎました。キャンパスはいまも中百舌鳥・杉本と分かれてはいますが、1つの教室を共に運営していくための手順や意思疎通はずいぶんとスムーズになりました。大学統合は膨大な作業と痛みを伴う事業ではありますが、公立大物理は順調なスタートを切ったと言え、2025 年度には杉本キャンパスに全物理がそろうのが今からとても楽しみです。

公立大物理学教室は専任教員46名を擁する日本有数の規模と質を誇る研究者集団となりました。科学研究において多様性はなによりも重要であり、様々なバックグラウンドと専門分野の研究者が横に密なつながりをもって運営する教室、そして学部・大学院教育から生まれるアウトプットは大きな期待を抱かせてくれます。2023 年度にも多くの研究成果が発表され、有力科学雑誌への掲載、大学院生の研究発表実績や複数件の受賞が報告されているのは喜ばしく勇気づけられるものでした。さらに物理学教室の将来を見据えての人事提案と議論なども活発にお、次、次年度以降のますますの発展が期待されます。

ここに2023年度の全物理学教室の活動報告をまとめることができたのはうれしい限りです。作成にご協力いただいた教室全教員のみなさん、そして編集にご尽力いただいた広報担当委員のみなさまに心よりお礼申し上げます。

2023 年度 物理学教室 談話会

談話会委員（五十音順）：藤井、堀越、森山、前澤

野口悟先生最終講義

日時： 2024/03/15(金) 13:00 - 14:30

場所： 大阪公立大学・中百舌鳥キャンパス・A12 棟 サイエンスホール

題目： 「物性研究ウラ街道」

要旨：研究とは道なき道を切り開くもので街道などない。また、来た道を振り返ってみても多くは原形をとどめずどこを歩いてきたかすらわからない。しかしながら、長年を振り返るとき後に続く研究者たちによって道らしきもの、街道らしきものがいくつか見える。本日の講演では私自身が歩んできた道を振り返り、辛うじてウラ街道と呼べるものを紹介する。

講師：南野 彰宏（横浜国立大学理工学部）

題目：「スーパーカミオカンデによる超新星背景ニュートリノ探索」

日時：2024 年 1 月 11 日（木）10:45 - 13:15

場所：杉本キャンパス 理学部棟 F204

概要：宇宙に初期に存在した元素は水素とヘリウムのみであり、現在の宇宙に存在する多種多様な元素は恒星内部での核融合反応や超新星爆発やその後の中性子星の連星合体などによって生成されたと考えられている。観測可能な宇宙ではこれまでに 10^{18} 回の重力崩壊型超新星爆発があったと考えられており、これらの星の歴史を探ることは宇宙での元素合成の歴史を解き明かす鍵となる。また、これまで光学観測に基づく星形成率（SFR）理論から予想される超新星発生頻度と実際の観測結果に有意な違いがあり、その原因を解明には超新星背景ニュートリノの直接観測が必須である。本談話会では、硫酸ガドリニウムを加えて感度を高めたスーパーカミオカンデによる超新星背景ニュートリノ探索を紹介する。

講師：Francis Atta Howard（University of Abomey-Calavi, Republic of Benin）

題目：Group-Algebraic Characterization of Spin Particles: Semi-Simplicity, $SO(2N)$ Structure and Iwasawa Decomposition

日時：2023 年 12 月 25 日（月）15:00 ~

場所：中百舌鳥キャンパス A14-305

概要： In this paper, we focus on the characterization of Lie algebras of fermionic, bosonic and parastatistic operators of spin particles. We provide a method to construct a Lie group structure for the quantum spin particles. We show the semi-simplicity of the Lie algebra for a quantum spin particle and extend the results to the Lie group level. Besides, we perform the Iwasawa decomposition for spin particles at both the Lie algebra and the Lie group levels. Then, we give a general decomposition for spin particles. Finally, we investigate the coupling of angular momenta of spin half particles, and give a general construction for such a study.

講師：中村 厚（北里大学 理学部）

題目：コンパクト面上の可解な渦糸について

日時：12/13（水）16:30～

場所：A13-323

概要：渦糸は空間2次元のアーベリアンヒッグス模型の定常解である。この模型の結合定数が臨界値をとるとき、エネルギー汎関数はボゴモルニー完成することができる。この場合、渦糸のエネルギーはトポロジー価（渦糸数）によって下限が抑えられ、渦糸解はボゴモルニー方程式によって支配される。底空間として定曲率2次元空間を考えれば、渦糸が解析的に記述できる場合は Manton によって5つに分類され、これらを可解な渦糸と呼ぶ。本研究では、それらのうち平面（ゼロ曲率）上で定義された Jackiw-Pi 方程式に着目し、コンパクトな平面、つまり2次元トーラス上の渦糸解について考察する。Jackiw-Pi 方程式は量子ホール効果の模型である非相対論的チャーン・サイモンズ・ヒッグス模型の基本方程式としても現れる。トーラス渦糸解は一般に楕円関数によって記述されるが、その実例を与えることにより、トーラス渦糸のもつ豊かな構造を見る。また、このようなコンパクト面上の渦糸数の解析的計算法を与える。

講師：榎戸輝明（京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻）

題目：高エネルギー大気物理学から月面物理学の開拓へ

日時：2023年12月12日（火）16:45-18:15

場所：杉本キャンパス F212 第5講義室

概要：1962年に宇宙X線源が発見されてから60年以上。多様な天体がX線を放射することが明らかになり、X線天文学は宇宙物理学の大きな一翼を担っている。集中講

義では X 線天文学を楽しむために必要な知識や観測事実を紹介する一方で、談話会では X 線天文学で培われた宇宙放射線の測定技術を活用した、宇宙線研究の新展開を紹介したい。ひとつは、雷や雷雲の電場により大気中で相対論的なエネルギーまで加速された電子からのガンマ線放射を観測する「高エネルギー大気物理学」の勃興である。雷放電では地球ガンマ線フラッシュ(Terrestrial Gamma-ray Flash)と呼ばれる大強度のガンマ線のバーストが発生し、大気と相互作用して光核反応を起こすことも明らかになってきた。さらに雲内では電子加速によるガンマ線が雷雲ガンマ線 (gamma-ray glow)として地上に降り注いでいる。私達はこれらの現象を狙い、手作りの放射線測定器を用いてシチズンサイエンスも活用し、日本海沿岸での観測網「雷雲プロジェクト」を構築している。もうひとつ紹介するのは、これらの技術を応用し月面に衝突する銀河宇宙線を用いた月の水資源探査や、月周辺での放射線測定で狙う「月面物理学」の開拓である。これらのダイジェストを紹介したい。

Speaker : Prof. Daniel R. Talham (Department of Chemistry, University of Florida, USA)

Title: How the Solid-Solvent Interface Changes Phase Stability and Host-Guest Chemistry in Layered Solids

Date & Time : December 7 (Thu), 10:00~12:00

Place : OMU-Nakamozu campus, Bld.A12 (Science Hall)

Abstract: Layered solids play prominent roles in several areas of materials science, currently of interest in diverse areas ranging from solar energy storage to battery electrode materials to tribology. As for all mesoscale and nanoscale solids, high surface-to-volume ratios can alter solid-state properties as surfaces play enhanced roles in determining structure. However, these effects can be magnified in layered solids due to highly anisotropic bonding and associated elastic properties. Our lab recently showed how solid-state phases of hybrid organic/inorganic layered solids can be switched, simply by altering the environment in colloidal suspensions. Changes in surface environment alter the surface energy (more specifically the surface stress) leading to changes of the effective internal pressure on the particles. This presentation will highlight examples of using the particle interface to vary the effective internal pressure of layered solids, leading to changes in structure, properties and reactivity. Examples will be drawn from organic-inorganic hybrid perovskites, layered metal phosphonates and layered phosphates, illustrating how control over the solid-liquid interface leads to

reversible solid state phase transitions, switchable optoelectronic properties and changing intercalation chemistry.

講師：白濱 圭也（慶應義塾大学理工学部物理学科）

題目：ナノ空間中へリウムの超流動における 4 次元 XY 量子臨界性

日時：11 月 28 日(火) 16：30～17：30

場所：杉本キャンパス理学部会議室

概要：超流動液体へリウム(4He)は強相関ボース粒子系であり、超流動転移(ラムダ転移)の臨界現象や薄膜が示す BKT 転移の研究を通じて、相転移の理解に重要な役割を果たしてきた。超流動秩序変数が複素スカラー量であるため、これらの相転移は 3 または 2 次元の XY 普遍性クラスに属する。またへリウムが不純物を含まないクリーンな系であることから、多孔体などのランダムポテンシャルを導入して、超流動転移に対する乱れやサイズの効果も詳細に調べられてきた。我々は以前、細孔サイズが 3nm 程度のナノ多孔質ガラスにへリウムを閉じ込めると、超流動転移が加圧により絶対零度まで抑制されて、局在 BEC 状態と呼ばれる非超流動相との間で量子相転移を示すことを明らかにした[1]。量子相転移とは、圧力や磁場の印加で系の量子ゆらぎが変化し、絶対零度で生じる相転移である。超流動密度と転移温度の圧力依存性から、この量子相転移は絶対零度で 4 次元 XY(3 空間次元プラス 1 虚時間次元)の普遍性クラスに属することが、理論的に提案されていた[2]。この 4 次元 XY の臨界性は有限温度にも及ぶことが示唆されたが、一般に量子相転移は古典的普遍性クラス(今の場合は 3 次元 XY)に属する有限温度相転移につながるとされている。この不一致の原因を探る鍵は有限温度相転移における臨界現象を調べることであるが、過去の実験では臨界指数を評価できていなかった。今回我々は、ナノ多孔質ガラス中へリウム 4 の超流動性をヘルムホルツ共鳴により測定し、超流動密度の臨界挙動を詳細に調べた[3]。その結果、超流動密度の臨界指数が実験を行った全圧力($0.1 < P < 2.4 \text{ MPa}$)において 1 であることが示された。この値は 4 次元 XY 普遍性に期待される臨界指数と一致する。この結果および超流動転移直下の散逸の解析から、ナノ多孔体中へリウムは有限温度においても 4 次元 XY の量子臨界性を示すユニークなボース多体系であることが明らかになった。相転移の一般論では、4 次元は最も単純な平均場理論が成り立つ臨界次元であり、ナノ多孔体への閉じ込めで乱れを強く導入したへリウム系が逆に乱れの効果が全くない平均場的臨界挙動を示すことは大変興味深い。

Speaker : Prof. Wolfgang Ketterle (MIT)

Title : Ultracold atoms: From superfluid gases to spin transport and quantum simulators

Date : 2023 年 10 月 6 日 (Fri.) 15:00

Place : 大阪公立大学 杉本キャンパス 学術情報センター10 階 研究者交流室

Abstract: The realization of Bose-Einstein condensation in dilute atomic gases has created a unique experimental platform to study materials in a new regime. The low density (a million times lower than air) of the gas allows control over the atoms and their interactions using the tools and precision of atomic physics. For atoms in a deep optical lattice, the motional degree is frozen out and control of the spin degree of freedom has emerged as a new frontier. I will report on recent results on spin transport which highlights the crucial role of the anisotropy in the paradigmatic Heisenberg Hamiltonian. Highly magnetic lanthanide atoms offer the possibility to study many-body physics with strong magnetic interactions. Using a new optical super resolution technique, we could localize dysprosium atoms with a separation much smaller than the diffraction limit of light, down to 50 nm, boosting magnetic dipole interaction by a factor of 1,000. These studies illustrate a new approach to condensed-matter physics where many-body phenomena are realized in dilute atomic gases.

Speaker : Prof. Giulia Semeghini (Harvard)

Title : Programmable atom arrays: a new frontier in quantum science and engineering

Date : 2023 年 9 月 25 日 (Mon) 15:00

Place : 大阪公立大学 杉本キャンパス 理学部会議室(E108)

Abstract: A broad effort is currently underway to develop quantum machines that can outperform their classical counterparts and take advantage of the powerful properties of quantum mechanics to reach unprecedented frontiers in computation, communication, sensing and metrology. Arrays of single neutral atoms trapped in optical tweezers have recently entered the scene as a potential practical realization of this ambitious goal. In this talk, I will introduce recent results where this platform has been used to realize an elusive state of matter, the so-called quantum spin liquid, and to develop a new architecture for quantum information processing with non-local and reconfigurable connectivity between the qubits. Combining these results with novel technical tools on atom array platforms could open a broad range of possibilities for the exploration of entangled matter, with powerful applications in quantum simulation and information.

講師：小矢野 幹夫（北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 融合科学共同専攻、先端科学技術専攻 教授）

講演題目：遷移金属ダイカルゲナイドの電子輸送現象と微小領域における熱電物性」

日時：2022年8月30日（火）15:00～16:30

会場：A12棟 サイエンスホール

概要：遷移金属ダイカルコゲナイドは基本層同士が van der Waals 結合で積み重なった特異な結晶構造を持っているため、比較的容易に原子層レベルの厚さの試料を作製することが出来る。この特長を生かし、グラフェンに替わる新しい薄層半導体材料として現在様々なデバイス化の試みが行われている。本講演では、半導体である二硫化モリブデン MoS₂ にキャリアを注入した原子層デバイスの熱電性能について紹介する。試料の合成から原子層レベルの MoS₂ を作製する方法、および微小試料の熱電物性を精度良く計測する方法を提供し、ナノスケールでは伝導キャリアの局在効果が重要な役割を持つことを示す。さらに層状物質の格子力学を明らかにするため、ラマン散乱分光法を用いたフォノンの温度を非破壊で測定する手法を提示し、微小スケールでの熱的非平衡状態の直接観測の結果を紹介する。

講師：中井直正先生（関西学院大学）

題名：宇宙の膨張率を表すハッブル定数の矛盾

アブストラクト：活動的銀河中心核の水メーザー観測から中心にある巨大質量ブラックホールの質量や周辺的气体円盤の構造を調べることが可能であるが、それに加えて条件がそろえばその銀河までの角径距離を求めることができる。この新しい手法は「距離はしご」を使わずに直接に銀河距離を精度良く決定できる非常に優れた方法である。現在までに数個の銀河で距離が得られ、それから求められたハッブル定数の値は宇宙背景放射の観測から求められている値と有意に異なる。今のところその食い違いの理由はわかっておらず、宇宙論の大きな問題となっている。この水メーザー観測による新しい距離測定の手法とハッブル定数の矛盾（英語ではハッブル緊張と呼ばれている）の現状を紹介する。

日時：7/13(木) 5限 (16:45～)

場所：中百舌鳥キャンパス A12棟 サイエンスホール

講師：小嶋 康史（広島大学）

題目： $J=kB$ の成分がある天体の磁場構造

日時：6月23日(金) 16:00~18:00 杉本キャンパス第10講義室(E211)

概要：天体スケールの構造（特に、方向性）がよりミクロの状態に起因する考えがある。磁場と電流が平行となるベルトラミ性が関係する(生じる)フォースフリー磁気圏やミクロな乱流ダイナモなどの概念を紹介した後、ベルトラミ磁場がある場合に通常の磁気流体波動がどのように変更されるかを議論する。古典電磁気学と非相対論の枠組みで、概念的理解を主眼とし、議論が盛り上がることを期待する。

講師：Dr. Eloisa Cuestas (Okinawa Institute of Science and Technology)

題目：Making statistics work: a quantum engine in the BEC-BCS crossover

日時：2023年6月13日(火) 16:00 ~ 第4講義室(F205)

概要：We present a new class of many-body quantum engine that we termed Pauli engine. Our engine exploits genuine nonclassical forms of energy different from heat, which have not been used until now for work production in cyclic engines. In the Pauli engine the energy input is not related to the temperature of an external bath, instead, our machine is fueled by the energy associated with the change of the statistical behavior of the working medium from bosonic to fermionic and back. This mechanism is of purely quantum origin and has no correlate in the classical regime. Since the change in quantum statistic does not require the coupling to a hot or cold reservoir, the main advantage of the Pauli engine is that it is free of the dissipation processes of conventional engines. We experimentally realized the Pauli cycle by driving a trapped ultracold two-component Fermi gas of Li atoms between a Bose-Einstein condensate of bosonic molecules and a unitary Fermi gas. Such experiments result in a work output of several 10^6 vibrational quanta per cycle with an efficiency of up to 25%. Our findings establish quantum statistics as a useful thermodynamic resource for work production in a new class of emergent quantum engines.

講師：Dr. Kotera Kumiko (Institut d'Astrophysique de Paris)

題目：Towards EeV Neutrino Astronomy with GRAND

日時：2023年5月1日(月) 15:00 ~ 理学部棟 E108号室

概要：We are living exciting times: we are now able to probe the most violent events of the Universe with diverse messengers (cosmic rays, neutrinos, photons and gravitational

waves). One challenge to complete the multi-messenger picture resides in the highest energies, as no ultra-high energy neutrinos have been observed yet. This challenge could be undertaken by the GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection) project, which aims at detecting ultra-high energy particles, with a colossal array of 200'000 antennas over 200'000 km², split into ~20 sub-arrays of ~10'000 km² deployed worldwide. In this talk, we will present preliminary designs and simulation results, plans for the ongoing, staged approach to construction, and the rich research program made possible by the proposed sensitivity and angular resolution.

講師：Dr. Tomio Petrosky (テキサス大学オースチン校複雑量子系研究センター)

題目：時間の向きの反転に対する対称性の破れ

日時：2023年4月14日(金) 16:30~18:00

場所：大阪公立大学杉本キャンパス 理学部E棟 第10講義室(E211)

要旨：熱力学第二法則に関する時間の向きの反転に対する対称性の破れに関しての力学的根拠について、研究の歴史を交えながら平易な言葉で説明する。この問題は「時間の矢」の問題とも言われている。ここで述べる内容は、講演者がBrusselsのSolvay研究所とテキサス大学でIlya Prigogine教授の指導のもとで明らかにしてきた内容の紹介である。我々の世界の圧倒的な出来事では、時間の向きの反転に対してその対称性が破れている。ところが物理学の基本法則と呼ばれているものは全て時間の反転に対して対称性にできている。果たして、時間の矢の存在はアインシュタインの言うように幻想であるのか。あるいは、ボルツマンの言うように、時間の対称性の破れは、人間の情報処理能力の欠如によるものであり、この世界の性質ではないのか。この講義で、そうではなくて、時間の矢の存在は物理学の基本法則と数学的に矛盾していないことを示す。我々の議論の出発点は古典および量子力学の基本法則である確率分布関数および密度行列の従うLiouville-von Neumann方程式である。そして、我々の研究成果は、熱力学的極限下では、ヒルベルト空間を拡張して得られる関数空間の中で、その時間発展生成の演算子(Liouvilian)が数学と矛盾することなく複素固有値を持つことを示す形でなされた。その結果、時間の対称性の破れは物理学の基本法則と矛盾しないことになる。さらに、Boltzmann方程式やFokker-Planck方程式などの時間の対称性を破る運動論的方程式の衝突演算子の固有値が、実は力学の基本演算子であるLiouvilianの非ヒルベルト空間内での複素固有値と一致することを示した。また、これら衝突演算子の固有値から得られる輸送係数は、Liouvilianの複素固有値の虚部から得られることも示した。その際の要点は力学の基本方程式の解の中に振動数分母

がゼロになり得る共鳴特異性が現れる状況があることが本質的である。これは、カオス力学のポアンカレの非可積分性に関する小さい分母の出現（small denominator の問題）と同根である。すなわち、少数自由度系では同じ共鳴特異性がカオスを生みだし、熱力学極限という多自由度系では時間の向きの対称性の破れを生み出すことを明らかにした。

講師：会沢 成彦（大阪公立大学）

題目：時間の向きの反転に対する対称性の破れ

日時：2023年4月12日（水）17:00～20:00

場所：大阪公立大学杉本キャンパス 1号館講堂 OMU Physics 新入生歓迎会

講師：井上 慎（大阪公立大学）

題目：ある数学少年が冷却原子の実験家になるまで

日時：2023年4月12日（水）17:00～20:00

場所：大阪公立大学杉本キャンパス 1号館講堂 OMU Physics 新入生歓迎会

山温泉ハートピア熱海

7. 池本順平：「間接検出によるモデルに依らないヒッグス・ポータルのマヨラナフェルミオン暗黒物質の制限」 日本物理学会 2024年春季大会 2024年3月21日 オンライン
8. 長野佳輔：「45表現ヒッグス粒子を含めたSU(5)大統一理論におけるゲージ結合定数の統一と陽子崩壊の解析」 基研研究会 素粒子物理学の進展2023 2023年8月30日 京都大学
9. 長野佳輔：「45表現ヒッグス粒子を含めたSU(5)大統一理論におけるゲージ結合定数の統一と陽子崩壊の解析」 Flavor Physics Workshop 2023 (FPWS2023) 2023年11月23日 熱海・伊豆山温泉ハートピア熱海
10. 長野佳輔：「2-loopレベルの45表現ヒッグス粒子を含めたSU(5)大統一理論におけるゲージ結合定数の統一と陽子崩壊の解析」 日本物理学会 2024年春季大会 2024年3月19日 オンライン
11. 和崎晃平：「熱的レプトジェネシスと右巻きニュートリノ質量の下限(レビュー)」 第69回原子核三者若手夏の学校 2023年8月19日 国立オリンピック記念青少年総合センター
12. 清水康弘：「Neutrino mass square ratio and neutrinoless double-beta decay in random neutrino mass matrices」 日本物理学会第78回年次大会 2023年9月19日 東北大学

研究助成金取得状況

1. 波場直之：科研費基盤研究（C）代表、「ニュートリノを手がかりとした標準模型を超える物理の探究」910千円

その他

1. 波場直之：「宇宙へのぼうけんと小さな世界へのぼうけん」こども本の森中之島講演会、講演、2023年10月1日
2. 波場直之：「素粒子と宇宙」大阪市立科学館（全国同時七夕講演会）講演、2023年7月29日
3. 波場直之：「物理は面白い！（その1 屈折率）」大阪公立大学オープンキャンパス模擬授業、2023年8月5日
4. 波場直之：「物理は面白い！（その2 周期表）」大阪公立大学オープンキャンパス模擬授業、2023年8月6日
5. 波場直之：素粒子論委員、素粒子メダル奨励賞審査委員

素粒子論研究室（丸）

丸信人 教授

鈴木光世(特任助教)

名子明朗(M2)

大川瞭(D4)

西村英将(M2)

赤松拳斗(D1)

小森柚歩(M1)

今井広紀(D1)

名古竜二郎(M1)

研究概要

1. Cosmological Collider Physicsの研究（丸、大川）

インフレーション宇宙において、大統一理論ヒッグス場によるインフラトン3点相関関数非ガウス性への寄与をcosmological colliderの手法で計算した。

2. 磁束のかかったオービフォルドを余剰次元とする模型構築の研究（今井、丸）

磁束のかかった T^2/Z_2 にコンパクト化された6次元理論を考え、クォーク・レプトンの波動関数による特異点周りの巻きつき数について、湯川結合が生成されるパターンを分類した。

3. 6次元理論ゲージ・ヒッグス統一理論由来の2ヒッグス模型における電弱対称性の破れの研究（赤松、廣瀬、丸、名子）

6次元高次元理論から導かれる現実的な弱混合角を预言する2ヒッグス模型において、1ループ有効ポテンシャルを計算し、電弱対称性の破れやヒッグス粒子の質量スペクトルの計算をした。

4. ゲージ・ヒッグス統一理論による世代統一の研究（丸、名古）

標準模型におけるクォーク・レプトンの3世代構造を内包する6次元ゲージ・ヒッグス統一理論の構築に成功した。ゲージ場、ヒッグス場だけでなく3世代クォーク・レプトンを統一した模型としては世界初である。

教育・研究業績

学術論文

1. N. Maru and A. Okawa: “Cosmological collider signals of non-Gaussianity from higgs boson in GUT”, Int. J. Mod. Phys. **A38** 14 2350075, (2023).
2. H. Imai and N. Maru: “Toward Realistic Models in T^2/Z_2 Flux Compactification”, PTEP2024 5 053B06 (2024).
3. K. Akamatsu, T. Hirose, N. Maru and A. Nago: “Electroweak Symmetry Breaking in Two Higgs Doublet from 6D Gauge-Higgs Unification on T^2/Z_2 ”, arXiv: 2312.08608 [hep-ph].
4. N. Maru and R. Nago: “Attempt at constructing a model of grand gauge-Higgs unification with family unification”, Phys. Rev. **D109** 11, 115005 (2024) (arXiv: 2403.02731[hep-ph])

学会・研究会講演

1. 今井広紀：「磁束のかかった T^2/Z_2 を余剰次元に持つゲージ・ヒッグス統合理論における湯川結合定数(review)」原子核三者若手夏の学校 2023年8月、東京
2. 今井広紀：「磁束のかかったオービフォルドの現実的な模型構築に向けて」南部・アインシュタインセミナー 2023年11月 滋賀, 日本物理学会2024年春季大会、オンライン
3. 今井広紀：「Toward Realistic Models in an Orbifold Flux Compactification」KEK-NAOJ Student Workshop 2023年12月 オンライン, The 2nd young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration 2024年2月 滋賀, 素核宇学生セミナー 2024年2月 オンライン, 原子核と他分野研究の交差点 2024年3月、大阪大学RCNP
4. 名子明朗：「6次元GHU理論における2HDMの構築」原子核三者若手夏の学校 2023年8月、

東京

5. 名子明朗：「6次元GHUにおける2HDMの構築に向けて」関西地域セミナー 2023年10月、大阪公立大学
6. 名子明朗：「6次元ゲージ理論における電弱対称性の破れ」南部・アインシュタインセミナー 2023年11月、滋賀
7. 名子明朗：「Electroweak Symmetry Breaking in 2HDM from 6D Gauge-Higgs Unification」KEK-NAOJ Student Workshop 2023年12月、オンライン
8. 小森柚歩：「SU(5) GUTにおけるバリオン数生成」原子核三者若手夏の学校 2023年8月、東京
9. 小森柚歩：「素粒子標準模型とゲージ・ヒッグス統一模型」南部・アインシュタインセミナー 2023年11月、滋賀
10. 小森柚歩：「Problems in the SM and Basics of Gauge-Higgs Unification」KEK-NAOJ Student Workshop 2023年12月、オンライン
11. 名古竜二郎：「大統一とゲージ・ヒッグス統一」原子核三者若手夏の学校 2023年8月、東京
12. 名古竜二郎：「5次元SU(6)ゲージ・ヒッグス大統一理論」関西地域セミナー2023年10月、大阪公立大学
13. 名古竜二郎：「格子場の理論入門」南部・アインシュタインセミナー 2023年11月、滋賀
14. 名古竜二郎：「Towards A Grand Gauge-Higgs Unification with Family Unification」KEK-NAOJ Student Workshop 2023年12月、オンライン
15. 西村英将：「強いCP問題と高次元理論」原子核三者若手夏の学校 2023年8月、東京
16. 西村英将：「Strong CP problem and higher dimensional gauge theories」南部・アインシュタインセミナー 2023年11月、滋賀, KEK-NAOJ Student Workshop 2023年12月、オンライン
17. 鈴木光世：「Mixed Majorana-Dirac gauginoに拡張されたMSSMにおけるadjoint fermionの質量行列と相互作用」第7回日本物理学会 2023年9月 東北大学

学位論文

修士論文

1. 名子明朗：「6次元ゲージヒッグス統一理論を用いたTwo Higgs Doublet Modelにおける電弱対称性の破れ」
2. 西村英将：「強いCP問題と高次元ゲージ理論」

博士論文

1. 大川瞭：「Cosmological Collider Signals of Non-Gaussianity from Higgs boson in GUT」

研究助成金取得状況

1. 赤松拳斗：科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業「南部・アインシュタインフェローシップ」 230万円

その他

1. 丸信人、鈴木光世：国際研究会「Gravitational Wave probes of Physics Beyond Standard Model 2023」オーガナイザー 大阪公立大学
2. 丸信人：大阪府高齢者大学 講義「素粒子の世界」大阪府助産婦会館 2023年10月30日、11月13日
3. 丸信人：素粒子論グループ 素粒子論委員、素粒子メダル奨励賞選考委員
4. 名古竜二郎：南部・アインシュタインセミナー、優秀発表賞 口頭発表部門 入賞 2023年11月
5. 赤松拳斗：大阪府立大手前高等学校、マスフェスタ研究支援員、2023年8月26日

原子核理論研究室

板垣 直之 教授 岡田 磨弦 (M1)
堀内 渉 准教授 山口 雄紀 (M1)

研究概要

1. 原子核構造の可視化に関する研究 (板垣、岡田、堀内)

実際の原子核がシェル模型的なのか、クラスター模型的なのかが、陽子弾性散乱の断面積を比較することで可視化可能であることを示した。これまで発展させてきた **Antisymmetrized Quasi-Cluster Model (AQCM)** を使えば、原子核の構造としてシェル模型的なもの、あるいはクラスター模型的なものいずれを仮定した場合でも、同一の枠組みで原子核密度を計算することができる。その密度を陽子弾性散乱計算のインプットとして利用すれば、シェル模型とクラスター模型の、特に原子核表面付近の密度の違いが、計算された断面積に現れることを示した。現在、軽い核のみならず、中重核領域でも α クラスター構造は存在しているのではないかと、という研究が広く進められている。そこで我々は、クラスター構造が存在した場合、その痕跡は陽子弾性散乱や α 弾性散乱に現れるのではないだろうかを期待し、 ^{48}Ti に対する分析を行った。

2. ^8He 原子核内での中性子同士に強い相関について (板垣、堀内、山口)

ヘリウム同位体であるヘリウム8 (^8He 、陽子数2、中性子数6) 原子核内において、4中性子間の相関が強まる可能性を指摘した。多数の中性子配位を混合する大規模数値計算により量子力学の方程式を解いた結果、ヘリウム8は、「2中性子の塊が2個、ヘリウム4の周りに存在する」特殊な構造を持っていることを示し、その具体的配置を示した。ヘリウム8のような陽子と中性子の数が釣り合っていない原子核は、天然には存在せず、星の中など宇宙環境における元素合成過程で大量に生成されると考えられている。本研究の結果は、今なお未知な点が多い中性子の結合形態について新たな示唆を与えるもので、私たちの身の回りにある元素の起源に対する理解を深めるものと期待される。この内容についてプレスリリースを行った。

3. 重い中性子過剰原子核における核半径増大機構についての研究 (堀内)

不安定同位体ビームを用いた中性子あるいは陽子過剰原子核の実験・観測は国内外で日々進歩しており、理論と実験の連携により、不安定核における特異な現象や構造の探索がされている。本年度は特に、重イオン衝突による原子核半径の研究を進めた。原子核の大きさの決定因子を知ることは原子核の構造及び核物性の理解を深める上で重要な研究課題である。今年度は中性子過剰Zr同位体において、中性子数増加に伴う原子核変形機構についての成果が得られた。広い質量領域を計算可能な微視的平均場模型により得られた原子核密度をインプットとし、中高エネルギー原子核-原子核衝突の全反応断面積の系統的な解析を行った。原子核変形は闖入軌道と呼ばれる大きく変形したときにエネルギーの得をする特殊な単一粒子軌道によって引き起こされると考えられている。Zr同位体ではその変形度が非常に大きくなるため、通常関与しない外側の軌道由来の闖入軌道が関与し、原子核が大きく変形する中性子数領域が拡大されることを初めて指摘した。この成果は *Physical Review C* 誌のLetterとして出版された。

教育・研究業績

学術論文

1. "Polaronic Proton and Diproton Clustering in Neutron-Rich Matter"
H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, E. Nakano, and K. Iida,
Phys. Lett. **B 851**, 138567 (2024).
2. "Intersections of ultracold atomic polarons and nuclear clusters: How is a chart of nuclides modified in dilute nuclear matter?"
H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, E. Nakano, and K. Iida,
AAPPS Bulletin **34**, 9 (2024).
3. "Global density-dependent α -nucleon interaction for α -nucleus elastic scattering"
T. Furumoto, K. Tsubakihara, S. Ebata, and W. Horiuchi,
Prog. Theor. Exp. Phys. **2024**, 013D01 (2024).
4. "Novel approach to the removal of Pauli-forbidden states in the orthogonality condition model: a case of multi- α systems"
H. Moriya, W. Horiuchi, and B. Zhou,
Eur. Phys. J A **59**, 197 (2023).
5. "Matter radius of ^{78}Kr from proton elastic scattering at 153 MeV"
J. T. Zhang, P. Ma, Y. Huang, X. L. Tu, P. Sarriguren, Z. P. Li, Y. Kuang, W. Horiuchi, T. Inakura, L. Xayavong, Y. Sun, K. Kaneko, X. Q. Liu, K. Yue, C. J. Shao, Q. Zeng, B. Mei, P. Egelhof, Yu. A. Litvinov, M. Wang, Y. H. Zhang, X. H. Zhou, and Z. Y. Sun,
Phys. Rev. C **108**, 014614 (2023).
6. "Dineutron-dineutron correlation in ^8He "
Y. Yamaguchi, W. Horiuchi, T. Ichikawa, and N. Itagaki,
Phys. Rev. C **108**, L011304 (2023).
7. (EDITOR'S CHOICE) "Electron wave functions in beta-decay formulas revisited (II): Completion including recoil-order and induced currents"
W. Horiuchi, T. Sato, Y. Uesaka, and K. Yoshida,
Prog. Theor. Exp. Phys. **2023**, 073D02 (2023).
8. "Evidence of bicluster structure in the ground state of ^{20}Ne "
Y. Yamaguchi, W. Horiuchi, and N. Itagaki,
Phys. Rev. C **108**, 014322 (2023).
9. "Systematic study of the relationship between nuclear structure and reactions for the ^{10}Be nucleus"
T. Furumoto, T. Suhara, and N. Itagaki,
Prog. Theor. Exp. Phys., **2023**, 063D02 (2023).
10. "Enlarged deformation region in neutron-rich Zr isotopes promoted by the second intruder orbit"
W. Horiuchi, T. Inakura, S. Michimasa, and M. Tanaka,
Phys. Rev. C **107**, L041304 (2023).

国際会議会議録

1. "Advances on clusters and correlations in nuclear structure and reactions"
L. Fortunato, J. Casal, W. Horiuchi, E. G. Lanza, G. Singh, J. Singh, and A. Vitturi,
Proceedings of the 28th International Nuclear Physics Conference (INPC2022),
Journal of Physics: Conference Series **2586**, 012030 (2023).
2. "Construction of density-dependent α -nucleon interaction to describe α -nucleus scattering"
T. Furumoto, K. Tsubakihara, S. Ebata, and W. Horiuchi,
Proceedings of the 16th Varenna Conference on Nuclear Reaction Mechanisms (NRM2023),
EPJ Web of Conferences **292**, 02002 (2024).

国際会議講演

1. **(Invited talk)** “Probing nuclear cluster structure with proton-nucleus elastic scattering”
W. Horiuchi,
The international Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2023 (ISPUN23), Phu Quoc Island, Vietnam, 2023.5.4-8.
2. **(Invited talk)** “Consistent Description of Shell and Cluster Configurations”
N. Itagaki,
Exploring low-energy nuclear properties: latest advances on reaction mechanisms with light nuclei, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium, 2023.6.2-3.
3. **(Invited talk)** “Nuclear structure revealed in density profiles near nuclear surface”
W. Horiuchi,
The International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX7), Catania University, Catania, Italy, 2023.6.11-16.
4. **(Invited talk)** “Nuclear structure study using proton-nucleus scattering”
W. Horiuchi,
The 5th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Beams: QFS-RB 2023, Porto Galini Seaside Resort & Spa, Lefkada, Greece, 2023.10.1-6.
5. **(Invited talk)** “Probing alpha-cluster structure by proton-nucleus scattering”
W. Horiuchi,
Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2023), Osaka University, Toyonaka, 2023.11.27-29.
6. **(Invited talk)** “Visualizing nuclear structure with proton scattering”
W. Horiuchi,
Advancing physics at next RIBF (ADRIB24), RIKEN, Wako, 2024.1.23-24.
7. “Nuclear cluster structure studied with proton scattering”
W. Horiuchi, Y. Yamaguchi, M. Okada, and N. Itagaki,
Reimei Workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction”, Tokai Culture Center, Tokai, Japan, 2024.2.28-3.1.

学会・研究会講演

1. **(招待講演)** 「全反応、弾性散乱断面積の系統解析の意義」
堀内渉, TRIP-RIBF 実験キックオフミーティング, 理化学研究所和光キャンパス, 2023.4.21.
2. **(招待講演)** 「原子核密度分布による核構造研究」
堀内渉, 九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がり」と展望, 九州大学伊都キャンパス, 2023.7.19-21.
3. 「ヘリウム8における4中性子相関」
山口雄紀, 堀内渉, 市川隆敏, 板垣直之, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催, 2024.3.18-21.
4. 「 ^{48}Ti におけるシェル-クラスター間の構造遷移」
岡田磨弦, 堀内渉, 板垣直之, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催, 2024.3.18-21.
5. 「 α 弾性散乱の大域的記述」
古本猛憲, 椿原康介, 江幡修一郎, 堀内渉, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催, 2024.3.18-21.

学位論文

修士論文

- 1.

研究助成金取得状況

1. 板垣直之（代表）：学術振興会・基盤研究(C)「クラスター構造とシェル構造の統一的な記述と元素合成反応への貢献」総額310万円
2. 堀内渉（代表）：学術振興会・基盤研究(C)「第一原理計算による3核子効果の解明とその宇宙核反応への影響」直接経費総額340万円
3. 堀内渉（分担）：学術振興会・基盤研究(B)「分子動力学による多体量子トンネル現象と天体核融合反応への新しいアプローチ」直接経費総額55万円

その他

1. 板垣直之：核理論委員会・委員
2. 堀内渉：大阪大学核物理研究センター研究計画検討専門委員会委員
3. 大阪公立大学プレスリリース(2023年7月24日)
ヘリウム8原子核内で中性子同士に強い相関があることを発見！
https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-07084.html
4. “Indication of α clustering in the density profiles of $^{44,52}\text{Ti}$ ”
W. Horiuchi and N. Itagaki,
RIKEN Accelerator Progress Report Vol. 56, 39 (2023).
5. **(Highlights of the year)** “Large amplitude collective motion in ^{44}S ”
Y. Suzuki, W. Horiuchi, and M. Kimura,
RIKEN Accelerator Progress Report Vol. 56, S20 (2023).
6. PTEP Editors’ Choice for “Electron wave functions in beta-decay formulas revisited (II): Completion including recoil-order and induced currents [Prog. Theor. Exp. Phys. **2023**, 073D02 (2023)]” (2023年8月30日)

宇宙物理研究室

中尾 憲一 教授	松野 研(数研研究員)	遠藤 洋太 (D4)
吉野 裕高 准教授	小川 達也(数研研究員)	末藤 健介 (D1)
石原 秀樹 (南部研特任教授)	加藤 亮(数研研究員)	松尾 賢汰 (M2)
森澤 理之 (数研研究員)	松野 阜(数研研究員)	大西 翔太 (M1)
	上田 航大 (数研研究員)	山崎 幹太 (M1)

研究概要

1. 静的ブラックホールの帯電: 中尾, 松尾, 吉野, 石原

ブラックホール候補天体はその周辺のプラズマが主な光源となっており, ブラックホール時空における電磁場の配位と荷電粒子の運動を理論的に深く理解することが, 観測結果の物理的な意味の理解のために必須である. 回転するブラックホールから磁場を介して回転のエネルギーを引き抜くBrandford-Znajek (BZ) 過程は活動銀河核から噴き出るプラズマのジェットやガンマ線バーストのエネルギー供給機構として有望視されているが, ブラックホールの帯電を考慮するとBZ過程が機能しなくなる可能性が指摘されている. そこで, 磁場を伴わない静的ブラックホールの帯電と磁場を伴うブラックホール周辺に分布するプラズマの運動に対するブラックホールの電荷の影響についての理論的な研究を並行して進めた.

2. 電荷を持つブラックホールと宇宙検閲官仮説: 吉田 (名大), 泉 (名大), 中尾

大域的な裸の時空特異点が存在すると, その時空で起きる物理過程を予言することができない. 宇宙検閲官仮説は, 自然な初期条件から裸の特異点が形成されることはないという予想である. Reissner-Nordstrom (RN) 解は質量 M と $U(1)$ 電荷 Q を持つ球対称静的な漸近平坦時空を記述するEinstein方程式の厳密解であるが, $Q \leq M$ を満たす場合はブラックホール時空を, $Q > M$ を満たす場合は大域的な裸の特異点を持つ時空を表す. それゆえ $Q = M$ のブラックホールに電荷が質量より大きな試験荷電粒子を降着させることができれば, 裸の特異点が形成可能であることが示唆される. $U(1)$ 電荷が1種類の場合には, それが不可能であることが証明されているが, 複数種類の $U(1)$ 電荷を持つRN解の場合は可能であることが吉田氏 (名大) らにより示された. そこで, 試験粒子ではなく自己重力を考慮した電荷を持った無限に薄い球殻をブラックホールに降着させて裸の形成が可能であるかどうかを確認し, 2種類以上の $U(1)$ 電荷の場合でも, 裸の特異点が形成されないことを示した. 現在, 論文を執筆中.

3. 電荷を持つブラックホールと熱力学第三法則: 吉田 (名大), 泉 (名大), 中尾

ブラックホールは熱力学系との類似性があると考えられており, 熱力学第一法則と第二法則に対応する法則が成り立つ (ブラックホール熱力学). 熱力学第三法則は絶対零度はエントロピーがゼロの状態であり, いかなる方法でも実現することはできないという主張だが, ブラックホール熱力学の場合, 例えば自然な初期条件からは $Q = M$ のRNブラックホールは形成されないことになる. そこで, 自己重力を考慮した電荷を持った無限に薄い球殻を収縮させて $Q = M$ のRNブラックホールの形成が可能であることを確認し, ブラックホールの第三法則は必ずしも成り立たないことを示した. 現在, 論文を執筆中.

4. 電磁場を持つ時空における歪んだ光子面の形成: 吉野

光子面は, その面上の任意の点からその面に接する任意の方向に光を飛ばしたときに, 光子がその面上を運動し続けるような面である. 典型的な例はシュバルツシルト時空における $r = 3M$ であるが, 電磁場がある場合, 球対称でない時空で歪んだ光子面が形成しうることを摂動的に示した.

5. 強重力場を特徴づける新しい概念: 天羽 (京大), 泉 (名大), 吉野, 白水 (名大), 富川 (東京電気大学)

強重力領域を持つ時空においてある点から光を発すると、光が無遠くまで逃げる方向と逃げずにトラップされる方向に分けられる。この条件をもとに強重力領域を特徴付ける概念「ダークホライズン」を提案した。

6. **ブラックホールまわりのアクシオン場の時間発展:** 大宮 (京大), 高橋 (京大), 田中 (京大), 吉野

素粒子物理学の文脈で存在が期待されているアクシオン場がブラックホールまわりであれば、その回転エネルギーを引き抜いて成長し、アクシオンの雲を形成する。この雲から放射される重力波を、スカラー場の非線形の自己相互作用の効果を考慮して計算した (2024年度に投稿、出版)。

7. **蒸発する正則ブラックホールの時空構造:** 末藤, 吉野

曲率特異点を持たない正則ブラックホールが蒸発する際の時空構造を研究している。修論のテーマである帯電ブラックホールが蒸発して消滅する際の時空構造の解析の論文を出版した。また、蒸発していく際に正則ブラックホールは温度がゼロに近づくため縮退した地平面を持つ臨界ブラックホールに近づく可能性がある。この際に考える時空構造を分類する研究を開始した。

8. **一様磁場中のブラックホール周辺の荷電スカラー場の振る舞い:** 大西, 吉野

修論に向け、一様磁場中のブラックホール周辺の荷電スカラー場がどのように振る舞うか、特に準固有振動に着目した研究を開始した。

9. **磁氣的Kerr-Newmanブラックホール周辺の荷電粒子によるペンローズ過程:** 上田, 吉野

ペンローズ過程は粒子の分裂を利用して回転ブラックホールからエネルギーを引き抜く方法であるが、この過程における磁場の効果を明らかにする目的で、磁荷を持つ回転ブラックホールまわりでの荷電粒子のペンローズ過程の研究を開始した。

10. **U(1)ゲージ・ヒッグスモデルにおけるノントポロジカルソリトン:** 小川 (東北大), 石原
複素スカラー場と結合する U(1)ゲージ・Higgs モデルと Einstein 重力の連立系で球対称定常なソリトン星の数値的な解析を行い、内部が de Sitter 時空、外部が Schwarzschild 時空となるようなソリトンの Gravastar 解が存在し、光の円軌道が存在するほどコンパクトなものが可能なことを示した。また、その質量、サイズなどの、理論モデルの結合定数依存性を解析した。

11. **3次元接触計量空間を用いた時空解の構成:** 古崎 (石川高専), 古池 (慶応大), 森澤, 石原

3次元接触計量空間は、2次元基底空間上のねじれた1次元ファイバーをもつファイバーバンドル構造をもっている。計量が退化する場合の3次元接触計量空間を定義し、それを用いてコズミックストリングとヌルダストを重力源とする非一様な4次元時空を構成した。この時空は、Kundt 類、および、Petrov D 型に分類されることを明らかにした。

12. **Kerr 時空における円盤を伴う磁気圏:** 遠藤, 高橋 (愛知教育大), 石原

時空の幾何学的対称性をストリングの世界面が共有するとき、対称性を生成する Killing ベクトル場が空間的、または時間的の場合は以前に解析を行ったが、今回はヌルの場合を系統的に研究した。ヌル Killing ベクトルをツイストによって分類し、あらゆる方向にツイストしている場合は、接触空間を特徴づける接触 1 形式、Reeb ベクトルなどの幾何学量で世界面が規定され、解は唯一であることが分かった。ツイストしていない方向がある場合は、その次元の数に対応した任意関数をもつ解が存在することを具体的に示した。

13. **圧縮性完全流体のポテンシャル流**：石原，松岡(工学部)
局所的な rot のない完全流体が大域的な渦を作るとき，有限半径の真空の渦芯を作ることが知られている．完全流体の相対論的な定式化を用いて，真空渦芯の半径に対する相対論的效果を解析し，この系をブラックホール時空中での現象に拡張することを試みた．
14. **特異コンパクト天体からの重力波探索法の開発Newton自己重力のもとでのBose-Einstein凝縮体**：浅川，坪田，石原
宇宙におけるBose-Einstein凝縮体はダークマターの候補の一つと考えられている．そこで，Gross-Pitaevskii-Poissonを数値的に解くことによって，Newton重力の源としてのBose-Einstein凝縮体の集団励起モードとして，球対称モードとシアモードを解析した．
15. **有効ループ量子重力理論における静的なブラックホールの熱力学と光の曲がり角**：松野研
ループ量子重力理論において，量子 Oppenheimer-Snyder 重力崩壊モデルが構成された．崩壊するダスト球の外側における計量は，量子補正された Schwarzschild 時空を表している．そこで，このブラックホールの温度，熱容量，エントロピー等における量子重力効果と，このブラックホールの蒸発後に残る安定な残留物を議論した．さらに，この時空における光の曲がり角の一般相対論に対する補正と，将来観測による検出可能性を議論した．
16. **押しつぶされた Kaluza-Klein ブラックホールによる光のまがり角と近点移動**：松野研
静的で電荷を持つ5次元 Kaluza-Klein ブラックホール時空における光子と質量を持つ試験粒子の運動を調べた．特に，弱い重力の極限において，Kaluza-Klein ブラックホールによる光の曲がり角と近点移動に注目し，一般相対論に対する曲がり角と近点移動角の補正を導出した．それらはブラックホールの余剰次元の大きさと電荷に関係しており，将来の宇宙物理学的観測によって検出される可能性があることがわかった．
17. **パルサーの距離の精密測定による重力波源の位置の決定精度の向上**：加藤，高橋(熊本大)
2023年6月に，パルサータイミングアレイ(Pulsar Timing Array, PTA)によってナノヘルツの振動数を持つ重力波の有力な証拠が得られたことが発表された．次世代の電波望遠鏡であるスクエア・キロメートル・アレイの建設によってPTAの感度は大幅に向上する見込みであり，重力波を用いて宇宙を探る時代が到来する．この重力波天文学において，重力波源の正確な位置を特定することが重要であるため，本研究では，PTAによる重力波源の位置決定精度について調べた．その結果，数個のパルサーの距離を正確に測定するだけで重力波源の位置決定精度が飛躍的に向上するということが明らかになった．
18. **星間物質の時間変化を推定するための手法の改善**：加藤(PTAグループとしての研究)
星間物質(プラズマ)の中では光が屈折および回折をする．PTAではパルサーから放出される光のパルスが地球に到着するまでの時間を正確に決定する必要があるため，星間物質の影響を解明することは重要である．特に，星間物質の存在量の時間的変動は重力波と類似の影響を及ぼすため，これを除去する手法の改善が求められている．光の振動数が低下するにつれて星間物質の光への影響が強くなるため，振動数が低いパルスを詳細に調べることで星間物質の時間変化を解明できる．本研究では，振動数が低いパルスを用いた星間物質の推定手法を改良し，星間物質の時間的変化を正確に推定できるようになった．
19. **佐々木-準 Killing スピノルの重力系における応用**：松野阜，上野(阪大)
スピノル場と重力場の混成系として最も単純なものはスピン1/2のスピノルを物質を持つ Einstein-Dirac 系である．Friedrich と Kim は Killing スピノルを一般化した弱 Killing (WK) スピノルを定義し，スピン多様体 (M, g) 上に WK スピノル ψ が存在するならば， (M, g, ψ) は Einstein-Dirac 系を構成することを示した．さらに佐々木多様体における WK スピノルの候補として佐々木-準 Killing (SqK) スピノルが定義され，3次元佐々木空間形における

SqK スピノルの分類が行われた。私(松野)と上野は 3 次元 Riemann/Lorentz 佐々木空間形における SqK スピノルの物理的性質を調べた。SqK スピノルの作る Dirac-current は接触磁場中の荷電粒子の運動と一致することや接触磁場と SqK スピノルと佐々木多様体により Einstein-Maxwell-Dirac 系を構成する方法など、いくつかの新しい性質を発見した。

教育・研究業績

学術論文

1. Satsuki Matsuno, Fumihiro Ueno: “Anisotropic Einstein universes with a global magnetic field and SqK-spinors,” arXiv:2402.00420[gr-qc].
2. Hiroataka Yoshino: “Distorted static photon surfaces in perturbed Reissner-Nordstrom spacetimes,” arXiv:2309.14318[gr-qc].
3. Satsuki Matsuno, Fumihiro Ueno: “On Sasakian quasi-Killing spinors in three-dimensions,” arXiv:2308.10432.
4. Masaya Amo, Keisuke Izumi, Hiroataka Yoshino, Yoshimune Tomikawa, Tetsuya Shiromizu: “A generalization of photon sphere based on escape/capture cone,” Eur. Phys. J. C **84**, 638 (2024).
5. Masaya Amo, Keisuke Izumi, Yoshimune Tomikawa, Hiroataka Yoshino, Tetsuya Shiromizu: “Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity IV: Null-access theorem for generic asymptotically flat spacetime,” Phys. Rev. D **107**, 124050 (2023).
6. Kensuke Sueto, Hiroataka Yoshino: “Evaporation of a nonsingular Reissner-Nordstrom black hole and information loss problem,” PTEP **2023**, 103E01 (2023).
7. Hiroshi Kozaki, Tatsuhiko Koike, Yoshiyuki Morisawa, Hideki Ishihara: “Nambu-Goto string with null symmetry and contact structure,” Phys. Rev. D **108**, 084069 (2023).
8. Tetsuya Ogawa, Hideki Ishihara: “Solitonic gravastars in a $U(1)$ gauge-Higgs model,” Phys. Rev. D **107**, L121501 (2023).
9. Ken-ichi Nakao, Kazaumasa Okabayashi, Tomohiro Harada, “Radiative gravastar with thermal spectrum: Sudden vacuum condensation without gravitational collapse,” Phys. Rev. D **107**, 084036 (2023).
10. Hidetoshi Omiya, Takuya Takahashi, Takahiro Tanaka, Hiroataka Yoshino., “Impact of multiple modes on the evolution of self-interacting axion condensate around rotating black holes,” JCAP **06**, 016 (2023).
11. Keisuke Izumi, Yoshimune Tomikawa, Tetsuya Shiromizu, Hiroataka Yoshino, “Attractive gravity probe surfaces in higher dimensions,” PTEP **2023**, 043E01 (2023).
12. Parth Bambhaniya, Ashok B. Joshi, Dipanjan Dey, Pankaj S. Joshi, Arindam Mazumdar, Tomohiro Harada, Ken-ichi Nakao, “Relativistic orbits of S2 star in the presence of scalar field,” Eur. Phys. J. C **84**, 124 (2024).
13. Ryo Kato, Keitaro Takahashi, “Precision of localization of single gravitational-wave source with pulsar timing array,” Phys. Rev. D **108**, 123535 (2023).
14. Jaikhomba Singha et al., “Using low-frequency scatter-broadening measurements for precision estimates of dispersion measures,” MNRAS **535**, 1184-1192 (2024).

学位論文

修士論文

松尾 賢汰：「定常軸対称なブラックホール磁気圏における荷電粒子の運動」

社会貢献

1. 西宮湯川記念事業運営委員 (中尾)
2. 素粒子奨学会委員 (中尾)
3. JST創発的研究支援事業 事前評価 外部専門家 (中尾)

数理物理研究室

森山 翔文 (教授)	西中 崇博 (准教授)	糸山 浩司 (特任教授)
大田 武志 (研究員)	関 穰慶 (研究員)	吉岡 礼治 (研究員)
古賀 勇一 (D3)	中西 智暉 (D2)	佐々木 照 (D1)
谷川 昇右 (M2)	濱近 諒 (M2)	堀江 悠貴 (M2)
山田 真衣佳 (M1)	池原 一輝 (B4)	西岡 晃佑 (B4)

研究概要

1. 超対称チャーン-サイモンズ理論と q パンルヴェ方程式 (森山)

超対称チャーン-サイモンズ理論は M 理論の M2 ブレーンを記述する理論として注目されてきた。その分配関数は無限次元の経路積分により定義されるが、局所化公式を用いて有限次元の行列積分に帰着される。最低次で規格化された大正準分配関数はスペクトラル演算子のフレドホルム行列式になる。特別な背景上において、スペクトラル演算子が例外群のワイル群の対称性を持つことから、背後に可積分構造が期待されてきた。

先行研究では、最大の超対称性を持ち、ブレーン配位で 2 種類の 5 ブレーンを持つ ABJM 理論に対して解析が行われ、大正準分配関数が双線形形式の q 変形された第 3 パンルヴェ方程式 (qP_{III}) を満たすことが発見された。それを受けて、本年度の研究で 2 種類の 5 ブレーンがそれぞれ複数ある系に解析を拡張したところ、大正準分配関数が双線形形式の q 変形された第 6 パンルヴェ方程式 (qP_{VI}) を満たすことを発見し、40 個の双線形形式の方程式を明示的に与えた。

また、方程式の有効性はもともと行列積分があらわに収束する領域だけで確認された。それに対して、アフィンワイル群の対称性を詳解することにより、先行研究の双対カスケードと整合した形で、大分配関数の定義域も方程式の有効域も相対ランクの全空間に拡張することを明らかにした。

2. 半整数ランクの Liouville irregular states の定式化 (谷川・中西・西中・濱近)

ヴィラソロ代数の表現についてはこれまで主に最高ウェイト表現が盛んに研究されてきたが、2012 年ごろからは、主に AGT 対応の研究において、最高ウェイト表現とは異なるヴィラソロ代数の表現 (イレギュラー表現) も注目され始めた。ここで AGT 対応とは、4 次元 $\mathcal{N} = 2$ 超対称性ゲージ理論と 2 次元共形場理論の物理量に対応するというもので、特に 4 次元側がアルジレス・ダグラス理論の場合には、2 次元側でヴィラソロ代数のイレギュラー表現が現れることが知られている。

しかしながらイレギュラー表現のランクが半整数の場合には、その一般的な記述法が知られておらず、対応するアルジレス・ダグラス理論の分配関数も計算できていなかった。この状況の中、我々は半整数ランクのイレギュラー表現を記述する一般的な微分方程式を発見した。またランクが低い場合については、これらの方程式を整数ランクからの極限操作により再現できることも示した。この極限操作は 4 次元側の繰り込み群の flow に対応すると考えられる。

3. 閉弦の 2 点振幅と降下方程式 (関)

ボソン閉弦理論においては、mostly BRST exact 演算子を用いてゲージ固定することにより、tree レベル 2 点振幅を導出することができた。一方、これを単純にボソン閉弦理論に応用しようとすると、ゴースト数が足りないため 2 点振幅を計算できない。そこで、我々は新たにゴースト数 3 の演算子を開発し、それと mostly BRST exact 演算子を用いて閉弦の tree レベル 2 点振幅を導出することに成功した。

ボソン閉弦理論において、このゴースト数 3 の演算子以外にも、我々は、ゲージ固定のための Faddeev-Popov の手続きを通して、様々なゴースト数を持つ頂点演算子を構成した。そして、それらの演算子が、BRST 定式化の枠組みでは、降下方程式の解として体系的に得ら

れることを示した。さらに、ディラトン頂点演算子の降下方程式から得られるゴースト数3の演算子を用いて、ディスク上の tadpole 振幅を正しく再現できることを示した。

4. 一般の Z_2 ねじれを持つ非超対称ヘテロ型弦理論の構成と宇宙定数の指数関数的抑制 (古賀)
近年の加速器実験の結果を受けて、プランク/弦スケールのような高エネルギー領域で超対称性が破れている非超対称弦理論が注目されてきた。非超対称型弦理論は、超弦理論から Z_2 ねじれを伴うコンパクト化によって構成されるが、先行研究ではコンパクト空間の中の1方向のみにねじれた境界条件が課されていた。今年度の研究ではこの構成法を拡張し、複数次元に対して Z_2 ねじれを伴ったコンパクト化を実行することで構成される一般的な非対称ヘテロ型弦理論を調べた。特に超対称性が漸近的に回復する領域において、1ループ宇宙定数の公式を導き、宇宙定数が指数関数的に抑制されるモジュライ空間上の点を発見し、それらの点がポテンシャルの鞍点に対応することを明らかにした。
5. 反対称テンソル場を含む非超対称弦理論における宇宙定数と双対性 (古賀・糸山)
上記で構成した一般化された非超対称ヘテロ型弦理論において、モジュライ場の一種である反対称場が非自明に値を持つときに宇宙定数の式が変更を受け、指数関数的に抑制される宇宙定数を与える新しいモジュライの組を発見した。また、トーラス上にコンパクト化された非超対称弦理論の有効ポテンシャルの極値は T 双対変換の固定点に対応することが知られていたが、 Z_2 ねじれを伴ったコンパクト化によって構成される非超対称弦理論のポテンシャルの極値も T 双対変換の固定点に対応することをいくつかの例で明示的に確認した。
6. Unitary 化された行列模型に関するいくつかの発展：(糸山・大田・吉岡) 高次 rank を与える ADE 行列の模型の AD 特異超曲面を Unitary 化を通じて mass parameter の空間で決定した。PII をこえる非摂動効果を漸近展開 VS 固有値の仕事関数という2つの異なるやり方で求め合致を見た。
7. DDSB 再考察：(糸山) 以前丸と提案した Dterm dynamical supersymmetry breaking に関係したボソンの質量行列、対角化の計算を遂行した。

教養論文研究業績

1. Takuya Kimura, Takahiro Nishinaka, “On the Nekrasov partition function of gauged Argyres-Douglas theories”, JHEP **01** (2023) 030, [arXiv: 2206.10937 [hep-th]].
2. Hiroshi Itoyama, Takeshi Oota, Reiji Yoshioka, “Construction of irregular conformal/W block and flavor mass relations of $\mathcal{N} = 2$ SUSY gauge theory from the A_{n-1} quiver matrix model”, Phys.Lett.B **841** (2023) 137938, [arXiv: 2210.16738 [hep-th]].
3. Tomoki Nakanishi, Takahiro Nishinaka, “ S^1 reduction of 4D $\mathcal{N} = 3$ SCFTs and squashing independence of ABJM theories”, JHEP **03** (2023) 255, [arXiv: 2211.07421 [hep-th]].
4. Hiroshi Itoyama, Takeshi Oota, Reiji Yoshioka, “A-D hypersurface of $su(n)$ $\mathcal{N} = 2$ supersymmetric gauge theory with $N_f = 2n - 2$ flavors”, Int.J.Mod.Phys.A**38** (2023) 02, 2350017, [arXiv: 2212.06590 [hep-th]].
5. Yuichi Koga, “Interpolation and exponentially suppressed cosmological constant in non-supersymmetric heterotic strings with general Z_2 twists”, Nucl.Phys.B**990** (2023) 116160, [arXiv: 2212.14572 [hep-th]].
6. Sanefumi Moriyama and Tomoki Nosaka, “40 bilinear relations of q-Painlevé VI from $\mathcal{N} = 4$ super Chern-Simons theory,” JHEP **08** (2023), 191 [arXiv:2305.03978 [hep-th]].
7. Sanefumi Moriyama and Tomoki Nosaka, “Affine symmetries for ABJM partition function and its generalization,” JHEP **05** (2024), 153 [arXiv:2312.04206 [hep-th]].
8. R. Hamachika, T. Nakanishi, T. Nishinaka and S. Tanigawa, “Liouville irregular states of half-integer ranks,” JHEP **06** (2024), 112 [arXiv:2401.14662 [hep-th]].
9. C. T. Chan, H. Itoyama and R. Yoshioka, “Large Order Behavior Near the AD Point: The Case of $\mathcal{N} = 2, su(2), N_f = 2$,” PTEP **2024** (2024) no.4, 041B01 [arXiv:2402.03670 [hep-th]].

10. I. Kishimoto, M. Kouga, S. Seki and T. Takahashi, “Closed string vertex operators with various ghost number,” Nucl. Phys. B **1004** (2024), 116549 [arXiv:2402.06179 [hep-th]].
11. I. Kishimoto, S. Seki and T. Takahashi, “Two-point closed string amplitudes in the BRST formalism,” Phys. Lett. B **853** (2024), 138657 [arXiv:2402.07464 [hep-th]].

国際会議講演

1. Sanefumi Moriyama, “M2-branes, Quantum Curves and Parallelotopes”, 14th Taiwan String Workshop, 2023/10/30-2023/11/05, National Taiwan University & National Sun Yat-sen University.
2. Shigenori Seki, “Entanglement entropy in particle scattering”, Quantum Entanglement in High Energy Physics 2023, 2023/5/10-2023/5/13, ポーランド Collegium Maius, Jagiellonian University.
3. Yuichi Koga, “Interpolation and cosmological constant in non-susy heterotic strings”, String Phenomenology 2023, 2023/7/3-2023/7/7, Institute for Basic Science, Daejeon (South Korea).
4. H. Itoyama ”D-term Dynamical Supersymmetry Breaking revisited” East Asia Joint Workshop on Strings and Fields 2023, 2023/11/13-18 North East University, Xian, China
5. H. Itoyama ”Critical Phenomena around AD Singularity” Workshop on mathematical physics in quantum field theory organized by T. Nishinaka 2024/03/27-29 Media center, Osaka Metropolitan University, Japan

学会・研究会講演

1. 森山翔文, “ABJM 行列模型の新しい展開—平行多面体とパンルヴェ方程式—”, 数理物理学セミナー, 2023/05/24, 立教大学.
2. 古賀勇一, “Interpolation and exponentially suppressed cosmological constant in non-supersymmetric heterotic strings with general Z_2 twists”, 九州大学素粒子理論研究室セミナー, 2023/06/30, 九州大学.
3. 森山翔文, “超対称ゲージ理論の魅力”, 城崎素粒子論研究会, 2023/07/01-2023/07/02, 城崎温泉.
4. Sanefumi Moriyama, “M2-branes–Parallelotopes & Painleve Equations–”, NTU string group seminar, 2023/07/04, National Taiwan University.
5. 古賀勇一, “非超対称な弦理論と宇宙定数”, 京都大学素粒子論研究室セミナー, 2023/07/12, 京都大学.
6. 森山翔文, “ABJM 行列模型の新しい展開—平行多面体とパンルヴェ方程式—”, 数理的学術交流会, 2023/09/04-2023/09/05, 大阪公立大学.
7. 古賀勇一, “Non-supersymmetric string theory and cosmological constant”, Particle Physics and Cosmology from String Compactification, 2023/09/06, 北海道大学.
8. 古賀勇一, 糸山浩司, “反対称テンソル場を含む非超対称な弦理論における宇宙定数と双対性”, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 2023/9/16-2023/9/19, 東北大学.
9. 中西智暉, 西中崇博, “ S^1 reduction of 4D $\mathcal{N} = 4$ Schur Index and 3D mass-deformed partition function”, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 2023/9/16-2023/9/19, 東北大学.
10. 西中崇博, “On Liouville irregular states and the AGT correspondence”, 研究会「場の理論と弦理論の数理的側面」, 2023/09/23-2023/09/24, 東京工業大学.
11. Yuichi Koga, “Non-supersymmetric heterotic string theory and cosmological constant”, NCTS/CTC/NTHU HEP Seminar, 2023/11/16, National Tsing Hua University (Taiwan).

12. 森山翔文, “M2 ブレーンと q パンルヴェ方程式”, 研究集会「 q 級数とその周辺」, 2024/03/12-2024/03/15, 大阪工業大学梅田キャンパス.
13. 森山翔文, “ABJM 行列模型と q パンルヴェ方程式”, 日本数学会無限可積分系セッション, 2024/03/17-2024/03/20, 大阪公立大学.
14. 中西智暉, 西中崇博, “ S^1 Reduction of 4D $\mathcal{N} = 3$ SCFTs and Squashing Independence of ABJM Theories”, 日本物理学会 2023 年度春季大会 オンライン, 2024/03/22-2024/03/25.
15. 古賀勇一, “Suppressed Cosmological Constant in Non-SUSY Heterotic Strings with General \mathbb{Z}_2 Twists”, 日本物理学会, 2024/03/22-25.
16. 岸本功, 甲賀まこ, 関穰慶, 高橋智彦, “ゴースト数 2 をもつ新たな閉弦頂点演算子について”, 日本物理学会 第 78 回年次大会 東北大学.
17. 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦, “閉弦の頂点演算子と降下方程式”, 日本物理学会 第 78 回年次大会 東北大学.
18. Robi Peschanski, 関穰慶, “非弾性散乱における粒子のエンタングルメント”, 日本物理学会 第 78 回年次大会 東北大学.
19. 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦, 山本蘭菜, “Mostly BRST Exact 演算子による開弦 2 点振幅の再考察”, 日本物理学会 2024 年春季大会 オンライン.
20. 石井美優, 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦, “Mostly BRST Exact 演算子と降下方程式による Virasoro-Shapiro 振幅の考察”, 日本物理学会 2024 年春季大会 オンライン.
21. H. Itoyama ”D-tem symnical supersymmetry breaking revisited” seminar delivered at U. Alabama, USA on 2023/04/21, seminar delivered at NTHU, 台湾清華大学 on 2023/06/19,
22. 糸山 浩司、吉岡礼治、C.T. Chan ”Large Order Behavior Near the AD Point” 日本物理学会 第 78 回年次大会 東北大学.

学位論文

修士論文

1. 谷川昇右: 「4 次元 $N=2$ 超対称性場の理論における wall crossing を用いた Schur index の計算」
2. 濱近諒: 「トフーフト・アノマリーを用いた量子色力学の研究」

博士論文

1. 古賀勇一: 「Exponential suppression of cosmological constant in non-supersymmetric heterotic string theories with general \mathbb{Z}_2 twists」

研究助成金取得状況

1. 森山翔文: 基盤研究 (C) (一般) 「量子代数曲線と対称性から探る、超共形場の理論と超弦理論」, 研究代表者.
2. 西中崇博: 若手研究 「アルジレス・ダグラス理論の双対性の研究」, 研究代表者.
3. 西中崇博: 基盤研究 (C) (一般) 「非ラグランジアン理論の分配関数を用いた超対称場の理論の新しい対応関係の研究」, 研究代表者. 研究分担者 糸山 浩 (浩司)
4. 西中崇博: 基盤研究 (S) 「新時代の頂点代数の表現論」 (代表: 荒川知幸), 研究分担者.
5. 関穰慶: 基盤研究 (C) (一般) 「弦理論における振幅の再構築とその応用-エンタングルメントと時空の理解へ」, 研究代表者.
6. 糸山浩 (浩司): 基盤研究 (C) (一般) 「ADE 型行列模型の対称性と可積分性で探る超対称ゲージ理論の臨界近傍と相構造」, 研究代表者. 研究分担者 西中崇博、吉岡礼治

数理物理 (表現論) 研究室

会沢 成彦 教授 伊藤 蓮 (M2) 木邨 太一 (M1)
田中 寿弥 (M1) 藤田 悠朔 (B4)

研究概要

本研究室では、表現論を主な道具として数理物理の様々な問題に取り組んでいる。今年は下記の3つをテーマとして研究を行った。

1. \mathbb{Z}_2^2 -graded 超対称性に関連する研究

\mathbb{Z}_2^2 -graded Lie super 代数は Lie 代数に可換群 $\mathbb{Z}_2^2 := \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ による grading 構造を入れたものであり、Lie 超代数の自然な拡張になっている。また、連続的な対称性を生成することができ、このような対称性が良く知られた物理系の中にも見出せることをこれまでの研究で明らかにしてきた。また、超対称量子力学の \mathbb{Z}_2^2 拡張も導入され、それをさらに \mathbb{Z}_2^2 に拡張できることも示したため、 \mathbb{Z}_2^2 -graded Lie algebra は近年注目を集めるようになってきている。

ここ数年、本研究室では \mathbb{Z}_2^2 -超対称な古典系を定式化し、それを量子化する方法を開発することで \mathbb{Z}_2^2 -超対称性を持つ量子系を構築する研究を行ってきた。 \mathbb{Z}_2^2 -超対称な古典系の定式化には超場形式の \mathbb{Z}_2^2 拡張が有用と思われるが、そのためにはラグランジアンを \mathbb{Z}_2^2 超空間上で積分する必要がある。 \mathbb{Z}_2^2 超多様体上の幾何学は数学者により研究されているが、未だに \mathbb{Z}_2^2 超多様体上の積分の定義が確立しておらず、超場形式を \mathbb{Z}_2^2 -超対称に適用する際の困難となっていた。

そこで、最も簡単な \mathbb{Z}_2^2 超多様体である最小 \mathbb{Z}_2^2 -超空間上の積分について詳細な解析を行った。その結果、これまでに提案されている積分の定義のすべては積分可能な関数に制限がつくことを示し、超場形式には不適切であることを明らかにした。

超場形式を可能にするために、新たな積分の定義を考案した。この定義は最小 \mathbb{Z}_2^2 -超空間 (4次元) 上の積分を \mathbb{R}^2 上の積分を用いて定めるもので、積分可能な関数に制限がつかないのが特徴である。この定義を用いることにより、最小 \mathbb{Z}_2^2 -超空間上で \mathbb{Z}_2^2 -超対称古典系を構築できることを明らかにした。さらに、得られた古典系は $\sin(h)$ -Gordon, Liouville 方程式のような古典可積分系の \mathbb{Z}_2^2 拡張となっており、 \mathbb{Z}_2^2 -超対称を持つ可積分系というこれまで知られていなかったクラスの可積分系の存在を示している。

2. Invariant differential operators (IDOs) の研究

Schroödinger, Maxwell, d'Alambert 方程式などが連続的な対称性を持つことはよく知られている。逆に、Lie 群などの連続群が与えられたとき、それを対称性の群として持つ偏微分方程式 (IDO) を導出する canonical な方法が Dobrev により開発された。この方法は Lie 代数の表現論を用いており、特に Verma 加群内の特異ベクトルの具体形を求める必要があるため、実際に IDO を導出するのは必ずしも簡単ではない。Dobrev は長年に渡り Lie 群 (有限および無限次元)、超 Lie 群、量子群などの IDO の具体形を求めるプロジェクトを実施しており、今回は Dobrev と共同で特殊なクラスの Lie 群 (split rank=1) である $Sp(n, 1)$ の場合を研究し、 $n=2$ の場合の IDO を具体的に導出した。

3. \mathbb{Z}_2^2 -graded 超代数を用いた結び目不変量の研究

結び目の Kontsevich 不変量はすべての同値でない結び目を区別できる不変量であることが期待されている。この不変量は Jacobi 図の作るベクトル空間に値をとり、不変量の値を求めるには Jacobi 図を数値に変換するプロセスが必要である。このプロセス (weight system と呼ばれる) に多くの自由度があることが、Kontsevich 不変量が協力である理由である。

Weight system は単純リー代数や Lie 超代数を用いて構成できることが知られているが、実際の計算は容易ではない。 \mathbb{Z}_2^2 -graded Lie 代数を用いて weight system を構成する可能性を研究中である。

教育・研究業績

学術論文

1. N. Aizawa, R. Ito, Z. Kuznetsova and F. Toppan,
New aspects of the $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ -graded 1D superspace: induced strings and 2D relativistic models.
[Nuclear Physics B, **991** \(2023\) 116202 \(27 pages\).](#)
2. N. Aizawa and H.-T. Sato,
Hom-Lie-Virasoro symmetries in Bloch electron systems and quantum plane in tight binding models.
[Nuclear Physics B, **995** \(2023\) 116336 \(34 pages\).](#)
Erratum; [Nuclear Physics B, **998** 116422 \(2024\).](#)
3. N. Aizawa and Ren Ito,
Integration on minimal \mathbb{Z}_2^2 -superspace and emergence of space.
[Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, **56** \(2023\) 485201.](#)
4. N. Aizawa and V. K. Dobrev
Invariant differential operators for non-compact Lie groups: the $Sp(n, 1)$ case.
[International Journal of Modern Physics A **39** \(2024\) 2450022 \(21 pages\).](#)
5. N. Aizawa, Ren Ito and Toshiya Tanaka
 $\mathcal{N} = 2$ Double graded supersymmetric quantum mechanics via dimensional reduction.
[AIMS Mathematics, **9** \(2024\) 10494-10510.](#)

国際会議会議録

1. N. Aizawa,
Irreducible representations of \mathbb{Z}_2^2 -graded supersymmetry algebra and their applications.
[SciPost Physics Proceedings, **14** \(2023\) 016 \(8 pages\).](#)

国際会議講演

1. N. Aizawa,
Towards a superfield formulation of \mathbb{Z}_2^2 -supersymmetry,
XV. International Workshop “Lie Theory and Its Applications in Physics”,
Varna, Bulgaria, 2023年6月

学会・研究会講演

1. 伊藤蓮, “Integration on minimal \mathbb{Z}_2^2 -superspace and 2D relativistic Lagrangian”,
原子核三者若手夏の学校, 国立オリンピック記念青少年総合センター (口頭発表), 2023年8月.
2. 伊藤蓮, “Integration on minimal \mathbb{Z}_2^2 -superspace and 2D relativistic Lagrangian”,
日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学 (口頭発表), 2023 年 9 月.

3. 伊藤蓮, “Integration on minimal \mathbb{Z}_2^2 -superspace and 2D relativistic Lagrangian”, 関西地域セミナー, 大阪公立大学 (口頭発表), 2023 年 10 月.
4. 伊藤蓮, “拘束系の量子化と $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ 超対称力学”, 南部・アインシュタインセミナー, 大阪公立大学 (ポスター発表), 2023 年 11 月.
5. 田中 寿弥, “超場形式による \mathbb{Z}_2^2 超対称な古典力学”, 南部・アインシュタインセミナー, 大阪公立大学 (ポスター発表), 2023 年 11 月.
6. 伊藤蓮, “ \mathbb{Z}_2^2 超対称系の数理”, 素粒子・数理科学地域研究グループ研究集会, 草津温泉 (口頭発表), 2024 年 2 月.
7. 伊藤蓮, “ \mathbb{Z}_2^2 -graded supersymmetry via superfield on minimal \mathbb{Z}_2^2 -superspace”, 原子核と他分野研究の交差点, 大阪大学 (口頭発表), 2024 年 3 月.
8. 伊藤蓮, “A Novel \mathbb{Z}_2^2 -SUSY Quantum Mechanics”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (口頭発表, オンライン), 2024 年 3 月.

学位論文

修士論文

1. 伊藤 蓮: \mathbb{Z}_2^2 超対称系の数理

研究助成金取得状況

1. 会沢成彦: 学術振興会・基盤研究 (C)(代表) 「次数付きリー代数の表現論に基づく可積分系の研究」 100 万円

高エネルギー物理学研究室

清矢 良浩 教授	本條 貴司 (D3)	梅井 一輝 (M1)	荒 友朗 (B4)
山本 和弘 准教授	金子 聡 (M2)	田中 甚吉 (M1)	谷川 秀憲 (B4)
	川村 悠馬 (M2)	山本 健裕 (M1)	山田 隆玄 (B4)
	田川 椋平 (M2)		

研究概要

1. 長基線ニュートリノ振動実験 (清矢, 山本, 本條, 山本 健, 谷川, 山田)

昨年度に引き続き、長基線ニュートリノ振動実験 T2K を継続した。今年度は J-PARC でのニュートリノビーム生成と前置検出器に大きなアップグレードを行ったのでそれらを報告する。まずニュートリノビーム生成については、メインリング (MR) の電磁石電源に大幅な増強を実施した後に運転調整を続け、さらにシンクロトロンの繰り返し周期を 2.48 秒から 1.36 秒に短縮することで、4 月に 540 kW であったビーム強度が 12 月にはその 1.4 倍となる 760 kW での安定的なビーム強度を出すことに成功した。これにより、T2K 実験が当初目標としていた 750 kW を超えることとなった。また、MR で加速された陽子をグラフィイト標的に照射して生成されるパイ中間子を収束させるホーン電磁石の電流値を 250 kA から 320 kA に増強することにも成功し、陽子数当たりのニュートリノ生成数を 10% 程度増加させることができた。加速器の増強の影響と合わせると今年度中にニュートリノビーム強度を 1.5 倍に引き上げることに成功した。前置検出器 ND280 においては図 1 に表したようにバレルの上流部分の半分を、SuperFGD、High-Angle TPC 及び TOF に置き換えた大幅な改造を行った。SuperFGD は x, y, z の 3 方向に穴の開いた 1cm^3 のプラスチックシンチレーターキューブを約 200 万個積層し、3 方向から約 5 万 6 千本の波長変換光ファイバーを通したもので、その末端箇所全てに取り付けられた MPPC を通して、ニュートリノ反応点周りの荷電粒子の飛跡を 3 次元的に高精細に観測することができる。High-Angle TPC は SuperFGD の上下に設置され、飛跡の検出位置精度は $600\sim 800\mu\text{m}$ を誇り、 dE/dx 測定精度も 10% を切る。これによりこれまでの前置検出器が苦手としていた大角度方向に放出された粒子の運動量測定を精度よく行うことができるようになった。TOF は上述の 2 つの新検出器を囲むように設置されたプラスチックシンチレーターで、 $100\sim 130\text{ ps}$ の時刻測定精度を持つ。これにより粒子の飛来方向同定や粒子識別を行うことができる。コミッションングを行い、図 2 のようなニュートリノ反応事象候補の観測に成功した。これらの検出器は来年度前半に本格稼働予定である。

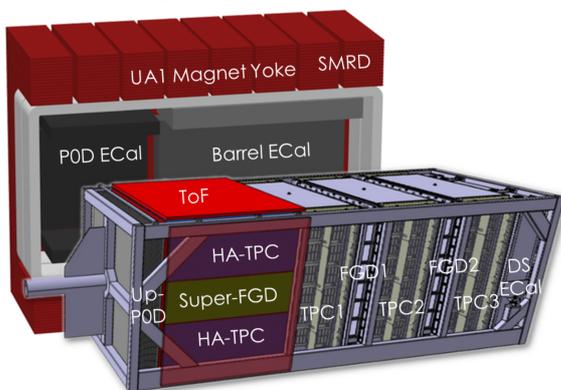


図 1: アップグレードされた前置検出器 ND280 の概観図。

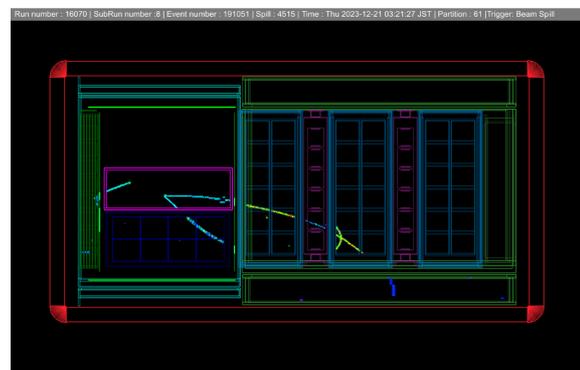


図 2: アップグレードされた ND280 で検出されたニュートリノ反応事象候補。

ニュートリノビームの統計は2023年度終了までに 4.3×10^{21} POT (ニュートリノモード: 2.7×10^{21} POT, 反ニュートリノモード: 1.6×10^{21} POT) の統計を収集することができ、これらを用いてニュートリノ振動パラメーターの精度を高めた。特に今年度は Super-Kamiokande (SK) 実験の大気ニュートリノのデータと T2K 実験の加速器ニュートリノのデータの統合解析を本格的に開始した。SK で観測される地球の裏側から届くニュートリノは、そのニュートリノ振動に物質効果の影響を大きく含んでいるため、T2K 実験と統合することで質量階層性の縮退が解かれる可能性がある、図 3 と図 4 はそれぞれニュートリノ CP 位相角 δ_{CP} 及びニュートリノ混合角 $\sin^2 \theta_{23}$ の各値に対する likelihood の統計的有意度を示している。図 3 を見ると明らかに SK と T2K を合わせた統合解析結果 (SK+T2K) の方が個々の実験よりも δ_{CP} に対して高い制限を与えており、さらに質量順階層 (Normal ordering) の方がフィットがよいことが分かる。 θ_{23} に関しては、T2K が $\sin^2 \theta_{23} > 0.5$ (Upper octant) であるのに対して SK では $\sin^2 \theta_{23} < 0.5$ (Lower octant) となっており齟齬があるが、SK+T2K ではフィットの具合が同程度になっている。

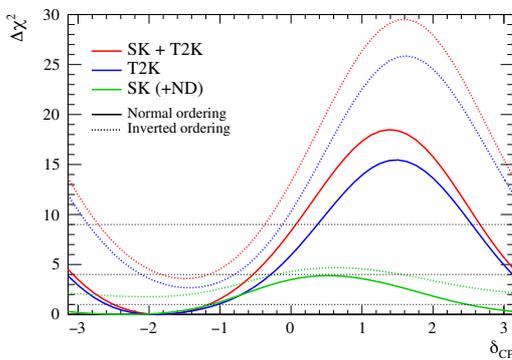


図 3: δ_{CP} に対する likelihood の統計的有意度。

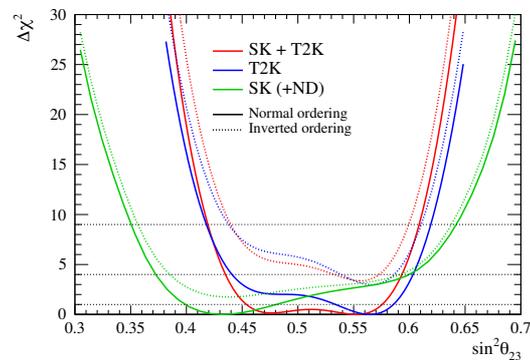


図 4: $\sin^2 \theta_{23}$ に対する likelihood の統計的有意度。

J-PARC ではハイパーカミオカンデ実験が開始される 2027 年には 1.2 MW, その翌年には 1.3 MW までビームパワーを増強する計画である。J-PARC からハイパーカミオカンデ検出器にニュートリノビームを打ち出すときには、パイ中間子崩壊時にミュー型ニュートリノと対に生成されるミューオンのビームプロファイルモニターすることで、リアルタイムにニュートリノビームの方向と強度を間接的に測定している。現行ではミューオンモニター (MUMON) にはシリコン PIN フォトダイオード (Si) と平行板ガスイオンチェンバー (IC) が使われているが、MR の陽子ビームパワーが引き上げられたときには、これらの検出器は大量の放射線の影響により使用できなくなることが予想されており、これらに替わる放射線耐性の高い検出器として電子増倍管 (EMT) を開発している。今年度は J-PARC の MUMON ピットに EMT を持ち込み、MUMON の中央部分に 7 個を水平に並べてデータを収集した。その結果、Si と遜色ないプロファイルを得ることに成功し、EMT が Si の後継機となることを示した。

2. 荷電レプトンフレーバー非保存過程探索実験 (清矢, 山本, 金子, 田川, 梅井, 田中, 荒)

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF) において、原子核に束縛された負ミューオンが電子に直接的に転換する過程、いわゆるミューオン・電子転換過程を探索する実験 DeeMe の立ち上げを引き続き遂行し、運転調整を継続した。得られたデータを解析した結果、遅延タイミングで飛跡検出器で検出されるヒットが多数存在することが分かった。今後はこれらの遅延ヒットの起源の理解とその抑制方法の検討を行っていく予定である。

教育・研究業績

学術論文

1. K. Abe, T. Honjo, T. Kobata, K. Nishizaki, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Takayasu, N. Teshima, K. Yamamoto, T. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target”, *Eur. Phys. J. C* **83**:782, 1-50 (2023).
2. K. Abe, T. Honjo, T. Kobata, K. Nishizaki, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Takayasu, N. Teshima, K. Yamamoto, T. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.6×10^{21} protons on target”, *Physical Review D* **108**, 7(072011) (2023).
3. K. Abe, T. Honjo, K. Nishizaki, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Takayasu, K. Yamamoto, T. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “Measurements of the ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ -induced coherent charged pion production cross sections on ^{12}C by the T2K experiment”, *Physical Review D* **108**, 9(092009) (2023).
4. K. Abe, T. Honjo, T. Kobata, K. Nishizaki, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Takayasu, N. Teshima, K. Yamamoto, T. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K”, *Physical Review D* **108**, 11(112009) (2023).

国際会議録

1. K. Yamamoto (on behalf of the DeeMe Collaboration) : “Muon-Electron Conversion Search Experiment”, *Physical Sciences Forum* **8**, 29 (2023).

学会・研究会講演等

1. 清矢 良浩 : 「Search for muon-electron conversion utilizing pulsed proton beam from RCS (Rapid-Cycle Synchrotron)」, 2022 年度 J-PARC/MUSE 成果報告会, 2023 年 7 月 26 日 ~ 27 日, 高エネルギー加速器研究機構 東海 1 号館.
2. 金子 聡 : 「DeeMe アクシデンタルヒットの影響」, 中間子科学研究会, 2023 年 7 月 28 日, 高エネルギー加速器研究機構 東海 1 号館.
3. 田川 椋平 : 「DeeMe 運動量校正」, 中間子科学研究会, 2023 年 7 月 28 日, 高エネルギー加速器研究機構 東海 1 号館.
4. 本條 貴司 : 「T2K 実験 WAGASCI/Baby MIND 検出器によるデータ取得状況」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023), 2023 年 9 月 16 日 ~ 19 日, 東北大学 青葉山キャンパス, 川内キャンパス.
5. 清矢 良浩 : 「ミュオン電子転換過程探索実験 - DeeMe - : 現状報告 (2)」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023), 2023 年 9 月 16 日 ~ 19 日, 東北大学 青葉山キャンパス, 川内キャンパス.
6. 金子 聡 : 「 μ - e 転換過程探索実験 DeeMe における運動量再構成に対するアクシデンタルヒットの影響について」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023), 2023 年 9 月 16 日 ~ 19 日, 東北大学 青葉山キャンパス, 川内キャンパス.
7. 田川 椋平 : 「 μ - e 転換過程探索実験 DeeMe のための運動量校正について」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023), 2023 年 9 月 16 日 ~ 19 日, 東北大学 青葉山キャンパス, 川内キャンパス.

- 川村 悠馬：「T2K ミューオンモニターのための電子増倍管に関する研究」，日本物理学会第 78 回年次大会（2023），2023 年 9 月 16 日～19 日，東北大学 青葉山キャンパス，川内キャンパス。
- 山本 健裕：「T2K 実験横方向ミューオン飛程検出器 Wall MRD におけるヒット時間情報校正装置の性能評価」，日本物理学会 2024 年春季大会，2024 年 3 月 18 日～21 日，オンライン開催。
- 山本 和弘：「ミューオン電子転換過程探索実験 -DeeMe-：現状報告（3）」，日本物理学会 2024 年春季大会，2024 年 3 月 18 日～21 日，オンライン開催。

その他

- 川村 悠馬：“MUMON status”，T2K bi-weekly meeting, 2023/06/22, online.
- 川村 悠馬：“MUMON status in T2K Run12”，T2K Collaboration meeting, 2023/07/12, Tokai villag, Ibraki-ken, Japan.
- 本條 貴司：“WAGASCI/Baby-MIND”，T2K Collaboration meeting, 2023/07/12, Tokai villag, Ibraki-ken, Japan.
- 山本 健裕：“Plan of improvements for WAGASCI/BabyMind CAMERA in B2”，WAGASCI/Baby-Mind bi-weekly meeting, 2023/09/21, online.
- 川村 悠馬：“MUMON hardware status and plan”，T2K Collaboration meeting, 2023/11/06, Tokai villag, Ibraki-ken, Japan.

学位論文等

卒業研究・卒業論文

- 荒 友朗：「 μ - e 転換過程探索実験 DeeMe における単一事象感度の電子ビームコリメーターサイズと粒子捕獲ソレノイド電流に対する依存性」
- 谷川 秀憲・山田 隆玄：「T2K 実験 Wall-MRD 検出器における MPPC 両側読み出しプラスチックシンチレータ光到達時間差測定の較正について」

修士論文

- 金子 聡：「 μ - e 転換過程探索実験 DeeMe のための検出器校正用粒子の収量計算及び即発粒子による背景事象と検出器への影響の評価」
- 川村 悠馬：「T2K 実験ニュートリノビーム運転におけるミューオンモニターの研究」
- 田川 椋平：「 μ - e 転換過程探索実験 DeeMe のための磁気スペクトロメータの運動量校正」

研究助成金取得状況

- 清矢 良浩：基盤研究（B）「高ビームレート耐性をもつ飛跡検出器で挑むミューオン・電子転換過程探索」（代表），直接経費：1,110 万円，間接経費：333 万円。
- 山本 和弘：基盤研究（C）「次世代ニュートリノ実験における大強度ミューオンの測定」（代表），直接経費：90 万円，間接経費：27 万円。

その他

- 清矢 良浩：日本物理学会代議員，2023 年 3 月 31 日～2025 年 3 月 31 日。
- 清矢 良浩：東京大学宇宙線研究所運営委員会委員，2022 年 4 月 1 日～2024 年 3 月 31 日。

宇宙・素粒子実験物理学研究室

中野 英一 教授	井上 拓海(M2)	上村 恒介 (B4)
岩崎 昌子 准教授(研究教授)	度会 龍 (M2)	久保田 友和(B4)
	大木 賢祥(M1)	吉田 聖稀 (B4)
	森政 寿音(M1)	

研究概要

1. Belle II 国際共同実験 (中野, 岩崎, 井上, 度会, 大木, 森政)

高エネルギー加速器研究機構(KEK)のSuperKEKB加速器を用いたBelle II国際共同実験に参加している。Belle II実験では、SuperKEKB加速器で大量生成されたB中間子・反B中間子対を観測することで、CP対称性の破れの検証やB中間子の稀崩壊測定を行う。大阪公立大学の研究グループは中央飛跡検出器(CDC)に関わる研究開発や、加速器制御の開発を行っている。

2. 機械学習の適応研究 (岩崎, 度会, 大木, 森政, 上村, 久保田, 吉田)

深層学習研究グループを組織し(代表 岩崎), 大阪大学 RCNP 研究プロジェクト, 大阪大学 IDS 学際プロジェクト, 東京大学素粒子物理国際研究センター共同研究として進めている。

● KEK Linac加速器運転調整(岩崎, 度会)

KEK Linac加速器運転調整のための、機械学習を用いた加速器シミュレータを開発した。多パラメータのシミュレータを構築するには、次元削減が有効であることを示した。さらに、加速器制御に重要なパラメータ探索を行った。結果を国内学会・研究会、国際学会で発表し、修士論文にまとめた。

● ILC電磁カロリメータのエネルギー較正の開発(岩崎, 森政)

機械学習を用いた、ILC SiD測定器の電磁カロリメータ(ECAL)のエネルギー較正を開発した。先行研究より性能向上させるために、ヒットデータを直接用いた機械学習を開発した。

● ATLAS実験公開MCデータを用いたトップクォーク識別の研究(岩崎, 大木)

ATLAS実験により、機械学習開発用に公開されたMCデータを用いて、トップクォーク識別研究を行った。結果を研究会で発表した。

● 素粒子実験への説明可能なAI適用研究(岩崎, 上村, 久保田, 吉田)

説明可能なAI(Explainable AI, XAI)を用いることで、入力データの重要度が推定できる。手書き文字識別、信号識別、エネルギー回帰、加速器の入射効率回帰に適用し、卒業論文にまとめた。

3. KEK AR テストビームラインのパラメータ調整(中野, 井上)

2023年度にKEKのPF-ARに新たに「測定器開発テストビームライン」が整備されたが、実際に出ているビームに関する情報が不十分であるため、テストビームラインの電子ビームプロファイルを測定した。5月の予備測定の結果を9月の物理学会で報告し、11月に、新たに製作したマルチセルタイプとJetチェンバーの二つのガスチェンバーを用いて、ビームの運動量とビームの進行方向位置の条件を変えて測定を行った。測定結果を修士論文にまとめ、さらに2月にはビームを絞る四重極磁石のパラメータ調整を行った。

教育・研究業績

学術論文

1. D. Ferlewicz et al. “Angular analysis of $B \rightarrow K^* e^+ e^-$ in the low- q^2 region with new electron identification at Belle,” *Phys. Rev. D* **110**, no.7, 072005 (2024)
2. I. Adachi et al. “Search for a $\mu^+ \mu^-$ resonance in four-muon final states at Belle II,” *Phys. Rev. D* **109**, no.11, 112015 (2024)
3. I. Adachi et al. “Measurement of CP asymmetries in $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0$ decays at Belle II,” *Phys. Rev. D* **109**, no.11, 112020 (2024)
4. I. Adachi et al. “New graph-neural-network flavor tagger for Belle II and measurement of $\sin 2\phi_1$ in $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ decays,” *Phys. Rev. D* **110**, no.1, 012001 (2024)
5. M. Nayak et al. “Search for a heavy neutral lepton that mixes predominantly with the tau neutrino,” *Phys. Rev. D* **109**, no.11, 11 (2024)
6. I. Adachi et al. “Study of $Y(10753)$ decays to $\pi^+ \pi^- Y(nS)$ final states at Belle II,” *JHEP* **07**, 116 (2024)
7. Y. Guan et al. “Measurements of the Branching Fraction, Polarization, and CP Asymmetry for the Decay $B^0 \rightarrow \omega \omega$,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, no.8, 081801 (2024)
8. T. Gu et al. “Search for Baryon-Number-Violating Processes in B- Decays to the $\Xi^0 \Lambda^0 \bar{c}$ -Final State,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, no.7, 071802 (2024)
9. I. Adachi et al. “Search for the $e^+ e^- \rightarrow \eta b(1S) \omega$ and $e^+ e^- \rightarrow \chi_{b0}(1P) \omega$ processes at $s=10.745$ GeV,” *Phys. Rev. D* **109**, no.7, 072013 (2024)
10. J. X. Cui et al. “Search for the semileptonic decays $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^0 l^+ l^-$ at Belle,” *Phys. Rev. D* **109**, no.5, 052003 (2024)
11. I. Adachi et al. “Evidence for $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ decays,” *Phys. Rev. D* **109**, no.11, 112006 (2024)
12. D. Kumar et al. “Search for the decay $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^0$ at Belle experiment,” *Phys. Rev. D* **109**, no.3, 032007 (2024)
13. I. Adachi et al. “First Measurement of $R(X\tau/l)$ as an Inclusive Test of the $b \rightarrow c \tau \nu$ Anomaly,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, no.21, 211804 (2024)
14. M. T. Prim et al. “Measurement of Angular Coefficients of $B^- \rightarrow D^* l \bar{\nu}_l$: Implications for $|V_{cb}|$ and Tests of Lepton Flavor Universality,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, no.13, 131801 (2024)
15. S. Maity et al. “Search for baryon and lepton number violating decays $D \rightarrow p l$,” *Phys. Rev. D* **109**, no.3, L031101 (2024)
16. I. Adachi et al. “Measurement of branching fractions and direct CP asymmetries for $B \rightarrow K \pi$ and $B \rightarrow \pi \pi$ decays at Belle II,” *Phys. Rev. D* **109**, no.1, 012001 (2024)
17. I. Adachi et al. “Determination of $|V_{cb}|$ using $B^0 \rightarrow D^* l^+ \bar{\nu}_l$ decays with Belle II,” *Phys. Rev. D* **108**, no.9, 9 (2023)

18. R. Dhamija et al. “Search for charged-lepton flavor violation in $Y(2S) \rightarrow l^{\mp} \tau^{\pm}$ ($l = e, \mu$) decays at Belle,” JHEP **02**, 187 (2024)
19. B. S. Gao et al. “Observation of charmed strange meson pair production in $Y(2S)$ decays and in e^+e^- annihilation at $s=10.52$ GeV,” Phys. Rev. D **108**, no.11, 112015 (2023)
20. I. Adachi et al. “Measurement of branching-fraction ratios and CP asymmetries in $B^{\pm} \rightarrow DCP \pm K^{\pm}$ decays at Belle and Belle II,” JHEP **05**, 212 (2024)
21. I. Adachi et al. “Tests of Light-Lepton Universality in Angular Asymmetries of $B^0 \rightarrow D^* l \nu$ Decays,” Phys. Rev. Lett. **131**, no.18, 181801 (2023)
22. I. Adachi et al. “Measurement of CP asymmetries in $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ decays with Belle II,” Phys. Rev. D **108**, no.7, 072012 (2023)
23. I. Adachi et al. “Search for a $\tau^+ \tau^-$ resonance in $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \tau^+ \tau^-$ events with the Belle II experiment,” Phys. Rev. Lett. **131**, no.12, 121802 (2023)
24. I. Adachi et al. “Measurement of CP asymmetries and branching-fraction ratios for $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$ and $D\pi^{\pm}$ with $D \rightarrow K_S^0 K^{\pm} \pi^{\mp}$ using Belle and Belle II data,” JHEP **09**, 146 (2023)
25. I. Adachi et al. “Search for a long-lived spin-0 mediator in $b \rightarrow s$ transitions at the Belle II experiment,” Phys. Rev. D **108**, no.11, L111104 (2023)
26. I. Adachi et al. “Precise Measurement of the D_{s^+} Lifetime at Belle II,” Phys. Rev. Lett. **131**, no.17, 171803 (2023)
27. I. Adachi et al. “Measurement of the τ -lepton mass with the Belle II experiment,” Phys. Rev. D **108**, no.3, 032006 (2023)
28. C. Y. Chang et al. “Evidence for $B^0 \rightarrow p \Sigma^0 \pi^-$ at Belle,” Phys. Rev. D **108**, no.5, 052011 (2023)
29. J. H. Yin et al. “Search for the double-charmonium state with $\eta_c J/\psi$ at Belle,” JHEP **08**, 121 (2023)
30. H. K. Moon et al. “Search for CP violation in $D(s)^+ \rightarrow K^+ K_S^0 h^+ h^-$ ($h=K, \pi$) decays and observation of the Cabibbo-suppressed decay $D_{s^+} \rightarrow K^+ K^- K_S^0 \pi^+$,” Phys. Rev. D **108**, no.11, L111102 (2023)
31. V. Zhukova et al. “Measurement of the $e^+ e^- \rightarrow B_S^0 B_S^0 X$ cross section in the energy range from 10.63 to 11.02 GeV using inclusive D_{s^+} and D^0 production,” JHEP **08**, 131 (2023)
32. I. Adachi et al. “Measurement of CP Violation in $B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0$ Decays at Belle II,” Phys. Rev. Lett. **131**, no.11, 111803 (2023)
33. I. Adachi et al. “Novel method for the identification of the production flavor of neutral charmed mesons,” Phys. Rev. D **107**, no.11, 112010 (2023)

国際会議講演

1. R. Watarai : ”Development of Accelerator Tuning System Using Machine Learning : Development of Accelerator Simulator”, International conference on MACHINE LEARNING PHYSICS (MLPhys), 2023年11月, 京都大学

学会・研究会講演

1. 岩崎昌子：「素粒子物理学実験への機械学習の適用研究」(招待講演)
JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第15回 シンポジウム 2023年7月
2. 度会 龍：「機械学習を用いた加速器運転調整システムの開発：GANを用いた加速器シミュレータの開発」 日本加速器学会 第20回日本加速器学会年会 2023年8月 日本大学
3. 井上拓海：「KEK PF-AR テストビームラインのビームプロファイルの測定」 日本物理学会 第78回年次大会 2023年9月 東北大学
4. 度会 龍：「機械学習を用いた加速器運転調整システムの開発」 加速器・ビーム物理の機械学習ワークショップ2023 2023年11月 理化学研究所
5. 大木賢祥：「機械学習を用いたトッポクォークの識別開発」 第30回 ICEPP シンポジウム 2024年2月 志賀レークホテル
6. 度会 龍, 上村恒介：「機械学習を用いた加速器シミュレータ開発および調整に寄与する重要パラメータの探索」 日本物理学会 2024年春季大会 2024年3月 オンライン(zoom)

学位論文

修士論文

1. 井上拓海：「KEK PF-AR テストビームラインのビーム特性の研究」
2. 度会 龍：「KEK Linac 加速器制御のための機械学習を用いた加速器シミュレータの開発」

共同研究・研究助成金取得状況

1. 「機械学習による素粒子物理学の革新的な発展」 日本学術振興会 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A) 学術変革領域研究(A) 2022年6月 - 2027年3月, 野尻 美保子(代表), 岩崎 昌子, 武村 紀子, 田中 純一, 長原 一
2. 「スパースセンシングを用いた素粒子実験データプロセス機構の開発」 大阪公立大学 女性研究者 研究実践力強化支援プログラム(RESPLECT) 2022年7月 - 2024年3月, 岩崎 昌子(代表), 長原 一, 末原 大幹, 山田 悟
3. 「機械学習を適用させた新しいデータ処理技術・解析システムの開発(継続)」 東京大学素粒子物理国際研究センター 共同研究, 2023年4月 - 2024年3月, 岩崎 昌子(代表), 田中 純一, 齊藤 真彦, 野辺 拓也, 森永 真央, 度会 龍, 森政 寿音
4. 「スーパーB ファクトリー研究による素粒子物理学フロンティアの開拓と若手研究者の育成」 国際共同研究加速基金・国際共同研究強化(A), 2022年12月 - 2029年3月, 飯島 徹(代表), 岩崎 昌子, 他

その他

1. 高エネルギー物理学研究者会議 将来計画検討委員会メンバー (2021年10月 - 2023年9月, 岩崎 昌子)
2. 日本物理学会, ダイバーシティ推進委員会 委員 (2022年4月 -, 岩崎 昌子)

電波天文学研究室

大西 利和 教授	小西 亜侑 (D1)	國年 悠里 (M1)
前澤 裕之 准教授	西本 晋平 (D1)	近藤 奨紀 (M1)
村岡 和幸 准教授	亀山 晃 (M2)	中川 凌 (M1)
小川 英夫 客員教授	北野 尚弥 (M2)	西川 悠馬 (M1)
澤田-佐藤 聡子 (PD)	北村 太一 (M2)	東野 康祐 (M1)
山崎 康正 (D3)	孫 赫陽 (M2)	藤巴 一航 (M1)
松本 健 (D2)	抱江 柊利 (M2)	
米津 鉄平 (D2)	野曾原 千晟 (M2)	
	山内 良斗 (M2)	

研究概要

1. ALMA望遠鏡等を用いた星形成機構の解明

ALMAによる大マゼラン雲 (LMC) と小マゼラン雲 (SMC) の観測を通じて、低元素量環境下での星形成や分子雲進化に関する理解を深めた。LMCでは、大質量原始星に関連する高密度分子フィラメント構造を詳細に観測し、フィラメントが銀河系外の異なる環境においても星形成の基盤として機能することを示した。また、超新星残骸N49の非LTE解析では、衝撃加熱を受けた分子雲の物理状態が明らかになり、銀河系外の極端な環境における分子雲進化に新たな知見を得た。M33銀河では、CO分子雲の広域分布をマッピングし、星形成領域と電離水素領域の相関を解析することで、銀河構造と星形成の関係性を浮き彫りにした。さらに、深層学習技術を用いてH₂柱密度マップを予測する手法を開発し、分子雲観測データから精度の高い密度分布が得られることを実証した。

2. 電波望遠鏡観測システムの開発

観測システムの開発では、野辺山45m望遠鏡の72–116 GHz帯に対応する新しい7ビーム受信機を開発し、誘電体レンズを採用した光学系により観測精度が大幅に向上した。これにより、複数ビームを用いた多波長観測が可能となり、大規模データ収集の効率も向上した。また、FPGAベースの広帯域分光システムの開発も進展し、リアルタイムの広帯域分光観測が実現している。これらの新技術により、銀河系内外の分子雲や星形成領域の観測効率が高まり、星形成に関する高精度のデータが取得できる基盤が整備された。

3. 月面天文台での宇宙暗黒時代の探査

究極の目標は、宇宙マイクロ波背景放射に対する中性水素21cm線のスピン温度の差、その空間的な平均温度であるグローバルシグナルを観測することである。暗黒時代21cm線グローバルシグナルは50 MHz以下であり、地上では地球の電離層の影響を受けて観測できない。また、月面の裏は地球からの人工による電波障害 (RFI) の影響が月面の表や地球の周回空間と比べ、非常に小さいことが知られている。そこで、月面の裏に着目し、月面からの電波天文観測の実現を検討している。我々のグループでは、この観測に使用されるアンテナ、低雑音増幅器の高精度な校正手法の確立や基礎実験を進めている。

4. 次期国際協働火星探査計画搭載候補のテラヘルツ分光装置の開発

現在、アメリカ航空宇宙局 (NASA)、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、カナダ宇宙庁 (CSA)、イタリア宇宙機関 (ASI) などを中心に、次期国際火星探査 Mars Ice Mapper (MIM) 計画の検討を進めている。MIMは、将来の火星有人探査に向け、合成開口レーダ (SAR) を搭載した周回機により火星表面下の水・氷分布を探査する他、火星の気象予測や大気環境・気候変化の解明を目的としている。前澤をPIとするテラヘルツ

ヘテロダイナミック分光装置 (THSS) は、MIM計画のサブペイロードの中では最優先度の搭載測器に選出されており、Measurement Definition Teamでの議論を踏まえ、本年度は直交する東西方向と南北方向のリムサウンディング観測を可能にするため、2台のアンテナを実装する設計改良を実施した。また、低消費化のため水蒸気を観測する受信機の周波数帯や、デジタルフーリエ変換分光器の組み合わせの再検討、準光学手法の周波数分離フィルターの設計を行った。

5. 「テラヘルツ波を用いた月面の広域な水エネルギー資源探査」の受信機の性能評価

国際宇宙探査(アルテミス計画)への我が国の参加を踏まえ、総務省は月での宇宙科学・探査や経済活動などの持続的な活動を支援すべく、月周回軌道から月面の地表面水資源探査サーベイを広域に渡って効率的に実施し、氷・水・土壌水分含有量を推定するためのテラヘルツ波センサーを搭載する超小型衛星の統合開発を推進している。2023年度は280GHz/490GHzの2周波に対してそれぞれ直交する偏波成分を観測する多チャンネル受信機のブレッドボードモデルを開発し、アンテナ/筐体システムに実際に実装し、月軌道での日射なども考慮した熱真空試験、ロケット打ち上げ時を想定した振動・衝撃試験を実施し、問題が無いことを確認した。またサイエンス要求であるシステム雑音温度5000Kよりも優れた感度性能を実現した。

6. プラズマ放電による有機分子ダストの形成とテラヘルツヘテロダイナミック分光

星形成領域などの比較的温かい環境の星間ガスを模擬したプラズマ放電を用いて、有機分子からなるダストの成長過程を観測的に捉える手法の開発を推進した。また、生成された有機分子について、プラズマの条件による性質・成分の違いを、液体クロマトグラフィー質量分析法により明らかにした。また、超伝導/絶縁層/超伝導電極からなる4K冷却のミクサ検出素子を用いてプラズマヘテロダイナミック分光診断/長期モニタリングを行い、プラズマの構造に放射輸送モデルを組み込んで、プラズマ条件の異なる環境下で、中性ガスの温度や密度の変化を捉える斬新なプラズマ診断手法を開発・開拓した。

7. LMT望遠鏡に搭載したB4R受信機を用いたオリオン分子雲のラインサーベイ観測

メキシコの標高4600mに建設された口径50mのLarge Millimeter Telescope電波望遠鏡には、日本の2mm帯受信機B4Rが搭載されている。このB4Rを用いて、オリオン分子雲領域について、On the Fly マッピングを施したラインサーベイの試験観測が行われた。そのデータ解析やラインの同定を推進し、オリオン分子雲の主フィラメントに垂直方向に薄く伸びたサブフィラメント内に、化学進化段階の若い分子雲や、太陽系の母体相当と推定される質量をもち、重力的に束縛されて化学進化の進んだ分子雲コアが存在することを明らかにした。

教育・研究業績（代表的な物）

学術論文

1. Sewilo, M., Tokuda, K., Kurtz, S. E., Charnley, S. B., Möller, T., Wiseman, J., Chen, C.-H. R., Indebetouw, R., Sánchez-Monge, Á., Tanaka, K. E. I., Schilke, P., Onishi, T., & Harada, N., "The Detection of Higher-order Millimeter Hydrogen Recombination Lines in the Large Magellanic Cloud", *ApJ*, 959, 22 (2023)
2. Sato, A., Tokuda, K., Machida, M. N., Tachihara, K., Harada, N., Yamasaki, H., Hirano, S., Onishi, T., & Matsushita, Y., "Secondary Outflow Driven by the Protostar Ser-emb 15 in Serpens", *ApJ*, 958, 102 (2023)
3. Shimajiri, Y., Kawanishi, Y., Fujita, S., Miyamoto, Y., Ito, A. M., Arzoumanian, D., André, P.,

- Nishimura, A., Tokuda, K., Kaneko, H., Takekawa, S., Ueda, S., Onishi, T., Inoue, T., Nishimoto, S., & Yoneda, R., "Predicting reliable H₂ column density maps from molecular line data using machine learning", *MNRAS*, 526, 966-981 (2023)
4. Sano, H., Yamane, Y., van Loon, J. T., Furuya, K., Fukui, Y., Alsaberi, R. Z. E., Bamba, A., Enokiya, R., Filipović, M. D., Indebetouw, R., Inoue, T., Kawamura, A., Lakićević, M., Law, C. J., Mizuno, N., Murase, T., Onishi, T., Park, S., Plucinsky, P. P., Rho, J., Richards, A. M. S., Rowell, G., Sasaki, M., Seok, J., Sharda, P., Staveley-Smith, L., Suzuki, H., Temim, T., Tokuda, K., Tsuge, K., & Tachihara, K., "ALMA Observations of Supernova Remnant N49 in the Large Magellanic Cloud. II. Non-LTE Analysis of Shock-heated Molecular Clouds", *ApJ*, 958, 53 (2023)
 5. Tokuda, K., Harada, N., Tanaka, K. E. I., Inoue, T., Shimonishi, T., Zhang, Y., Sewiło, M., Kunitoshi, Y., Konishi, A., Fukui, Y., Kawamura, A., Onishi, T., & Machida, M. N., "An ALMA Glimpse of Dense Molecular Filaments Associated with High-mass Protostellar Systems in the Large Magellanic Cloud", *ApJ*, 955, 52 (2023)
 6. Yasuda, A., Kuno, N., Soari, K., Muraoka, K., Miyamoto, Y., Kaneko, H., Yajima, Y., Tanaka, T., Morokuma-Matsui, K., Takeuchi, T. T., & Kobayashi, M. I. N., "CO multi-line imaging of nearby galaxies (COMING). XII. CO-to-H₂ conversion factor and dust-to-gas ratio", *PASJ*, 75, 743 (2023)
 7. Muraoka, K., Konishi, A., Tokuda, K., Kondo, H., Miura, R. E., Tosaki, T., Onodera, S., Kuno, N., Kobayashi, M. I. N., Tsuge, K., Sano, H., Kitano, N., Fujita, S., Nishimura, A., Onishi, T., Saigo, K., Yamada, R. I., Demachi, F., Tachihara, K., Fukui, Y., Kawamura, A., & AAS Journals Data Editors, "ACA CO(J = 2-1) Mapping of the Nearest Spiral Galaxy M33. I. Initial Results and Identification of Molecular Clouds", *ApJ*, 953, 164 (2023)
 8. de la Fuente, E., Toledano-Juarez, I., Kawata, K., Trinidad, M. A., Tafuya, D., Sano, H., Tokuda, K., Nishimura, A., Onishi, T., Sako, T., Hona, B., Ohnishi, M., & Takita, M., "Detection of a new molecular cloud in the LHAASO J2108+5157 region supporting a hadronic PeVatron scenario", *PASJ*, 75, 546-566 (2023)
 9. Yamasaki, Y., Hasegawa, Y., Yoneyama, S., Kawashita, S., Chinen, T., Masui, S., Nosohara, C., Sun, H., Dakie, S., Kameyama, A., Fujitomo, I., Nishikawa, Y., Ogawa, H., Tatematsu, K., Nishimura, A., Miyazawa, C., Takahashi, T., Maekawa, J., Gonzalez, A., Kojima, T., Imada, H., Kaneko, K., Sakai, R., Sakai, T., & Onishi, T., "Development of seven-beam optics using dielectric lenses for a new 72-116 GHz receiver in the Nobeyama 45 m telescope", *PASJ*, 75, 499-513 (2023)
 10. Koda, J., Hirota, A., Egusa, F., Sakamoto, K., Sawada, T., Heyer, M., Baba, J., Boissier, S., Calzetti, D., Meyer, J. D., Elmegreen, B. G., de Paz, A. G., Harada, N., Ho, L. C., Kobayashi, M. I. N., Kuno, N., Lee, A. M., Madore, B. F., Maeda, F., Martin, S., Muraoka, K., Nakanishi, K., Onodera, S., Pineda, J. L., Scoville, N., & Watanabe, Y., "Diverse Molecular Structures across the Whole Star-forming Disk of M83: High-fidelity Imaging at 40 pc Resolution", *ApJ*, 949, 108 (2023)
 11. Ohno, T., Tokuda, K., Konishi, A., Matsumoto, T., Sewiło, M., Kondo, H., Sano, H., Tsuge, K., Zahorecz, S., Goto, N., Neelamkandan, N., Wong, T., Fukushima, H., Takekoshi, T., Muraoka, K., Kawamura, A., Tachihara, K., Fukui, Y., & Onishi, T., "An Unbiased CO Survey Toward the Northern Region of the Small Magellanic Cloud with the Atacama Compact Array. II. CO Cloud Catalog", *ApJ*, 949, 63 (2023)

国際会議会議録

1. Tsuge, K., Fukui, Y., Higashino, K., Tokuda, K., Onishi, T., Sano, H., Konishi, A., Tachihara, K., Yamada, R., Muraoka, K., Wong, T., Sewiło, M., Chen, R., Madden, S., Kawamura, A., Lebouteiller, V., Meixner, M., Minamidani, T., Mizuno, N., Nayak, O., Nishimura, A., Saigo, K., & Zahorecz, S., "Massive star formation scenario in the LMC probed by the ALMA ACA Molecular Cloud Survey", *ALMA at 10 years: Past, Present, and Future (alma2023)*, Puerto Varas, Chile, 4-8 December, 2023., id.64, 64 (2023)
2. Demachi, F., Fukui, Y., Tachihara, K., Yamada, R., Tokuda, K., Fujita, S., Kobayashi, M., Muraoka,

K., Konishi, A., Tsuge, K., Onishi, T., & Kawamura, A., "Giant molecular clouds and their Type classification in M74", ALMA at 10 years: Past, Present, and Future (alma2023), Puerto Varas, Chile, 4-8 December, 2023., id.46, 46 (2023)

学位論文

修士論文

1. 亀山晃：「ブラックホールから噴出するジェット生成・加速機構解明に向けた86GHz帯低雑音受信機の開発」
2. 北野尚弥：「大マゼラン雲 Molecular ridge 領域における分子雲の統計的調査」
3. 北村太一：「巨大分子雲のフィラメント構造に付随する分子雲コアの物理・化学的性質」
4. 孫赫陽：「電波天文観測に向けた超広帯域 (6.5 - 12.5 GHz) 導波管型位相遅延器と 3D - Printer による直交偏波分離器(OMT)の開発」
5. 抱江柊利：「6-18GHz帯での天文観測に向けた超広帯域クアッドリッジアンテナの開発」
6. 野曾原千晟：「多周波同時観測用 準光学系バンドパスフィルターの開発」
7. 山内良斗：「放射輸送シミュレーションによる火星大気重力波と地球の対流圏・成層圏水蒸気の観測手法の検討」

博士論文

1. 山崎康正： “Study of system with wide frequency coverage for radio astronomical applications”

研究助成金取得状況

1. 大西利和：日本学術振興会・基盤研究(A)「超広帯域ミリ波サブミリ波分光システムの開発による大質量星形成機構の解明」1160万円（直接経費）
2. 前澤裕之：総務省宇宙開発利用加速化戦略プログラム「テラヘルツ波を用いた月面の広域な水エネルギー資源探査」1億2570万円

その他

1. プレスリリース：「M87巨大ブラックホールを取り巻く降着円盤とジェットの同時撮影に初めて成功」、2023年4月27日、https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-01897.html
2. プレスリリース：「歳差運動するM87ジェットの噴出口 - 巨大ブラックホールの「自転」を示す新たな証拠」、2023年9月28日、https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-07967.html
3. プレスリリース：「初撮影から1年後のM87ブラックホールの姿」、2024年1月18日、https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-09832.html
4. 七夕講演会・観望会、2023年7月7日、大阪公立大学（中百舌鳥キャンパス）A12棟サイエンスホール
5. 次期国際火星探査Mars Ice Mapper計画のMeasurement Definition Teamとして前澤教員がNASAの「Group Achievement Award」を受賞

宇宙線物理学研究室

常定 芳基 教授	Fraser Bradfield (D2)	古坊 龍一 (M1)
藤井 俊博 准教授	古前 壱朗 (M2)	中原 美紅 (M1)
申 興秀 特任助教	敷田 淳 (M2)	石井 達希 (B4)
櫻井 駿介 特任研究員	河内 祐輔 (M1)	遠藤 康平 (B4)
横田 晴香 秘書	小林 拓郎 (M1)	能勢 幸弘 (B4)

研究概要

1. テレスコープアレイ実験による最高エネルギー宇宙線観測

テレスコープアレイ(TA)実験は、米国ユタ州で稼働中の北半球最大の最高エネルギー宇宙線の検出感度をもつ宇宙線実験である。700平方キロメートルに到来する最高エネルギー宇宙線を地表粒子検出器アレイと大気蛍光望遠鏡の二種類の検出器で同時に検出している。2021年5月27日の現地時間早朝に、これまでのTA実験の観測運用の中でもっとも高いエネルギーをもつ244エクサ電子ボルトの宇宙線が検出された。この成果は米国サイエンス誌に発表され、「アマテラス粒子」と呼称されている。現在、最高エネルギー宇宙線の検出感度を4倍へ拡張するTAx4実験が進んでおり、今後はアマテラス粒子を超えるエネルギーをもつ宇宙線の検出が期待されている。さらに、10ペタ電子ボルトの宇宙線という低いエネルギー側の宇宙線への感度向上を目指した、検出器を高密度で配置した検出器アレイの設置が進んでいる。TALEおよびTALE-infillと呼ばれるこの低エネルギー拡張計画は、2023年10月にファーストライトを達成し、定常観測およびデータ解析を続けている。

2. IceCube-Gen2実験へ向けた装置開発

IceCube-Gen2実験は、現在南極で稼働中の高エネルギーニュートリノの検出実験であるIceCube実験の拡張計画であり、IceCube実験の現在の感度を8倍向上させる計画となっている。検出器の設置間隔が2倍に広がるため、宇宙から到来したニュートリノ検出にとってバックグラウンドとなる、大気中で作られたミュオンを除去性能の低下が見込まれている。そのため、外周部の検出器に光ファイバーの束を装着することで、光の収集効率を向上させるFiber optics module (FOM)の開発を進めている。光ファイバーを使った収集効率の実験に加えて、Geant4と呼ばれるシミュレーションを用いた評価を進めている。

3. 次世代宇宙線観測実験へむけた新型大気蛍光望遠鏡の開発

次世代の宇宙線観測へ向けた低コスト型の新型大気蛍光望遠鏡(FAST)の開発を進めている。FASTの望遠鏡は、直径20センチメートルの光電子増倍管4本を直径1.6メートルの望遠鏡に設置したデザインであり、現在TAサイトに3台、アルゼンチンのAugerサイトに1台設置し、遠隔操作による観測運用を実施している。データ解析では、望遠鏡の配置間隔の最適化や機械学習によるデータ解析を実施し、得られた測定データの解析を進めている。FAST実験では、太陽光パネルとバッテリーによる電力供給にデータ収集するため、低電力で動作する新型波形収集回路の開発も進めている。

4. すばる望遠鏡による空気シャワー粒子の可視化

高エネルギー宇宙線によって生成された空気シャワー粒子を、標高4000メートル以上のすばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)のCharge Coupled Device (CCD)で飛跡を検出できることが明らかになった。現在、これだけの広さのCCDを高海拔に敷き詰めたものは他にはなく、前例のない位置分解能で入射した空気シャワーの可視化を実現できている。そのため、HSCの付近に新たに地表粒子検出器を複数設置した地表粒子検出器アレイを構築することで、既存のHSCのCCDからの空気シャワーの詳細な構造の情報と地表粒子検出器アレイから独立に推定された空気シャワーの到来

時刻・方向・エネルギーなどの基本的な情報を同時に得る、世界で唯一無二の観測システムの構築を目指している。この地表粒子検出器アレイの製作に向け、光電子増倍管の試験や検出器の動作試験を進めている。

教育・研究業績

学術論文

1. “An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array”, Telescope Array Collaboration, *Science* 382, 903–907 (2023)
2. “Direct measurement of the cosmic-ray helium spectrum from 40 GeV to 250 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, CALET collaboration, *Physical Review Letters*, 130, 171002 (2023)
3. “Observing Cosmic-Ray Extensive Air Showers with a Silicon Imaging Detector”, S. Kawanomoto, F. Bradfield, T. Fujii et al., *Scientific Reports* 13, 16091 (2023)
4. “First High-speed Video Camera Observations Associated with a Downward Terrestrial Gamma-ray Flash”, Telescope Array Collaboration, *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL102958 (2023)
5. “Effects of the Galactic Magnetic Field on the UHECR Correlation Studies with Starburst Galaxies”, R. Higuchi, T. Fujii et al., *Astrophysical Journal* 949, 107 (2023)
6. “Revisiting ultrahigh-energy constraints on decaying superheavy dark matter”, S. Das, K. Murase and T. Fujii, *Physical Review D* 107, 103013 (2023)

国際会議会議録

1. “The past and future 20-years endeavor for discovering origins of ultra-high energy cosmic rays”, T. Fujii, Proc. of 38th International Cosmic Ray Conference, Nagoya, Japan, Accepted for publication in PoS (ICRC2023) 031 (2023)
2. “ISAI” Investigating Solar Axion by Iron-57 : the commissioning and the first run”, Y. Onuki, T. Fujii et al., Proc. of 38th International Cosmic Ray Conference, Nagoya, Japan, PoS (ICRC2023) 1389 (2023)
3. “Measurement of energy spectrum of ultra-high-energy cosmic rays with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array”, Y. Tsunesada, The 38th International Cosmic Ray Conference 2023, Nagoya, Japan, August 3, 2023
4. “Detecting ultra-high-energy cosmic rays with prototypes of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) in both hemispheres”, S. Sakurai et al. (The FAST Collaboration), Proc. of 38th International Cosmic Ray Conference, Nagoya, Japan, PoS (ICRC2023) 302 (2023)
5. “Reconstruction procedure of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)”, F. Bradfield, et al. (The FAST Collaboration), Proc. of 38th International Cosmic Ray Conference, Nagoya, Japan, PoS (ICRC2023) 303 (2023)
6. “Measurement of the cosmic ray energy spectrum in the 2nd knee region with the TALE-SD array”, I. Komae for the Telescope Array collaboration, PoS ICRC2023, 405 (2023)
7. “ISAI: Investigating Solar Axion by Iron-57”, T. Ikeda, T. Fujii et al., *SciPost Physics Proceedings*, 12, 041 (2023)
8. “Measurement of energy spectrum of ultra-high-energy cosmic rays with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array”, Y. Tsunesada, The 38th International Cosmic Ray Conference 2023, Nagoya, Japan, August 3, 2023

国際会議講演

1. T. Fujii, “Collective science of “Cosmicrays” : Cosmic rays and their diversified connecti

- on to coevolution of celestial objects and us”, Extreme mass dark matter workshop: from Superlight to Superheavy, Kyoto University, March 6, 2024
2. T. Fujii, “Inverse” multi-messenger observation with Subaru Hyper Supreme-Cam”, Annual Meeting on Multi messenger Astrophysics, 2023 December 6th, Suimeikan, Gero, Gifu
 3. T. Fujii, “Rapporteur Talk of Cosmic Ray Indirect (CRI): The past and future 20-years endeavor for discovering origins of ultra-high energy cosmic rays”, **Rapporteur talk**, The 38th International Cosmic Ray Conference 2023, Nagoya, Japan, August 3, 2023
 4. Y. Tsunesada, “Measurement of energy spectrum of ultra-high-energy cosmic rays with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array”, The 38th International Cosmic Ray Conference 2023, Nagoya, Japan, August 3, 2023
 5. S. Sakurai, “Detecting ultra-high-energy cosmic rays with prototypes of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) in both hemispheres”, Proc. of 38th International Cosmic Ray Conference, Nagoya, Japan, PoS (ICRC2023) 302 (2023)
 6. F. Bradfield, “Reconstruction procedure of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)”, Poster, PoS (ICRC2023) 303
 7. I. Komae, “Measurement of the cosmic ray energy spectrum in the 2nd knee region with the TALE-SD array”, I.Komae for the Telescope Array collaboration, PoS ICRC2023, 405 (2023)
 8. “GCOS-Japan consortium”, T. Fujii, **Invited talk**, 3rd Global Cosmic-ray Observatory (GCOS) workshop, Brussels, Belgium, June 10, 2023

学会・研究会講演

1. 古前壱朗, 「TA実験417:TALE-SD アレイによるエネルギースペクトル解析 2」, 日本物理学会 2024年春季大会, 2024年3月18日
2. 河内祐輔, 「TA実験418:TALE infill-SDの運用状況と実データ解析」, 日本物理学会2024年春季大会, 2024年3月18日
3. F. Bradfield, 「FAST実験 17:FASTミニアレイ建設に向けた進捗報告」, 日本物理学会2024年春季大会, 2024年3月18日
4. 古坊龍一, 「すばる望遠鏡に設置する地表粒子検出器アレイの開発」, 日本物理学会2024年春季大会, 2024年3月18日
5. 藤井俊博, 「『宇宙線学』の共創」, 2023年度「惑星物質科学のフロンティア」研究集会, 2024年3月11日
7. 藤井俊博, 「テレスコープアレイ実験で検出された史上最大級のエネルギーの宇宙線」, アタカマコンパクトアレイで探る星間ガス, I-siteなんば 大阪公立大学, 2023年11月29日
12. 常定芳基, “Nobel Prize Lecture”『宇宙線研究:過去、現在、未来』, 台湾中原大学, 2023年11月10日
13. 河内祐輔, 「TALE infill SDアレイ再構成プログラム開発」, 宇宙素粒子若手の会第8回秋の研究会, 東京大学宇宙線研究所, 2023年11月4日
14. 中原美紅, 「TA Hybrid 解析による Invisible energy の推定」, 宇宙素粒子若手の会第8回秋の研究会, 東京大学宇宙線研究所, 2023年11月4日
15. 櫻井駿介, 「FAST実験15: 新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の観測報告と南半球での小アレイ展開に向けた開発研究」, 第78回日本物理学会年次大会, 2023年9月16日
16. 古前壱朗, 「TA実験405:TALE-SD アレイによるエネルギースペクトル解析」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学, 2023年9月16日
17. 河内祐輔, 「TA実験410: Knee領域宇宙線を観測するTALE infill実験の再構成プログラム開発」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学, 2023年9月16日
18. 中原美紅, 「TA実験407: TA Hybrid 解析による Invisible energy の推定」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学, 2023年9月16日
19. 櫻井駿介, 「FAST実験15: 新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の観測報告と南

- 半球での小アレイ展開に向けた開発研究」, 第78回日本物理学会年次大会, 2023年9月16日
18. F. Bradfield, “Machine learning with the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, 78th Annual Meeting of The Physical Society of Japan, Sendai, Japan, September 16, 2023

学位論文

修士論文

1. 古前 竜朗, 「TALE 地表粒子検出器アレイで観測された3年間のデータによる宇宙線のエネルギースペクトル解析」
2. 難波 宏樹, 「TA 実験および TALE 実験による高エネルギー宇宙線の到来方向大角度異方性探査」(京都大学からの研究指導委託)

研究助成金取得状況

1. 常定芳基: 科学研究費補助金・基盤研究 (A) 「ニュートリノで解き明かす超高エネルギー深宇宙: アイスキューブGen2望遠鏡の始動」(代表: 千葉大学 石原安野), 分担, 20万円
2. 常定 芳基; 科学研究費補助金・学術変革(A) 「マルチメッセンジャー天文学: 多粒子宇宙観測技術の開発による新たな「眼」の獲」(代表: 名古屋大学 奥村暁), 分担, 900万円
3. 藤井俊博: 科学研究費補助金・基盤研究(A) 「新型大気蛍光望遠鏡アレイによる極高エネルギー宇宙線天文学の開拓」, 代表, 880万円
4. 藤井俊博: 科学研究費補助金・挑戦的研究(開拓) 「新型ピクセル型シリコン検出器による極低バックグラウンド環境での太陽アクシオン探査」, 代表, 30万円
5. 藤井俊博: 科学研究費補助金・挑戦的研究(萌芽) 「すばる望遠鏡を利用した宇宙線空気シャワー粒子の超精密観測」(代表: 国立天文台 小池未知太郎), 分担, 120万円
6. 藤井俊博: 科学研究費補助金・学術変革領域(A) 計画班 「マルチメッセンジャーで探る重いダークマター」(代表: 京都大学 村瀬孔大), 分担, 30万円
7. 藤井俊博: 科学研究費補助金・二国間交流事業共同研究 「新型大気蛍光望遠鏡の宇宙線自動遠隔観測への発展」, 代表, 230万円
8. 藤井俊博: 科学研究費補助金・国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(A)) 「新型大気蛍光望遠鏡を使った極高エネルギー宇宙線観測のエネルギー較正」, 代表, 200万円
9. 藤井俊博: 科学研究費補助金・国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B)) 「拡張テレスコープアレイ実験による極高エネルギー宇宙線起源の探索」(代表: 東京大学 さこ隆志), 分担, 30万円
10. 藤井俊博: 東京大学宇宙線研究所・共同利用研究 「TA実験サイトでの新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線観測」, 代表, 20万円

その他

1. 藤井俊博, 高エネルギーニュース 第42巻4号, 「天与の加速器からの「アマテラス粒子」の検出」, 2024年3月
2. 藤井俊博, サイエンス誌に載った日本人研究者2023, 「地表検出器アレイで検出した極めて高いエネルギーの宇宙線」, 2024年3月
3. 大阪公立大学プレスリリース「テレスコープアレイ実験史上最大のエネルギーをもつ宇宙線を検出」, 2023年11月24日 https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-08954.html
4. 日本物理学会第78回年次大会シンポジウムの主催「宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河」 <https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/JPSCR/2023F/sympo.html>
5. 大阪公立大学プレスリリース「宇宙から降り注ぐ大量の宇宙線「空気シャワー」の可視化に成功!」, 2023年10月12日 https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-08225.html

重力波実験物理学研究室

神田 展行 (教授)	植松正揮 (D1)	覺依珠美 (M2)
伊藤 洋介 (准教授)	高谷匡平 (M2)	富田航汰 (M2)
Marco Mayer (JSPS 海外特別研究員)	藤森匠 (M2)	松山まほろ (M2)
横田 晴香 (秘書)	岩永響生 (M1)	川本竜生 (M1)
石田海璃 (B4)	北川涼也 (B4)	泉保風沙 (B4)

研究概要

重力波は一般相対性理論の予言した時空の歪みの波動である。2015年の初観測以来、ブラックホールや中性子星の連星であるコンパクト連星からの重力波が多数観測されている。重力波は重力理論の検証に不可欠であるとともに、超高密度な天体内部の情報を持つ。重力波と電磁波やニュートリノが協調して観測する「マルチメッセンジャー天文学」は、重元素の起源、ガンマ線バーストや超新星爆発のメカニズムの解明など、高エネルギー突発天体現象の仕組みを探る新たな手段として期待されている。

1. 大型低温レーザー干渉計型重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA は岐阜県神岡鉱山内に建設された基線長 3km のレーザー干渉計型重力波検出器であり、東大宇宙線研究所をホストとした大型共同研究である。本研究室は KAGRA において、データ取得・転送系、データ解析（重力波イベントの探索、検出器診断）、キャリブレーションなどを担い、計画の中核となる機関として研究活動を行なっている。

2. 国際重力波観測網

天体起源の重力波観測では、複数台の、かつ設置場所が離れた検出器を必要とする。その理由は、多地点での観測の時間差（位相差）、振幅比、偏極特性から、重力波源の方向を推定し、また雑音相関のない独立した検出器によって偽イベントの誤認を抑制するためである。方向特定のためには重力波の波長に比して十分に離れた検出器が必要であり、必然的に国際的な観測網が望まれる。KAGRA は米国 LIGO、欧州 Virgo と協定を結んでいる。本研究室での研究活動のいくつかも国際観測網への貢献となっており、特に観測データの共有やコンピューティング、ソフトウェア関連、連続重力波探索などでは KAGRA からの座長として責任を担っている。国際重力波観測網の第 4 次観測運転を 2023 年 5 月 24 日に開始し、本研究室もリアルタイムでのオンライン観測シフトに参加するなど貢献している。

3. 重力波観測データ解析手法の開発

本研究室では、機械学習、新しい信号解析・抽出手法などを研究・開発している。重力波信号は極めて微弱なため、雑音との弁別方法の研究は重要である。ARMA/ARIMA や独立成分分析、ウィナーフィルターなどを用いた雑音除去手法のパフォーマンスについて研究をおこなっている。また、教師なし深層学習を用いた信号分類について論文を出版した。そのほか、計算量の縮減のために深層学習を用いた重力波信号検出、波源パラメータ推定やその誤差の推定について研究をおこない、学会等で発表している。

4. 機械学習によるパラメータ推定と雑音除去

高谷は機械学習による雑音除去手法である DeepClean の特性評価をおこなった。富田、松山は一般的な CNN モデルを用いて重力波信号検出とパラメータ推定に対して機械学習が有用であることを示した。たとえば富田は、SCINet モデルの予測性能に関する検証を行い、LIGO L1、H1、Virgo の観測データを用いて検出器雑音の予測を行った。その結果、検出器の懸架ワイヤーの固有振動による violin mode 雑音については、不安定な部分はあるものの数十パーセント程度低減することができた。

教育・研究業績

学術論文

1. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, “Search for Gravitational Waves Associated with Fast Radio Bursts Detected by CHIME/FRB during the LIGO-Virgo Observing Run O3a”, *Astrophysical Journal*, 955, 2, DOI:, 10.3847/1538-4357/acd770, (2023/10/1)
2. Akutsu, T., et al., the KAGRA collaboration, “Overview of KAGRA: Data transfer and management”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2023, 10, DOI:, 10.1093/ptep/ptad112, (2023/10/1)
3. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, “GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the Second Part of the Third Observing Run”, *Physical Review X*, 13, 4, DOI:, 10.1103/PhysRevX.13.041039, (Oct-23)
4. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, “Open Data from the Third Observing Run of LIGO, Virgo, KAGRA, and GEO”, *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 267, 2, DOI:, 10.3847/1538-4365/acdc9f, (2023/8/1)
5. Y. Inoue, B. H. Hsieh, K. H. Chen, Y. K. Chu, K. Ito, C. Kozakai, T. Shishido, Y. Tomigami, T. Akutsu, S. Haino, K. Izumi, T. Kajita, N. Kanda, C. S. Lin, F. K. Lin, Y. Moriwaki, W. Ogaki, H. F. Pang, T. Sawada, T. Tomaru, T. Suzuki, S. Tsuchida, T. Ushiba, T. Washimi, T. Yamamoto, T. Yokozawa], “Development of advanced photon calibrator for Kamioka gravitational wave detector (KAGRA)”, *Review of Scientific Instruments*, 94, 7, DOI:, 10.1063/5.0147888, (2023/7/1)
6. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, “Constraints on the Cosmic Expansion History from GWTC-3”, *Astrophysical Journal*, 949, 2, DOI:, 10.3847/1538-4357/ac74bb, (2023/6/1)
7. Akutsu, T., et al., the KAGRA collaboration, “Noise subtraction from KAGRA O3GK data using Independent Component Analysis”, *Classical and Quantum Gravity*, 40, 8, DOI:, 10.1088/1361-6382/acc0cb, (2023/4/20)
8. The LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration, “Population of Merging Compact Binaries Inferred Using Gravitational Waves through GWTC-3”, *Phys. Rev. X* 13, 011048, Published 29 March 2023, DOI:10.1103/PhysRevX.13.011048

学会・研究会講演

1. Nobuyuki Kanda, on behalf of the KAGRA collaboration, “Development of KAGRA data transfer, storage, distribution system” The 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023), Nagoya, 2023/7/27
2. 神田展行, 土田怜, 中野寛之, 「短時間ラプラス変換を応用したブラックホール準固有振動解析」、日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月
3. 藤森匠, 森崎宗一郎, 糸潤哉, 神田展行, 伊藤洋介, 「レーザー干渉計型重力波観測器を用いた暗黒物質検出における太陽系と暗黒物質間の相対運動の補正」、日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月
4. T. Fujimori, S. Morisaki, J. Kume, “Dependence of the correlation function of dark photon/dark matter on the velocity of the solar system relative to dark matter field”, LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting, 2023/9/11-15 (ポスター発表)

5. 藤森匠, 「重力波検出器を用いた暗黒物質検出のための太陽の銀河に対する相対速度を加味したパイプライン作成」、南部・アインシュタインセミナー, 2023年11月 (ポスター発表)
6. 植松正揮, 神田展行「重力波観測で探る連星ブラックホールの起源」, 南部・アインシュタインセミナー, 2023/11/21-23, (ポスター発表)
7. Masaki Uematsu and Nobuyuki Kanda, “Searching origin of binary black hole with gravitational wave observation”, LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting, Toyama, 2023/9/11-15, (ポスター発表)
8. Masaki Uematsu and Nobuyuki Kanda ”Searching origin of binary black hole with gravitational wave observation” Gravitational Wave Probes of Beyond Standard Model, Osaka Metropolitan University, 2023/11/6-9 (ポスター発表)
9. 岩永響生, 神田展行, 伊藤洋介, 「重力波データ解析のための Vision Transformer を用いた画像認識モデルの評価」、日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月
10. 岩永響生, 「重力波データ解析のための機械学習を用いた画像認識モデルの評価」、南部・アインシュタインセミナー, 2023 年 11 月
11. 覺依珠美, 「背景重力波の円偏極モードの観測を目指した重力波ラジオメトリ解析の開発」, 2023 年度第 53 回天文・天体物理若手夏の学校, 2023 年 8 月 (ポスター発表)
12. Izumi Kaku, Yosuke Itoh, Nobuyuki Kanda, “Simulation analysis on gravitational wave radiometry introducing Stokes parameters”, LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting, 2023/9/11-15(ポスター発表)
13. 覺依珠美, 神田展行, 伊藤洋介, 「ストークスパラメータを導入した重力波ラジオメトリにおけるシミュレーション解析」, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月
14. Izumi Kaku, Yosuke Itoh, Nobuyuki Kanda, “Stochastic gravitational wave observation using circular polarized radiometry with global laser-interferometer network”, Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model, 2023/11/6-9(ポスター発表)
15. 覺依珠美, 「背景重力波円偏極モード検出を目指した重力波ラジオメトリ解析の開発」, 生まれ！理系女子第 15 回女子生徒による科学研究発表交流会全国大会, 2023 年 11 月 (ポスター発表)
16. 覺依珠美, 「背景重力波円偏極モード検出を目指した重力波ラジオメトリ解析の開発」, 南部・アインシュタインセミナー, 2023 年 11 月
17. Izumi Kaku, Yosuke Itoh, Nobuyuki Kanda, “Simulation analysis on gravitational wave radiometry introducing Stokes parameters”, The 32th KAGRA Face-to-Face meeting, 2023/12/14-15(ポスター発表)
18. 覺依珠美, 神田展行, 伊藤洋介, 「ストークスパラメータを導入した重力波ラジオメトリにおけるシミュレーション解析 (2)」, 日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月
19. 川本竜生, 「重力波望遠鏡 KAGRA の時刻同期系の評価」, 南部・アインシュタインセミナー, 2023 年 11 月 (ポスター発表)

学位論文

修士論文

1. 覺 依珠美：重力波円偏極モード観測のためのストークスパラメータを導入したラジオメトリ解析の開発 (Development of radiometry method introducing Stokes parameters for observation of circular polarized gravitational wave)
2. 高谷匡平：補助信号を用いた重力波検出器のノイズ除去における機械学習モデルの性能比較 (Comparison of machine learning model performance in noise reduction for the gravitational wave detector with auxiliary signals)

3. 富田航汰：機械学習による重力波早期検出に向けて (Machine learning toward early gravitational wave signal detection)
4. 藤森匠：単独の重力波検出器を用いた超軽量暗黒物質探索のための信号解析コード開発に向けて (Toward development signal analysis code for search of ultralight dark matter with single gravitational wave detector)
5. 松山 まほろ：機械学習を用いた重力波データの解析：連星潮汐変形率の推定 (Analysis of Gravitational-Wave data using machine learning: Estimation of binary tidal deformability)

研究助成金取得状況

1. 科学研究費 基盤 (C) 「短時間ラプラス変換を応用したブラックホール準固有振動解析」 神田 (代表)、期間：2023 – 2025
2. 日本学術振興会 特別研究員奨励費 「リアルタイム検出のための非パラメトリック重力波再構成アルゴリズムの研究 MEYER MARCO (受入：神田)、2022-2024
3. 科学研究費 基盤 (S) 「重力波宇宙物理学の包括的研究」 伊藤 (分担)、2020-2024
4. 科学研究費 基盤 (A) 「多波長重力波宇宙物理学の展開」 伊藤 (分担)、期間：2020
5. 科学研究費 基盤 (B) 「重力波データ抽出方法の開発：新たな解析手法および分散型コンピューティングの導入」 伊藤 (分担)、期間：2019-2023

その他

1. 神田展行：宇宙線研究者会議 (COSMIC RAY RESEARCHERS CONGRESS) 2023 年度運営委員
2. 神田展行：The 38th International Cosmic Ray Conference 組織委員
3. 伊藤洋介：Progress of Theoretical and Experimental Physics 企画編集委員 (2019 より継続)
4. 伊藤洋介：Japan Gravitational Wave Consortium 運営委員長
5. 伊藤洋介：Scientific Organizing Committee for the Japan General Relativity and Gravitation workshop

素励起物理学研究室

坪田 誠 教授
竹内 宏光 准教授
湯井 悟志 特任助教

佐野融人(D3)
中川 朋(D3)
浅川研太(D2)
楊 維燦(D1)
土岐孝生(M1)
藪内雄大(M1)
貫上晃宏(B4)

研究概要

1. 量子渦上のケルビン波螺旋構造の観測とカイラリティの同定 (坪田、中川)

ケルビン波は、1880年に Kelvin が提案した、渦上に励起される螺旋状の波である(図1)。古典流体力学などの分野でこれまで膨大な研究が行われてきた。極低温の超流動ヘリウムや原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)でも量子渦の基礎的励起として、また量子乱流の重要な要素として研究されてきた。しかし、これまで、その螺旋構造が観測されたことは無かった。我々は、大阪大学基礎工学部のグループと協力して、レーザーアブレーションによって

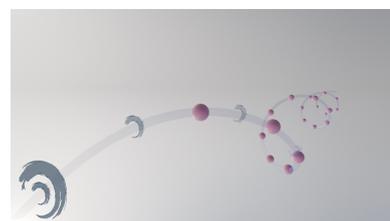


図1:量子渦上のケルビン波の螺旋構造

生じる荷電粒子を量子渦に捕獲させ、振動電場により意図的にケルビン波を励起し、光学手法によりその螺旋構造を直接観測することに成功した。さらにそのケルビン波の螺旋の向きと伝播方向から、一本の量子渦のカイラリティを同定することができた。

2. 自己重力BECにおける集団励起/2本の量子渦の回転運動と集団励起の結合(坪田、浅川)

自己重力BECは、暗黒物質の候補として宇宙物理の観点から興味があるばかりでなく、捕獲ポテンシャルを持たないため、通常のポテンシャルに捕獲された原子気体BECと異なる物理を呈する点で興味深い。我々は自己重力BECを対象としたGross-Pitaevskii-Poisson方程式の理論および数値解析を行い、以下を明らかにした。(i) ブリージングモードと異方的集団モードを調べた。ブリージングモードでは、質量増加に伴い周期が短縮することが確認され、変分法に基づく解析結果とも一致した。四重極モードとブリージングモードが交差する異方的モードを調べ、四重極モードの周期も質量依存性を示した。これらの周期特性は、外部ポテンシャルに拘束された通常のBECとは異なるが、周期比は等方的な調和ポテンシャルで拘束された場合と一致する。(ii) 二本の量子渦の回転運動を調べた。自己重力相互作用により、外部ポテンシャルなしでBECが自己拘

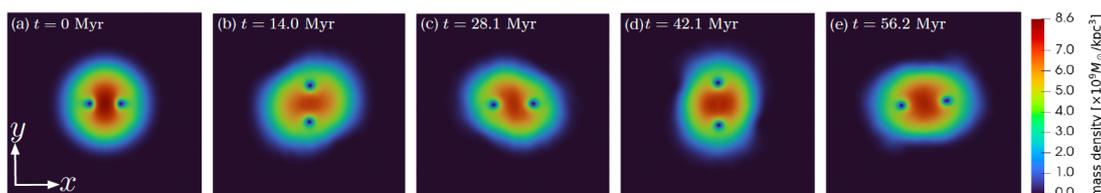


図2:自己重力BECにおける2本の量子渦の運動と四重極振動の結合

束され、重力ポテンシャルの密度依存性が渦に特異な挙動を引き起こす。二本の渦の回転はBECの集団モードと結びつき、外部ポテンシャルで拘束されたBECとは異なる振る舞いを示す(図2)。渦の回転周期は中心からの距離に比例し、密度変動により四重極モードとの共鳴が生じ、効果的な散逸機構を生み出すことを確認した。

3. 超流動フェルミ気体における二重量子渦の分裂不安定性 (竹内)

超流動フェルミ気体のBEC-BCSクロスオーバーにおける二重渦(循環量子 κ の2倍の循環をもつ量子渦)の分裂不安定性を低エネルギー有効場の理論を用いて調べた。線形安定性解析と非平衡数値シミュレーションにより、不安定性の性質がクロスオーバーを挟んで劇的に変化することが明らかになった(図3)。BEC極限では、フォノンの放出によって2つの循環 κ の渦への分裂が起こるが、BCS極限ではそのようなフォノン放出は起こらない。クロスオーバー領域では、不安定性とフォノンの放出が増強され、二重渦の寿命は最小になる。放出されたフォノンは、回転するブラックホールからエネルギーと角運動量を持ち去るメカニズムとして知られる回転超放射によって増幅された螺旋状のパターンとして観測される。また、温度、フェルミ対粒子数不均衡、3次元効果の影響についても調べた。なお、本研究はベルギーのAntwerp大学のJ. Tempere教授の理論グループとの国際共同研究である。

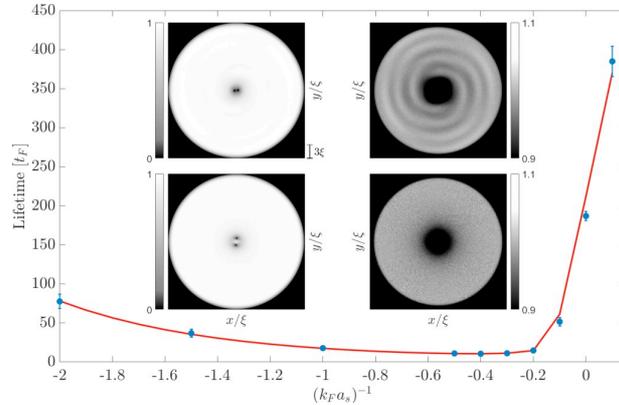


図3: 円筒箱型ポテンシャル内の二重渦の寿命の数値計算結果(青点)と線形安定性解析によって予想される不安定性の時間スケール(赤線)の比較。エラーバーは5回の数値結果の標準偏差を表している。挿入図にはクロスオーバー領域(上段)とBCS領域(下段)における分裂不安定性の対密度の時間発展のスナップショットを示した。

教育・研究業績

学術論文

1. Yosuke Minowa, Yuki Yasui, Tomo Nakagawa, Sosuke Inui, Makoto Tsubota, Masaaki Ashida
Direct excitation of Kelvin waves on quantized vortices
Nature Physics (in press)
2. Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui and Makoto Tsubota
Influence of different mutual friction models on two-way coupled quantized vortices and normal fluid in superfluid 4He
Physical Review Fluids 9, 104605 (2024)
3. Wei-Can Yang, Chuan-Yin, Yu Tian, Makoto Tsubota, Hua-Bi Zeng
Mechanism for cluster formation in a strongly interacting superfluid from gauge/gravity duality
Physical Review B 110, 134510 (2024)
4. Kenta Asakawa, Hideki Ishihara, Makoto Tsubota
Collective Excitations of Self-Gravitating Bose-Einstein Condensates: Breathing Mode and Appearance of Anisotropy under Self-Gravity

- Progress of Theoretical and Experimental Physics, 063J01 (2024)
5. Wei-Can Yang, Makoto Tsubota, Hua-Bi Zeng
Spontaneous symmetry breaking of vortex number in binary alternating current counter superflow
Physical Review B 109, 043303 (2024)
 6. Yuto Sano, Makoto Tsubota
Emergence of isotropy in rotating turbulence of Bose-Einstein condensates
Physical Review A 109, L031301 (2024)
 7. Kenta Asakawa, Makoto Tsubota
Corotation of two quantized vortices coupled with collective modes in self-gravitating Bose-Einstein condensates
Physical Review A 110, 053310(2024)
 8. Haruya Kokubo, Hiromitsu Takeuchi, Kenichi Kasamatsu
Critical Velocity for Quantized Vortex Formation in a Superfluid with a Plate-Shaped Obstacle
Journal of Low Temperature Physics 215, 430-439 (2024)
 9. Wout Van Alphen, Hiromitsu Takeuchi, and Jacques Tempere
Splitting instability of a doubly quantized vortex in superfluid Fermi gases
Physical Review A 109, 043317 (2024)

国際会議講演

1. [Invited] Makoto Tsubota
Numerical Studies of Quantum Turbulence
QFS2024: International Symposium on Quantum Fluids and Solids, USA, 7. 24-30 (2024)
2. [Invited] Makoto Tsubota
Numerical studies of quantum turbulence. Fully coupled two-fluid dynamics in superfluid ^4He . Turbulence of atomic BECs
Turbulent Quantum Fluids, NYU Abu Dhabi, UAE, March 6-8, (2024).
3. [Invited] Hiromitsu Takeuchi
Reynolds similitude of a pure superfluid at low temperatures
FINESS2024: Finite temperature Non-Equilibrium Superfluid Systems, AUS, 9. 1-5 (2024)
4. Akihiro Kanjo, Hiromitsu Takeuchi
Universal description of massive vortices in superfluids
FINESS2024: Finite temperature Non-Equilibrium Superfluid Systems, AUS, 9. 1-5 (2024)
5. Akihiro Kanjo, Hiromitsu Takeuchi
Methods to verify inertia of a quantum vortex in superfluid atomic gases
QFS2024: International Symposium on Quantum Fluids and Solids, USA, 7. 24-30 (2024)

学会・研究会講演

1. [Invited] 坪田誠
量子乱流研究の最前線
日本物理学会、2024年年次大会、9.16-19(2024)
2. 竹内宏光
超流体の量子粘性とレイノルズ相似則
日本物理学会、春季大会、3.18-21 (2024)
3. 貫上晃宏, 竹内宏光
量子渦の運動に対する過質量の効果
日本物理学会、春季大会、3.18-21 (2024)
4. [Invited] 竹内宏光
量子流体の物理
統数研共同研究集会兼第4回TREFOIL研究会~高次元非線形構造が紡ぎだす数理・情報・物理の融合研究~, 理化学研究所 革新知能統合研究センター(AIP), 2.21-22 (2024)

学位論文

博士論文

1. 佐野融人
冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における乱流の対称性
2. 中川朋
超流動 4He における量子渦の非バルクの効果に支配されたダイナミクスの理論的研究

研究助成金取得状況（直接経費）

1. 坪田誠：科研費基盤（C）
「量子流体力学と量子乱流のフロンティアの開拓」
1,800千円
2. 竹内宏光：科研費基盤（B）
「量子相転移動力学の基盤となるスピノールBEC中の位相欠陥の内部状態と動力学の解明」
4,300千円
3. 竹内宏光：JST（科学技術振興機構）さきがけ
「量子粘性の検証と複雑な量子流動現象の解明」
3,828千円

その他

講演

1. 「対称性の破れと量子凝縮：理学部棟玄関から知の最前線まで」
新学舎完成記念シンポジウム・SD講習会、大阪公立大学 サイエンスホール
2024年4月3日

電子相関物理学研究室

小栗 章 教授 本山 海司 (D1) 吉岡 智紀 (M1)
西川 裕規 講師 佐伯 彰彦 (M2) 高山 卓巳 (B4)

研究概要

我々の研究の主題にある近藤効果は、元々は希薄磁性合金系において電気抵抗の温度変化に現れる極小現れる現象として知られていたものである。その本質は、金属中の伝導電子と磁性不純物に局在した量子スピンが強く結合した多体量子状態を形成することにより、凝縮系物理学の重要な基礎概念の一つとなっている。また、その舞台は多方面に広がり、今日では量子ドット、冷却原子気体などの様々な系で研究の対象となっている。近藤効果の低エネルギー領域の性質は、LandauのFermi流体論の精神を受け継いだゼロ次元的な場の理論により記述される。最近、量子ドット系では非平衡電流および電流ノイズの高感度測定によって、Fermi流体を特徴づけるパラメータの決定が可能になってきた。それに伴い、従来の理論では十分でなかった非線形応答や電子励起と正孔励起の非対称性まで含めた輸送係数の高次体補正に関する検討、およびトポロジカル不変量を考慮に入れた検討、が必要になっている。本研究室では、このようなFermi粒子からなる凝縮系の理論研究を行っている。

研究内容：小栗

磁性合金や量子ドットに代表される量子不純物系は、軌道数、磁場やゲート電圧などの外場による不純物準位など多くの実験的に制御可能なパラメータを持ち、超伝導と近藤効果の競合なども含め、多彩な量子状態が実現される。我々は、高次フェルミ流体補正に現れる非線形感受率を通じた3体ゆらぎの効果に関して、広いパラメータ空間の一部分を調べている。我々はこれまでに、電子正孔対称性や時間反転対称性を持たない、多軌道の量子ドット系に対して、非線形電流ゆらぎ・電流ノイズに対する高次フェルミ流体補正に関する微視的なFermi流体論を確立した。特に、非平衡定常状態におけるKeldysh形式の4点バーテックス関数の低エネルギーにおける振る舞い等を明らかにした。さらに、実験グループとの共同で、輸送現象を通じた強相関電子系の低エネルギー量子状態の研究を行っている。また、超伝導-量子ドット接合系では、磁性-非磁性の量子相転移およびクロスオーバーに加え、複数の常伝導リードが接続された系で見られるCooper対のトンネル効果に起因する非局所的な電気伝導が見られる。我々は、他研究機関の理論研究者との共同研究を通して、多端子系の近藤効果との競合を詳細に調べている。特に、三角形三重量子ドット系のAndreev散乱のFermi流体領域における振る舞いや、単一量子ドット系の交差Andreev散乱に対する磁場の効果に関する研究を行っている。

研究内容：西川

フェルミ液体状態は、電子、ヘリウム3、中性子といった相互作用するフェルミ粒子の集団（フェルミ粒子多体系）で普遍的にみられる状態である。ランダウによるフェルミ液体論は、「断熱接続の原理」による「準粒子描像の成立」が理論の要であるが、「断熱接続の原理」は、必ずしも「準粒子描像の成立」の必要条件ではない。我々は、「準粒子描像は成立するが、断熱的連続は不成立のフェルミ多体系」というこれまで見落とされていた「新しいフェルミ液体」に注目し、それに関する研究を継続して行ってきた。これまでの我々の研究活動や他研究グループの最新の研究から、新しいフェルミ液体の局所版である「新しい局所フェルミ液体」を実現する系の存在および新しい局所フェルミ液体相が電子相関由来のトポロジカル不変量で特徴付けられることが明らかにされている。

2023年度は、この新しいフェルミ液体の物理的起原解明に加え、これまで研究してきた4重量子ドット系におけるリープフェリ磁性の近藤効果等の多重量子不純物系の近藤遮蔽過程の詳細解明のために、これら状態に対して量子情報論的観点からの研究を開始した。

教育・研究業績

学術論文

1. “Nonlocal Andreev transport through a quantum dot in a magnetic field: Interplay between Kondo, Zeeman and Cooper-pair correlations”, Masashi Hashimoto, Yoichi Tanaka, Yasuhiro Yamada, Yoshimichi Teratani, Takuro Kemi, Norio Kawakami, Akira Oguri, Phys. Rev. B **109**, 035404 (2024) [18 pages].
2. “Role of bias and tunneling asymmetries in nonlinear Fermi-liquid transport through an $SU(N)$ quantum dot”, Kazuhiko Tsutsumi, Yoshimichi Teratani, Kaiji Motoyama, Rui Sakano, and Akira Oguri, Phys. Rev. B **108**, 045109 (2023) [16 pages].
3. “Kondo Temperature Evaluated from Linear Conductance in Magnetic Fields”, Rui Sakano, Tokuro Hata, Kaiji Motoyama, Yoshimichi Teratani, Kazuhiko Tsutsumi, Akira Oguri, Tomonori Arakawa, Meydi Ferrier, Richard Deblock, Mikio Eto, and Kensuke Kobayashi, Phys. Rev. B **108**, 205147 (2023) [10 pages].
4. “Kondo screening of local moments in a triangular triple quantum dot connected to normal and superconducting Leads”, Masashi Hashimoto, Yoshimichi Teratani, Masaya Shirotani, Yukihiro Nakata, Masashi Shimamoto, Yoichi Tanaka, Yasuhiro Yamada, and Akira Oguri, JPS Conf. Proc. **38**, 011178 (2023) [6 pages].

国際会議講演

1. Kaiji Motoyama, Yoshimichi Teratani, Kazuhiko Tsutsumi, Rui Sakano, and Akira Oguri, “Three-body Fermi-liquid effect on the transport through an infinite U Anderson impurity”, American Physical Society March Meeting (2024.3, Minneapolis, USA, in-person)
2. Akira Oguri, Kazuhiko Tsutsumi, Yoshimichi Teratani, Kaiji Motoyama, and Rui Sakano: “Role of bias and tunneling asymmetries in nonlinear Fermi-liquid transport through an $SU(N)$ quantum dot”, American Physical Society March Meeting (2024.3, Minneapolis, USA, in-person)
3. Rui Sakano, Tokuro Hata, Kaiji Motoyama, Tomonori Arakawa, Meydi Ferrier, Richard Deblock, Mikio Eto, Kensuke Kobayashi, Akira Oguri, “Theory and Experiment of Current Noise through Kondo Dot under Magnetic Fields”, American Physical Society March Meeting (2024.3, Minneapolis, USA, in-person)
4. Yuori Nishikawa, “A New Topological Fermi Liquid State in Quantum Impurity Systems with Duality between localized and itinerant nature”, The 10th International Workshop on the Dual Nature of f-Electrons (2023.6, Himeji).

学会・研究会講演

1. $SU(4)$ 量子ドット系の 3 体 Fermi 流体補正に対する軌道分裂の効果 II, 本山海司, 寺谷義道, 阪野壘, 小栗章
日本物理学会 (2024.3, オンライン開催)
2. カーボンナノチューブ量子ドットの近藤状態における磁場誘起 $SU(4)$ - $SU(2)$ クロスオーバーに対する 3 体的 Fermi 流体効果 II, 佐伯彰彦, 秦徳郎, 本山海司, 寺谷義道, 阪野壘, 荒川智紀, Meydi Ferrier, Richard Deblock, 小林研介, 小栗章,
日本物理学会 (2024.3, オンライン開催)

3. スピン近藤効果による量子ドットの電流ノイズの磁場応答の理論と実験,
阪野壘, 秦徳郎, 本山海司, 荒川智紀, Meydi Ferrier, Richard Deblock, 江藤幹雄, 小林
研介, 小栗章,
日本物理学会 (2024.3, オンライン開催)
4. SU(4) 量子ドット系の 3 体 Fermi 流体補正に対する軌道分裂の効果,
本山海司, 寺谷義道, 阪野壘, 小栗章
日本物理学会 (2023.9, 東北大)
5. カーボンナノチューブ量子ドットの近藤状態における磁場誘起 SU(4)-SU(2) クロスオーバー
に対する 3 体的 Fermi 流体効果, 佐伯彰彦, 本山海司, 寺谷義道, 阪野壘, 小栗章
日本物理学会 (2023.9, 東北大)
6. 超伝導-常伝導接合中のクーパー対のベル相関,
阪野壘, 小栗章, 橋本将司, 江藤幹雄
日本物理学会 (2023.9, 東北大)
7. 量子不純物系における三体的 Fermi 流体補正,
小栗章
研究会「量子凝縮相研究における新潮流」(2023.6.10-11, 京大基研)

学位論文

修士論文

1. 佐伯 彰彦: カーボンナノチューブ量子ドットの近藤状態における磁場誘起
SU(4)-SU(2) クロスオーバーに対する 3 体的 Fermi 流体効果

研究助成金取得状況

1. 小栗章 (代表): 学術振興会・基盤研究 (C)
「メゾスケール系の低エネルギー量子輸送における三体的 Fermi 流体効果の包括的理論研究」
130 万円 (直接経費)

海外出張および海外研修

1. 小栗 章: アメリカ合衆国, 2024 年 3 月 3 日~2024 年 3 月 10 日,
APS March meeting (Minneapolis, USA) 出席・発表
2. 本山海司: アメリカ合衆国, 2024 年 3 月 3 日~2024 年 3 月 10 日,
APS March meeting (Minneapolis, USA) 出席・発表

非線形物理研究室

水口毅 准教授
岡本雄亮 (M2)
上田紗世 (M1)
福田大祐 (B4)

研究概要

1. 柱状節理の構造解析 (岡本, 水口)

柱状節理とは玄武岩などに見られる亀裂がつくる柱状の構造である。世界中に点在しており、近畿地方では東尋坊や玄武洞などが有名である。多角形の断面構造が特徴的であるが、それ以外にもさまざまなスケールの構造的な特徴が知られている。柱構造が形成されるメカニズムとしては、溶岩の冷却・固化にともなう非一様な収縮が原因とする説が有力であるが、実際のマグマを用いて実験的に再現するのは困難であり、構造的な特徴の中にはメカニズムには未解明なものが残されている。本研究では、しばしば見られる柱の太さがおおよそ一定となる領域がどのように形成されるかに着目した。亀裂形成と温度場の関係に関する Grossenbacher らと寅丸らの数値モデルを参考にして、柱幅の深さ依存性が溶岩の厚さ・亀裂形成温度・境界条件等の要因でどう変化するかを数値的に解析した。柱幅がほぼ一定となる領域が存在するための条件もある程度明らかにされた。実際の柱状節理の構造と比較するため、大分県豊後大野市及び熊本県南阿蘇郡で巡検調査を行い、写真測量法によって、実際の柱状節理の構造の三次元的なデータを取得した（おおいた豊後大野ジオパーク学術研究・調査活動助成金）。再構築された3次元イメージから測定された柱幅と数値モデルの結果を定量的に比較し、要因に関する推定を行った。得られた知見の一部を日本物理学会第78回年次大会にて発表している。

2. テキストの単語列解析 (上田, 水口)

Zipf 則は多様な要素で構成される集団の統計的な性質に関する現象論的な分布則である。最も有名な例は、英文文章を構成する英単語の出現頻度とそのランクの間のべき的な関係だが、この法則は言語によらず成立することが知られており、ヒトの精神活動の産物である文章というものに対する数理的なアプローチの一つと言えよう。本研究は、文章を単語の列とみなすことで、ユニグラムに対する分布則である Zipf 則では捉えきれない特徴を定量化し解析することを主眼としている。単語列を数列に変換することで、文章構造を数理的な取り扱う。これはよく知られた記号力学の手法の一つでもあり、特定の言語によらない解析・比較を可能にする。今回我々は、単語列を単語の出現頻度のランクに変換し、その帰還写像を解析することで、異なる言語の分類や比較を行った。また、学外の研究者と協力して品詞との関係についても論じている。結果の一部を、国際研究集会 STATPHYS28 及び共同研究集会「社会物理学とその周辺」で発表している。

3. 家系図ネットワーク構造 (水口, 赤石 (OB))

家系図は生物個体間の親子関係を図示したものであるが、個体を頂点、親子関係を辺とするネットワークとみなすことができる。辺には向きが自然に定義され、ネットワーク全体としても有向非巡回性を有しているという特徴を持つ。この家系図ネットワークは多くのループを含んだ複雑な構造をしていることが知られている。本研究では、一個体の先祖を辿ることで得られるネットワークに着目し、有向非巡回性をもつネットワークに特有な構造として祖先ループを定義し、その長さの分布を数理的に解析した。得られた知見の一部を国際研究集会 STATPHYS28 及び日本物理学会 2023 年春季大会、同第 78 回年次大会にて発表している。

4. 慣性センサーを用いた物体の動態解析（福田，水口）

加速度計・ジャイロ스코ープ等から構成される慣性センサーを用いて物体の運動状態を解析する手法の開発に取り組んだ。測定された加速度および角速度の時系列から物体の運動状態を推定するという問題は一種の逆問題であり，その解決は生物の動態把握や制御などで重要な役割を担うことが期待されている。本研究では，加速度および角加速度それぞれの時間微分である躍度と角躍度を用いて，物体中の等速度点の位置を推定する手法の開発と高精度化を試みた。

教育・研究業績

国際会議講演

1. T. Mizuguchi: “Structure analysis of family trees by focusing on loops”, STATPHYS 28, 2023年8月7-11日, 東京大学
2. T. Suzuki and T. Mizuguchi: “Structural analysis of written texts in terms of word sequence”, STATPHYS 28, 2023年8月7-11日, 東京大学

学会・研究会講演

1. 赤石大夢，水口毅：「ループ構造に着目した家系図の構造解析 II」 日本物理学会 2023年 春季大会 オンライン開催
2. 岡本雄亮，水口毅，寅丸敦志：「柱状節理の形成過程における温度場の役割について」 日本物理学会 第78回年次大会 東北大学
3. 水口毅：「家系図のループ構造」 日本物理学会 第78回年次大会 東北大学
4. 水口毅，鈴木岳人：「語長によるテキストの構造解析」 2023年度 MIMS 現象数理学研究拠点 共同研究集会 社会物理学とその周辺 明治大学／オンライン

学位論文

修士論文

1. 赤石大夢：「ループ構造に着目した家系図の構造解析」

研究助成金取得状況

1. おおいた豊後大野ジオパーク学術研究・調査活動助成金

量子動力学研究室

田中智	教授	片山舞人 (M2)	窪田真俊 (B4)	内藤圭祐 (B4)
神吉一樹	准教授	田中和嶺 (B4)	松阪匠 (B4)	
ガーモン・サバンナ	准教授	塩田奈帆 (M2)	白井俊也 (B4)	
野場賢一	講師	浅野光祐 (D3)	古永武 (M2)	近藤駿斗 (B4)

研究概要

1. 強いコヒーレント外場駆動された単分子共鳴発光スペクトル (田中、神吉、片山)

強いコヒーレント外場によって単一分子の振動モードがコヒーレント励起された場合の発光緩和ダイナミクスを、自由輻射場系も含めた全系の複素スペクトル解析を用いて解析した。着目量子系をシングルモードのボソンとして表し、周期的な外場コヒーレント電場によって着目振動子の平衡点が周期的に変位し真空状態が励起され、1次元フォトニック結晶との結合により発光脱励起する過程を解析した。発光スペクトルの起源を、共鳴モード、連続モード、分岐点効果に成分分離し、それぞれがどの時間領域でスペクトルに寄与しているかを詳細に解析した。特に、励起の初期時間領域では、共鳴モードと連続モードの破壊的干渉によって、スペクトル強度が抑えられ発光バンド全体にわたる広いスペクトル構造をとることを明らかにした。放射光の量子光学的な特徴を明らかにするために光子相関を計算し、量子光としての特徴であるアンチバンチングのエネルギー依存性、時間依存性、始状態依存性を明らかにした。研究成果は、光物性研究会、日本物理学会、また、論文として Physics にて発表された。

2. 量子相転移系の量子幾何 (田中、窪田)

ボソン2次形式で書かれる動的カシミール効果のハミルトニアン系が、仮想遷移相互作用が固有振動数の大きさを上回るところで量子相転移を起こし、系の真空状態が不安定化する現象について、量子幾何学的な特徴を明らかにしている。安定領域、不安定領域を含めたパラメーター空間全領域での複素固有モードを求めるために、リウビリヤンの複素固有値問題を解いた。さらに、この固有モードが $U(1)$ ゲージ任意性を持つことに着目し、ゲージ対称性を保つために共変微分を定義し、これを用いてベリー曲率、量子幾何テンソルを求めた。相転移の臨界点近傍で、ベリー位相、量子幾何テンソルが発散し、複素ベリー位相、また、量子計量が負になることを見出した。この研究は、現在も2024年度も研究中心テーマとして発展している。研究成果は、日本物理学会で発表している。

3. 動的カシミール効果からの光子放射における連続モード・スキューズ (神吉、田中、松阪)

動的カシミール効果による光子生成を電磁場の量子ゆらぎのパラメトリック増幅ととらえ、パラメトリック振動子が連続輻射場と結合した開放量子系のハイゼンベルク描像での時間発展を考えた。パラメトリック振動子単体がパラメトリック共鳴近傍にあるとき、離散モードの固有振動数は純虚数であり、光子数は指数関数的に増大する。連続輻射場との結合を十分強くするかパラメトリック共鳴からの離調を大きくすると、指数的な増大を示したモードの純虚数振動数は複素平面上の実軸を超えて、減衰モードへと変化する。このようにパラメトリック増幅が散逸の効果により抑えられている状況では、パラメトリック振動子の光子数の期待値が一定に保たれ、外部に放射される光子数が時間に比例して増大する定常光子放射が起こる。このとき、パラメトリック振動子はスキューズ真空状態にあり、連続輻射場には駆動振動数 Ω と $\omega + \omega' = \Omega$ の関係にある振動数 ω と ω' をもつ2光子が次々と放出され、長時間極限で連続モード・スキューズ真空が形成されていくことを示した。

4. Non-Hermitian physics for open quantum systems (S. Garmon)

During the academic year from April 2023 to March 2024 I gave several talks at conferences and one talk during an academic visit to a domestic university. First, I was invited to give

a lecture series for the Statistical & Quantum Physics Winter School 2024, which was organized by students at the University of Tokyo. Here, I was asked to give two back-to-back lectures, aimed at graduate students as an introduction to non-Markovian dynamics in open quantum systems. I also gave two contributed talks at domestic conferences as well as an invited talk during an academic visit to University of Yamanashi. I also published a commentary piece in Nature Physics (News & Views section) on a paper that I previously refereed for the journal. Further, I made progress on several research topics during this period, including the dynamics of open quantum systems in which a quantum emitter is coupled to a structured reservoir that exhibits topologically-protected surface states as well as classical radiation damping in waveguides and other structures. During an academic visit with Kazunari Hoshimoto at University of Yamanashi I also started a new topic on dynamics of open quantum systems based in the Liouvillian formalism, which is still in the early stages.

5. PT 対称複素調和ポテンシャルをもつ非エルミート系の固有値問題 (古永、野場)

調和振動子の固有値がすべて実数であるのに対し、エネルギーが反転した逆調和振動子の固有値はすべて純虚数であり、その固有関数は無限遠で発散することが知られている。これらを連続的に繋ぐ PT (パリティ・時間反転) 対称な複素調和ポテンシャルを持つ系について、ポテンシャルが調和振動子から逆調和振動子へと変化するにつれて、局在する固有関数の固有値がどのように変化するかを解析した。その結果、実固有値が2つずつ対になって消失し、例外点から複素共役の固有値として出現することなどが示された。

6. 古典的リウビリ안의固有値問題による非可積分振り子の理論解析 (浅野、野場)

振り子と調和振動子が結合した二自由度の非可積分系の運動を、古典力学の時間発展の生成演算子であるリウビリ안의固有値問題に基づいて解析した。結合がない可積分系では、リウヴィル演算子の零固有値が共鳴点で無限に縮退しているが、弱い結合を加えた非可積分系では準位反発によって縮退が解かれ、固有値の振動数分布にギャップが生じる。このギャップの大きさを評価するため、非平衡統計力学で知られる衝突演算子を導入し、その存在条件を解析することで、ギャップの結合定数への依存性を定量的に評価できることを示した。

教育・研究業績

学術論文

1. 神吉一樹, 田中智: "散逸を含む動的カシミール効果の複素スペクトル理論", レーザー研究 第 5 1 巻第 5 号, pp.331–336, (2023).
2. M. Katayama, S. Tanaka, K. Kanki, "Ultrafast Resonant Photon Emission from a Molecule Driven by a Strong Coherent Field in Terms of Complex Spectral Analysis", Physics **2024**, 6, 579–598. <https://doi.org/10.3390/physics6020038> (2024).
3. Yuki Goto, Savannah Garmon, Tomio Petrosky, "Enhanced Classical Radiation Damping of Electronic Cyclotron Motion in the Vicinity of the Van Hove Singularity in a Waveguide", Prog. Theor. Exp. Phys. **2024**, 033A02 (2024).
4. S. Garmon, Symmetry gives rise to an elegant catastrophe, Nature Physics **19**, 1073–1074, News & Views, 2023. [Non-refereed]

国際会議講演

1. S. Garmon, "Topological exceptional point and spectral properties of a quantum emitter attached to a semi-infinite reservoir with chiral sublattice symmetry" STATPHYS28, University of Tokyo, August 11, 2023.

2. Kazuki Kanki and Satoshi Tanaka, “Continuum squeezed vacuum formation from the dynamical Casimir effect”, Physics of Open Systems and Beyond, Sapporo, August, 2023.
3. S. Garmon, “Dynamics of a quantum emitter coupled to a topological structured reservoir” Physics of Open Systems and Beyond, Sapporo, August, 2023.
4. S. Tanaka and K. Kanki: “Geometrical view of the quantum phase transition of a chirped optical parametric amplifier with CEP control”, Physics of Open Systems and Beyond, Sapporo, August, 2023.
5. T. Furunaga, K. Noba, “Solutions of eigenvalue problem for a PT symmetric harmonic potential system”, Physics of Open Systems and Beyond, Sapporo, August, 2023.

学会・研究会講演

1. S. Garmon, “Dynamical signatures of exceptional points in open quantum systems” Yamanashi University, Kofu, July 18, 2023.
2. 宮永麟太郎, 大島悟郎, 田中智, 溝口幸司: 「CuCl 半導体微小共振器における共振器ポラリトンの干渉測定」 日本物理学会第78回年次大会 2023年9月東北大、仙台
3. 神吉一樹, 田中智: 「動的カシミール効果からの光子放射における連続モード・スキューミング」 日本物理学会第78回年次大会 2023年9月東北大、仙台
4. 田中智, 神吉一樹: 「CEP 制御によるパラメトリック増幅系のベリー位相と量子真空不安定性」 日本物理学会第78回年次大会 2023年9月東北大、仙台
5. 古永武, 野場賢一: 「PT 対称複素調和ポテンシャルをもつ系の固有値問題の厳密解」 日本物理学会第78回年次大会, 2023年9月, 東北大学
6. 浅野光祐, 野場賢一, トミオ・ペトロスキー: 「非可積分弾性振子共鳴点近傍における古典リウビリヤンの固有値に対する準位反発幅の解析的評価」 日本物理学会第78回年次大会, 2023年9月, 東北大学
7. 中出捷, 神吉一樹, トミオ・ペトロスキー: 「一次元量子ブラウン運動における2つの時間可逆効果に起因した見かけ上の負の拡散」 日本物理学会第78回年次大会, 2023年9月, 東北大学
8. S. Garmon, “Non-exponential dynamics near the continuum threshold: Bound states, anti-bound states and exceptional points” (two combined talks) Stat&QuantPhys Winter School 2024, University of Tokyo (virtual format), February 22, 2024.
9. 片山舞人, 田中智, 神吉一樹: 「強いコヒーレント外場による分子の共鳴発光過程に対する複素スペクトル解析」 日本物理学会2024年春季大会 2024年3月 オンライン
10. 浅野光祐, 野場賢一, トミオ・ペトロスキー: 「共鳴点近傍における非可積分系古典リウビリヤンの固有振動数ギャップ幅の解析的評価」 日本物理学会2024年春季大会, オンライン
11. 宮永麟太郎, 鎌田将行, 大島悟郎, 田中智, 溝口幸司: 「CuCl 半導体微小共振器における共振器ポラリトンの干渉測定 II」 日本物理学会2024年春季大会 2024年3月 オンライン
12. 仲田壮, 大島悟郎, 田中智, 溝口幸司: 「現象論的有効リウヴィリアンによる n 型 GaAs 中の縦光学フォノンとプラズモン間の結合状態の実験研究」 日本物理学会2024年春季大会 2024年3月 オンライン

学位論文

修士論文

1. 片山舞人: 「強いコヒーレント外場によって駆動された量子振動子の発光過程に対する複素スペクトル解析」

2. 塩田菜帆：“Left-handed and right-handed exceptional points in a topological reservoir with attached quantum emitter”
3. 古永武：「PT 対称複素調和ポテンシャルをもつ系の固有値問題の解」

研究助成金取得状況

1. サバンナ・ガーモン：学術振興会・基盤研究 (C) (代表) 「Liouvillian analysis of dynamics at exceptional points incorporating quantum jumps」
2. サバンナ・ガーモン：学術振興会・基盤研究 (B) (分担) 「非エルミート系の非平衡輸送現象：物理量演算子を定義する枠組みの構築」

生体光物理研究室

飯田 琢也 (教授)		
[LAC-SYS研究所(兼任)]	[所属学生]	
田村 守(特任講師)	林 康太(D3、学振DC1)	長谷 龍馬(M1)
豊内 秀一(特任講師)	叶田 雅俊(D1、学振DC1)	堀田 隆生(M1)
高木 裕美子(特任研究員)	小森 弘稀(M2)	鈴木 啓太(B4)
勝間田 麻美(特任研究員)		竹森 洸征(B4)

研究概要

- 【課題(1) 光誘導加速によるアフィニティー制御】**

細胞から分泌された生物学的ナノ粒子の表面に発現する複数種類の膜タンパク質を、抗体修飾ビーズを用いたマイクロフロー光濃縮により迅速かつ選択的に定量評価できることを解明し、従来の免疫測定法であるELISAの検出限界以下の低濃度領域でも由来細胞(大腸がん由来EVと肺がん由来EV)による膜タンパク質のアフィニティーの違いを計測できることを解明した[Nanoscale Horizons 2023, Outside Front Coverに選抜、IF=11.7]。また、数時間を要する超遠心分離を省略して、夾雑物を多く含む細胞上清中でも数分で生物学的ナノ粒子を検出できることも示唆した。
- 【課題(2) 核酸の特異的結合の光誘導加速】**

これまでに機構解明を進めてきたヘテロプローブ光濃縮法(一本鎖DNAを修飾したマイクロ粒子と金ナノ粒子を異種プローブとして使用)により、増幅なしでデジタルPCRに匹敵する高感度な標的DNAの定量計測ができる可能性を示し、標的DNA中の一塩基の差異をも識別できる可能性を解明した[論文投稿中]。さらに、液中に浮遊する蛍光染色一本鎖DNAと基板上の相補的なDNAとの特異的結合の様子を単一分子分光により観察し、DNA二重鎖形成に由来すると思われる複数の輝点を確認した[日本化学会第104春季年会(2024年3月)]。これらの成果はDNAの二重鎖形成における量子性の解明につながる重要な成果である。
- 【課題(3) 細胞内での小器官への分子集積】**

独自開発したファイバ型光濃縮モジュールによる細胞表面への粒子集積の初期検討を行い重要な進展があった。特にファイバの固液界面からの距離によって、標的となる分散質の光濃縮下での挙動が大きく異なることを解明した[OMC 2023で発表、Proc. SPIE 12606]。
- 【課題(4) 光誘起流体現象およびナノ光熱変換の理論】**

独自開発してきた周期的なナノ非貫通孔を有する「ナノ粒子鑄型基板」により、光濃縮で生体ナノ物質を集積する2ステップ光濃縮法により大面積にタンパク質修飾ナノ粒子の定量評価を高感度かつ数分以内に達成できる新機構を解明した[Preprint: Research Square (2024年1月); 論文投稿中]。同基板はmWレベルの低出力レーザー照射による光誘起対流で光濃縮を可能とするが、光熱変換特性の解明に向けた超高速近接場分光を用いた早稲田大・井村Gとの共同研究にも着手した。ナノ光熱変換の理論に関しては、低熱伝導率の遷移金属ナノロッドにおける高次プラズモニックモードの波長選択的な励起により、その波動関数を反映したナノスケール温度場の空間パターンを制御できることも解明した[RSC Advances 2023]。
- 【課題(5) 光濃縮の社会実装に向けた検討】**

これまで開発してきた光濃縮がんマーカー検査キット[PCT/JP2023/018633]の試薬と体駆動系の改善を行い、愛知県がんセンター・田口Gとの共同研究で大腸がん患者血液試料中マーカータンパク質の経時変化を調べ、早期診断の基礎構築に大きな前進があった。また、浜松医科大学・長島Gとの共同研究により、認知症マーカータンパク質の分光測定にも着手した。さらに、マイクロフロー系を搭載できる小型光濃縮システムを構築し、抗体修飾ビーズと生体由来ナノ物質の選択的結合を光誘導加速できることを実証し、最先端光学技術の「共通基盤」構築に貢献し、医療応用に向けた重要な知見を得た。

教育・研究業績

学術論文

- Masatoshi Kanoda, Kota Hayashi, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami*, Takuya Iida*, “High-throughput Light-induced Immunoassay under One-minute Antibody-coating with Energy Saving Nanoparticle-imprinted Substrate”, PREPRINT (Version 1), *Research Square* (2024). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3850855/v1> 公開日: 2024/1/12

2. Kenji Setoura*, Mamoru Tamura, Tomoya Oshikiri, Takuya Iida, “Switching nanoscale temperature fields with high-order plasmonic modes in transition metal nanorods”, *RSC Advances*, 13, 34489-34496 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA06649E> 公開日2023/11/24
3. Syoji Ito, Takayuki Nanno, Takahiro Kaji, Mamoru Tamura, Takuya Iida, Hiroshi Miyasaka, “Driving Micro-Objects Using Optical Force due to Photoemission”, *ChemRxiv* (2023), Version 1. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-gvnpg> 公開日2023/9/14
4. Kana Fujiwara, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Mika Omura, Kenta Morimoto, Ikuhiko Nakase*, Shiho Tokonami*, Takuya Iida*, “Ultrafast sensitivity-controlled and specific detection of extracellular vesicles using optical force with antibody-modified microparticles in a microflow system”, *Nanoscale Horizons*, 8, 1034-1042. (2023) <https://doi.org/10.1039/D2NH00576J> 公開日2023/7/12
※同誌の **Outside Front Cover** に採用

国際会議議録

1. Takuya Iida, Shota Hamatani, Yumiko Takagi, Kana Fujiwara, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, “Light-induced acceleration of antigen-antibody reaction for detecting attogram-level proteins”, Proc. SPIE 12606, Optical Manipulation and Structured Materials Conference, 1260618 (2023/9/20). <https://doi.org/10.1117/12.3008371>
2. Kota Hayashi, Mamoru Tamura, Masazumi Fujiwara, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Effect of interface in fiber-based optical condensation”, Proc. SPIE 12606, Optical Manipulation and Structured Materials Conference, 1260619 (2023/9/20). <https://doi.org/10.1117/12.3008375>

招待講演

1. 飯田琢也、「光濃縮で拓く次世代医工計測技術と量子生命科学」、北里大学理学部 第9回理学部セミナー、(北里大学 相模原キャンパス、2024年1月23日)
2. 飯田琢也、「理系教授の声2「物理の教授だけど、なにか質問ある?」、光マニピュレーション研究会「合宿研究会」、(びわこ湖畔「白浜荘」ゲストハウス加茂川(滋賀)、2024/1/15~1/16)
3. 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦、「ハイスループット光濃縮計測と炎症関連マーカーへの適用可能性の検討」、北海道大学・村上研ラボセミナー、(北海道大学 遺伝子病制御研究所、2023/11/13)
4. 飯田琢也、山梨大学集中講義(非常勤講師)、国立大学法人山梨大学大学院医工農学総合教育部・工学部、(山梨大学甲府キャンパス 2023/8/8-8/10)
5. 飯田琢也、「光濃縮リキッドバイオプシーが拓く未来の医工計測」、Kobe Biological Science Forum、大正製薬株式会社、(於: ANA クランプラザホテル神戸、2023/7/21)
6. 飯田琢也、「光濃縮が生み出す高密度環境下での生化学反応制御」、強光子場研究懇談会(於: 大阪公立大学 中百舌鳥キャンパス A12棟サイエンスホール、2023/7/14)
7. 飯田琢也、「フォトサーマル・フルイディクスによる生体機能制御とエネルギー変換」第24回プラズモニク化学シンポジウム(於: 日本橋ライフサイエンスビル 10階1004会議室、2023/6/23)

国際会議講演

1. Takuya Iida, Kana Fujiwara, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Ikuhiko Nakase, Shiho Tokonami, “Light-induced Acceleration of Biomolecular Recongnitions for Proteins and Nanoscale Extracellular Vesicles”, The International Conference on Optical and Photonic Engineering(icOPEN), (Holiday Inn Singapore Atrium, Singapore, 2023/11/27-12/1) 11/30
2. Masatoshi Kanoda, Kota Hayashi, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Development of Light-induced Detection Method for Viruses with Plasmonic Nano-bowl Substrate”, The International Conference on Optical and Photonic Engineering(icOPEN), (Holiday Inn Singapore Atrium, Singapore, 2023/11/27-12/1) 11/28
3. Koki Komori, Kana Fujiwara, Mami Katsumata, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Ikuhiko Nakase, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Rapid and Specific Detection of Disease Marker Bio-nanomaterials with Microflow-mediated Optical Condensation” (Poster), 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (Keio Plaza Hotel Sapporo, Sapporo, Japan, 2023/11/14-17). 11/16
4. Ryuki Hotta, Kota Hayashi, Anna Honda, Mamoru Tamura, Takuya Iida, Shiho Tokonami, “Damage-free Assembly of Photosynthetic Microbes with Optical Condensation using Microlens Array for Enhancing Photoelectric Conversion” (Poster), 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (Keio Plaza Hotel Sapporo, Sapporo, Japan, 2023/11/14-17). 11/16
5. Ryoma Hasegawa, Masatoshi Kanoda, Kota Hayashi, Shuichi Toyouchi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Acceleration of DNA Double Strand Formation by Photothermal Assembly with Nano-bowl Substrate” (Poster), 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (Keio Plaza Hotel Sapporo, Sapporo, Japan, 2023/11/14-17). 11/16

6. Masatoshi Kanoda, Kota Hayashi, Yumiko Takagi, Shuichi Toyouchi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Optical Condensation Raman Spectroscopy of Organic Compounds by Self-assembled Plasmonic Nano-bowl Structures”, 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (Keio Plaza Hotel Sapporo, Sapporo, Japan, 2023/11/14-17). 11/17
7. Kota Hayashi, Mamoru Tamura, Masazumi Fujiwara, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “The Assembly of Colloidal Particles with Light-induced Convection from Fiber-based Optical Condensation Module” (POSTER SESSION), The 7th International Soft Matter Conference (ISMC2023), (Osaka International Convention Center (Grand Cube Osaka), 2023/9/4-9/8). 9/7
8. Takuya Iida, Kana Fujiwara, Yumiko Takagi, Shota Hamatani, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, “Acceleration of Antigen-antibody Reaction by Optical Force for Detecting Biological Nanomaterials”, The 14th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO 14), (Paradise Hotel Busan, Busan, Korea, 2023/7/19-7/22). 7/20
9. Shuichi Toyouchi, Seiya Oomachi, Kota Hayashi, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Optical Condensation of Mixture of Plasmonic Nanoparticle and Microparticles via DNA Hybridization”, The 14th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO 14), (Paradise Hotel Busan, Busan, Korea, 2023/7/19-7/22). 7/20
10. Kota Hayashi, Mamoru Tamura, Masazumi Fujiwara, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Large-scale Optical Condensation on the Solid-liquid Interface with an Optical Fiber Module”, The 14th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO 14), (Paradise Hotel Busan, Busan, Korea, 2023/7/19-7/22). 7/20
11. Masatoshi Kanoda, Kota Hayashi, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Seiju Hasegawa, Kohei Imura, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Reflectance Spectroscopy of Optically Assembled Bio-nanoparticles with Plasmonic Nano-bowl Substrates”, The 14th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO 14), (Paradise Hotel Busan, Busan, Korea, 2023/7/19-7/22). 7/20
12. Takuya Iida, Shota Hamatani, Yumiko Takagi, Kana Fujiwara, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, “Light-induced acceleration of antigenantibody reaction for detecting attogram-level proteins”, The 10th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2023), (Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan, 2023/4/17-4/27). 4/19
13. Kota Hayashi, Mamoru Tamura, Masazumi Fujiwara, Shiho Tokonami, Takuya Iida, “Effect of interface in fiber-based optical condensation”, The 10th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2023), (Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan, 2023/4/17-4/27). 4/21

学会・研究会講演

1. 「マイクロフロー光濃縮による夾雑系中がんマーカーの高感度・迅速計測」、飯田琢也、高木裕美子、勝間田麻実、藤原佳奈、田村守、中瀬生彦、床波志保、田口歩、第 71 回応用物理学会春季学術講演会、(東京都市大学 世田谷キャンパス&オンライン、2024/3/22-25) 3/24
2. 「マイクロフロー光濃縮による微量試料中サイトカインの広濃度迅速計測」、竹森洸征、小森弘稀、高木裕美子、田村守、中瀬生彦、床波志保、小林孝生、岩谷壮太、村上正晃、飯田琢也、第 71 回応用物理学会春季学術講演会、(東京都市大学 世田谷キャンパス&オンライン、2024/3/22-25) 3/24
3. 「ナノ光熱変換における高次モードプラズモンの利用」、瀬戸浦健仁、田村守、押切友也、飯田琢也、第 71 回応用物理学会春季学術講演会、(東京都市大学 世田谷キャンパス&オンライン、2024/3/22-25) 3/22
4. “Understanding the DNA hybridisation kinetics under optical condensation with simultaneous single particle detection” (Poster), Bhagya Lakshmi Sankaramangalam Balachandran, Shuichi Toyouchi, Syoji Ito, Shiho Tokonami, Takuya Iida, 日本化学会第 104 春季年会 (2024) (於: 日本大学理工学部 船橋キャンパス、2024/3/18-3/21) 3/19
5. 「多点光濃縮による光合成微生物の高生存率集積と光電流計測」、堀田隆生、林康太、本田杏奈、田村守、飯田琢也*、床波志保*、第 34 回光物性研究会、(於: 大阪大学豊中キャンパス、2023/12/8-12/9) 12/8
6. 「ナノボウル基板とプローブマイクロ粒子を用いた低パワー光発熱集合による DNA の選択的検出」、長谷川龍馬、叶田雅俊、林康太、豊内秀一、田村守、床波志保、飯田琢也、第 34 回光物性研究会、(於: 大阪大学豊中キャンパス、2023/12/8-12/9) 12/8
7. 「ファイバー型モジュールによるミリメートルオーダー光濃縮」林康太、田村守、藤原正澄、床波志保、飯田琢也、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、(熊本城ホール、2023/9/19~23) 9/20
8. 「ナノボウル基板による有機分子の光濃縮ラマン分光」叶田雅俊、林康太、豊内秀一、田村守、床波志保、飯田琢也、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、(熊本城ホール、2023/9/19~23) 9/20
9. 「マルチ光濃縮による光合成微生物の高生存率集積と代謝機構の解析」堀田隆生、林康太、本田杏奈、田村守、飯田琢也、床波志保、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、(熊本城ホール、2023/9/19~23) 9/20
10. 「ナノボウル基板とナノプローブによる DNA 二重鎖形成の光誘導加速」長谷川龍馬、叶田雅俊、林康太、豊内秀一、床波志保、飯田琢也、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、(TKP 熊本カンファレンスセンター、2023/9/19~23) 9/22
11. 「レーザー照射点移動による細菌捕捉法」、光木遥平、飯田琢也、床波志保、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、(TKP 熊本カンファレンスセンター、2023/9/19~23) 9/21
12. 「LAC-SYS 研究所と異分野横断研究の歩み」、飯田琢也、床波志保、中瀬生彦、第 10 回光科学異分野横断萌芽研究会、(天成園 小田原駅別館、2023/9/1~9/3) 9/1
13. 「プラズモニクナノボウル基板による生物学的ナノ粒子の光濃縮検出」、叶田雅俊、林康太、高木裕美子、田村守、床波志保、飯田琢也、第 10 回光科学異分野横断萌芽研究会、(天成園 小田原駅別館、2023/9/1~9/3) 9/2
14. 「微小物質のファイバ型光濃縮」林康太、田村守、藤原正澄、床波志保、飯田琢也、第 10 回光科学異分野横断萌芽

- 研究会、(天成園 小田原駅別館、2023/9/1～9/3) 9/2
15. 「光濃縮を用いた DNA の PCR フリー検出法の開発」、豊内秀一、大間知誠也、林康太、高木裕美子、田村守、床波志保、飯田琢也、第 10 回光科学異分野横断萌芽研究会、(天成園 小田原駅別館、2023/9/1～9/3) 9/3
 16. 「ナノボウル光濃縮基盤を用いた DNA 検出法の開発」長谷川龍馬、叶田雅俊、林康太、豊内秀一、床波志保、飯田琢也、第 83 回分析化学討論会、(富山大学五福キャンパス、2023/5/20～5/21) 5/20
 17. 「マルチ光濃縮による低ダメージ微生物集積法の開発」、堀田隆生、林康太、山本彩果、渡邊翔太、本田杏奈、飯田琢也、床波志保、第83回分析化学討論会、(富山大学五福キャンパス、2023/5/20～5/21) 5/20

研究助成金取得状況

1. 代表者：飯田琢也、JST未来社会創造事業「共通基盤」領域(本格研究)、研究課題：低侵襲ハイスループット光濃縮システムの開発、期間：2021年度～2025年度、研究費総額(直接+間接)：7.5億円 [継続]
2. 代表者：飯田琢也、科学研究費補助金 基盤研究 (A)、研究課題名：光濃縮下での高密度系における生体分子のアフィニティー制御、期間：2021年度～2024年度、研究費総額(直接+間接)：4251万円 [継続]
3. 代表者：床波志保、分担者：飯田琢也、NEDO官民による若手研究者発掘支援事業(共同研究フェーズ)、研究課題名：有用微生物の外場誘導濃縮による革新的エネルギー・物質変換システムの創成、2023年度～2025年度、研究費総額(直接+間接)：9462万円 [新規]

その他

1. [受賞]若手ポスター発表賞、第 83 回分析化学討論会、発表題目：「ナノボウル光濃縮基盤を用いた DNA 検出法の開発」、[受賞者：長谷川龍馬]著者：長谷川龍馬、叶田雅俊、林康太、豊内秀一、床波志保、飯田琢也、(2023 年 5 月 21 日、於：富山大学五福キャンパス)、
2. [シンポジウム等世話人]第10回光科学異分野横断萌芽研究会、(2023年9月1日～3日(於：天成園 小田原駅別館)、事務局、物理・極限物性系アドバイザー、生命系組織委員として飯田琢也が開催に貢献
3. [新聞・メディア]Optical forces help reveal how cells communicate、Optics.org、2023/10/10
4. [新聞・メディア]Developing Ultrasensitive Method for Detecting Nanoscale Extracellular Vesicles、*AzoNano*、2023/10/9
5. [新聞・メディア] Super-Efficient Laser Light Allows Accurate Detection of Nanoscale Extracellular Vesicles, Revolutionizes Cancer Diagnosis and Treatment、*The Science Times*、2023/10/9
6. [新聞・メディア]Super-efficient laser light-induced detection of cancer cell-derived nanoparticles、*eCancer*、2023/10/9
7. [新聞・メディア]Ultra-Efficient Laser Light Detects Cancer Cell Nanoparticles、*MirageNews*、2023/10/8
8. [新聞・メディア]Super-efficient laser light-induced detection of cancer cell-derived nanoparticles、*AAAS EurekAlert!*、2023/10/6
9. [新聞・メディア]光の力でがん細胞由来ナノ粒子の効率的な検出に成功、*Laser Focus World*、2023/7/14
10. [新聞・メディア]公大、光の力でナノ粒子の効率的な検出に成功、*オプトロニクス*、2023/7/13
11. [新聞・メディア]大阪公立大学／超遠心分離を省略し、3 時間半の検出時間を 5 分に短縮！ 光の力でがん細胞由来ナノ粒子の効率的な検出に成功、*Optinews*、2023/7/12
12. [新聞・メディア]大阪公立大、光の力でがん細胞由来ナノ粒子の効率的な検出に成功、*日経新聞*、2023/7/12
13. [プレスリリース]超遠心分離を省略し、3 時間半の検出時間を 5 分に短縮！ 光の力でがん細胞由来ナノ粒子の効率的な検出に成功、大阪公立大学・科学技術振興機構(JST)プレスリリース、2023 年 7 月 12 日。
https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-06898.html
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230712-2/index.html>

生体・構造物性物理学研究室

南後 守	特任教授	橋本 健人	(D3)	新在家 隆征	(M1)
杉崎 満	准教授	坂本 翼	(M2)	香川 智彦	(M1)
				平岩 恵理	(B4)

研究概要

1. スペクトル分解顕微鏡によるステート遷移過渡期の可視化（平岩，橋本，杉崎，南後）

高等植物や藻類，さらには細菌の行う光合成は高効率なエネルギー生産が実現されていることが知られている．そこでは太陽光を高効率に取り込むために，アンテナの役割をする色素蛋白質複合体が利用されている．これにより吸収断面積を大きくとることが可能となり，微弱光の環境下でも生命活動の持続が可能となっている．しかしその一方で，太陽光の強度は時間や季節により大きく変化するため，光合成生物は，強光下において余剰エネルギーを散逸させ，励起状態を介した自己破壊を防ぐための機構を兼備することが必要となる．このような光強度の変化に伴うエネルギーの輸送経路を切り替える機構はステート遷移とよばれ，生物種ごとに様々なモデルが提唱されている．フィコビリゾーム（PBS）とよばれるアンテナ複合体を有する藍藻においては，外光の強度に応じてアンテナを光合成膜上で移動させ，その後のエネルギー生産効率をコントロールしていると考えられている．しかしながら，ステート遷移に関する研究報告のうち，ミクロスコピックな観測に基づくものは非常に限られているのが現状であるため，ステート遷移の完全な理解には至っていない．そのため，本研究においては，ステート遷移の可視化を目指している．

昨年まで構築した走査型顕微鏡を改造したスペクトル分解顕微鏡を用いることにより，ほぼ回折限界となる空間分解能で顕微蛍光スペクトルを取得することに成功している．高い空間分解能とスペクトル分解能から，色素タンパク質複合体間の組成比を決定することができる．本年度は，藍藻である *Gloeobacter violaceus* の生育条件を変化させ，ステート遷移過渡期にある単一細胞内の観測に成功した．現在のところ，明順化状態と暗順化状態を特徴づける際に色素蛋白質複合体の一つであるフィコエリスリンが重要な役割を演じていると考えている．

2. 蛍光発光差分超解像度顕微鏡法の開発（坂本，橋本，杉崎）

光学顕微鏡の空間分解能（すなわち，二点を区別できる最小距離）は光の波長の約半分程度に制限される．これはキルヒホッフの回折理論により説明が可能であり，二つの輝点が回折限界以下の距離で近接している場合には，一つの輝点として観測されることとなる．可視光よりも短い波長を実現する電子顕微鏡によって，200 nm以下の分解能は達成できるが，生体分子の動的な観察には不向きであるという欠点を抱えている．1990年代の中頃から広視野顕微鏡やレーザー走査顕微鏡といった光学顕微鏡を基にした，回折限界以下の空間分解能を実現する様々な手法が提案されるようになった．このような手法は「超解像顕微鏡法」とよばれ，可視光を用いた観察においても回折限界の10分の1程度まで空間分解能を向上させる手法も登場した．その結果，2014年のノーベル化学賞の対象となった．しかし，このような手法の多くは強い光を用いるため，測定中の試料への影響が深刻な問題となる．そのため，弱い光を用いても超解像度を実現する方法の開発が望まれる．

蛍光発光差分顕微鏡法 (FED: Fluorescence Emission Difference Microscopy) はSTEDに比べて分解能の向上度合いは劣るものの，比較的強度の弱いレーザーを使用するため，試料が劣化するリスクも低く，汎用性が高いという利点を持つ一方で，情報が欠落するという欠点もあり，現在も開発途上にある．そこで，本研究室で稼働している超解像顕微鏡を改

造し、FEDシステムを構築したところ、150 nm以下という空間分解能を達成することに成功した（これは理論限界である130 nmにほぼ匹敵している）。生体試料の一例として糸状性緑藻を用いた観測を行ったところ、画像解像度が向上していることも認められた。今後はソフトとハードの両面の改良を行うことにより背景蛍光の影響を抑え、画像のコントラストを向上させていくことを計画している。

3. 生体機能測定を目指した簡便なガスセンサーの開発（杉崎，南後）

生体組織がエネルギー生産を行う過程で必要とする酸素や二酸化炭素を、可能な限り非侵襲にリアルタイムで検出することは、細胞生物学や医療の分野において重要な課題となっている。例えばがん細胞はミトコンドリアが少ないため、酸素が少ない状態ではリンパ球による攻撃が弱体化する。そのため、高気圧酸素療法や酸素BOXなどを用いて酸素不足を改善し、がんの転移・浸潤能の亢進を抑制といった治療が行われている。また、二酸化炭素が体内に過剰に蓄積されたり、また逆に不足が生じたりした場合にはpHが正常値から外れ、生体の恒常性が崩れて様々な障害をおよぼすことが知られている。近年のパンデミックにより、簡単に循環器系における気体濃度を測定する手法の開発が必要とされている。このような状況を鑑み、昨年までの研究において、スペクトル分解法を利用した酸素センサーや、蛍光色素としてNile redを用いた二酸化炭素センサー等の開発を行ってきた。昨年までに開発を行ったセンサーは液体に近い状態であったために、実際に生体に適用しようとした場合に使用範囲が限定されるという問題があった。そのため本年は、生体に対して安全な材料でよりジェルに近い状態で機能するよう、センサーの改良を行った。ただし現在のところ、粘度と反応速度はトレードオフの関係がみられるため、その最適化条件を探っている。

教育・研究業績

学術論文

1. S. Seki, K. Yoshida, M. Sugisaki, N. Yamano, and R. Fujii, “Characterization of the ultraviolet-B absorption band of carotenoids using solvent-dependent shifts in steady-state and transient absorption spectra”, *J. Phys. Chem. B* **128**, 5623 (2024).

学会・研究会講演

1. 関 莊一郎, 吉田 和広, 杉崎 満, 藤井 律子, 「カロテノイドのUV-B吸収帯とはどんな状態か：定常吸収および時間分解吸収スペクトルの溶媒効果」, 第35回カロテノイド研究談話, 日本女子大, 2023年11月24日～25日.
2. M. Sugisaki, “Visualization and control of photosynthetic processes”, 1st NTHU Physics - NITEP kick-off meeting, Osaka, Japan, 2024年1月27日～29日.

学位論文

修士論文

1. 坂本 翼：「蛍光発光差分超解像度顕微鏡の構築と評価」.

研究助成金取得状況

1. 杉崎満：学術振興会・基盤研究C（代表）「無染色試料による超解像度顕微分光法の開発とそれを用いた細胞内光合成色素分布の追跡」130万円.
2. 杉崎満：学術振興会・基盤研究C（分担）「海洋性緑藻の集光蛋白質の再構成による新規カルボニルカロテノイドの消光機構の解明」7万円.
3. 杉崎満：株式会社カテラ，共同研究費「シリコーンゴムの高分子修飾に関する研究開発」165万円.

光エレクトロニクス物理研究室

鐘本勝一 教授

城戸美奈代 (M2)

堤 晴香 (M2)

村屋孝夫 (M1)

安田萌菜 (M1)

坂巻亜佳子 (B4)

樋口 敬 (B4)

研究概要

1. 量子ドットダイオードにおけるキャリアの分光計測 (城戸、鐘本)
近年量子ドットをLEDに応用した研究例が報告されている。そこではドット内に注入された電子と正孔が再結合反応し、発光に至るが、その電子と正孔の挙動を探った研究はほとんど報告されていない。電極から注入される正孔を分光計測する研究に取り組んだ。
2. 電気化学発光セルに対する時間分解電子スピン共鳴計測法の確立 (堤、鐘本)
電気化学発光セルにおける発光は電子と正孔の再結合により得られるが、中間状態として電子正孔対が発生するものの、その性質を調べることは難しい。ここでは、電子正孔対が時間とともに成長する様子を発光検出磁気共鳴法により検出することに取り組み、実際に成功した。
3. ペロブスカイト太陽電池における分光手法の開発 (村屋、鐘本)
ペロブスカイト太陽電池は近年最も注目されている太陽電池の一つで、世界中で研究競争が展開されている。ここでは、ペロブスカイト太陽電池中に発生する光キャリアを直接分光観測する実験系の構築に取り組んだ。
4. 強磁性電極を用いた発光セルへの磁気共鳴法の構築 (安田、鐘本)
強磁性電極ではスピンの偏極しており、そこからのキャリア注入が実現すると、LED内の再結合反応のスピン状態を操作できる。ここではその状態を探るための磁気共鳴による計測技術の開発に取り組んだ。

教育・研究業績

学術論文

1. K. Yasuji, T. Sakanoue, F. Yonekawa, K. Kanemoto, "Visualizing electroluminescence process in light-emitting electrochemical cells." *Nature Communications*, **14**, 992 (2023).
[Editor's Highlights](#)に選出. プレスリリース: 日刊工業新聞にて掲載「大阪公立大など、有機EL「再結合」過程観測に成功 発光効率の低下要因究明へ」
2. K. Iwamitsu, H. Kumazoe, K. Kanemoto, I. Akai, ""Comprehensive spectral decomposition analysis of gate modulation spectra measured in a pentacene organic field-effect transistor by Bayesian spectroscopy", *Journal of Applied Physics*, **134**, 095501 (2023).

特許

1. 国内特許： 発明者：鐘本勝一、発明の名称「半導体素子の観測装置、半導体素子の観測方法」、出願番号：特願2023-116309、出願日：2023年7月14日

招待講演

1. K. Kanemoto, The 22nd International Discussion & Conference on Nano Interface Controlled

Electronic Devices (IDC-NICE 2023), Oct. 11~13, 2023 Osaka, Japan.

2. K. Kanemoto, The 30th International Display Workshops (IDW '23) December 6 - 8, 2023, TOKI MESSE Niigata Convention Center, Dec. 6-8, 2023 Niigata, Japan.

研究助成金取得状況

1. 鐘本勝一（代表）：学術振興会・基盤研究(B)「スピン流伝播に関する直接計測法の開発とその学理の総合的発展」250万円
2. 鐘本勝一（代表）：企業（名称非開示）との共同研究「量子ドットを用いた自発発光素子の評価手法に関する研究」50万円（2023 10月より半年分：以後も継続）
3. 堤 晴香（代表）：湯川記念財団望月基金国際会議派遣支援 14万円

学位論文

修士論文

1. 堤 晴香：「電子正孔対の検出による有機EL素子の動的過程解明に向けた電子スピン共鳴法の確立」

受賞

1. 堤 晴香: 第62回電子スピンサイエンス学会にて優秀発表賞（口頭発表）を受賞

光物性研究室

溝口幸司 教授	宮永麟太郎(D2)	尾田竜太郎(M1)	赤松陸 (B4)
河相武利 准教授	伊吹駿 (M2)	加藤大智 (M1)	有馬幹 (B4)
大島悟郎 准教授	梶原大渡 (M2)	竹内舜弥 (M1)	川中優弥(B4)
	蒲田将行 (M2)	古谷順都 (M1)	中野絢介(B4)
	亀阪紀人 (M2)	松岡礼子 (M1)	増田雄大(B4)
	仲田壮 (M2)	松本栄希 (M1)	
	宮本隆将 (M2)		

研究概要

1. 開放量子系における結合ダイナミクスの実験研究 (宮永、松本、大島、溝口)

半導体層を含む共振器層を多層膜反射鏡(分布ブラッグ反射鏡)で挟んだ構造をしている半導体微小共振器は、共振器層内に光を閉じ込めることができる。この時、共振器層内の半導体中の励起子と光子が相互作用し、共振器ポラリトンと呼ばれる励起子と光子の混成状態が形成される。本研究では、CuCl半導体微小共振器において、定常状態の透過スペクトル、および、時間分解透過率変化を測定し比較することで、半導体微小共振器中の共振器ポラリトンのダイナミクスの起源を明らかにすることを目的に研究を行なった。

2. 現象論的有効リウヴィリアンによるn型GaAs中における縦光学フォノン-プラズモン間の結合状態に関する研究 (仲田、大島、溝口)

近年、緩和速度が大きい準粒子と緩和速度が小さい準粒子との結合状態の解明が話題となっている。本研究では、光励起された半導体中に生じる緩和速度が大きいプラズモンと、緩和速度が小さい縦光学(LO)フォノンとの間で生じる結合状態を明らかにすることを目的に研究を行なった。結合モードのピーク振動数と半値幅の励起光密度依存性が、現象論的有効リウヴィリアンの複素固有値を用いることで、再現できることを見出した。また、現象論的有効リウヴィリアンによる結合モード(LOPCモード)の励起光密度依存性の計算結果から、本研究で測定したn型GaAs半導体におけるコヒーレントLOフォノンとプラズモンとの間の結合は強結合状態にあることを明らかにした。

3. トポロジカル絶縁体試料の光学特性の研究 (宮本、溝口)

トポロジカル絶縁体は、その結晶内部では絶縁体的特性を有し、表面層では金属的特性を呈している。このトポロジカル絶縁体の表面層に存在するディラック電子は、波数に対して線形なエネルギー分散を有しており、また、スピン偏極の方向が運動量の方向に対して直交しているという性質(スピン-運動量ロック)を持っている。今まで、多結晶粒から構成されているトポロジカル絶縁体薄膜においてディラック電子の光学特性について調べられており、その結果、光励起されたディラック電子の緩和時間は約10fsと非常に早いと報告されている。本研究では、この早い緩和時間の原因を探るため、トポロジカル絶縁体単結晶を作製し、ディラック電子の緩和時間およびキャリア数の結晶軸依存性を明らかにすることを目的に研究を行なった。研究の結果は、ディラック電子の光励起による遷移確率は試料表面の対称性に関係していることを明らかにした。一方で、光励起されたディラック電子の緩和時間は結晶軸に依存せず、非常に早いことがわかった。

4. アルカリハライド結晶中における不純物センター間のエネルギー移動の研究(尾田、河相)

アルカリハライドは遠赤外領域から真空紫外領域まで透明であり、不純物イオン間のエネルギー移動を調べるのに適したホスト結晶である。NaCl結晶に、希土類イオンであるCe³⁺イオンとハロゲンイオンであるI⁻イオンを共ドーピングし、I⁻イオンからCe³⁺イオンへのエネルギー移動の研究を行なった。I⁻イオンに起因した吸収バンドを光励起して、Ce³⁺イ

オンに起因した発光バンドの時間応答を調べたところ、200K~240K付近の温度で顕著な立ち上がりの遅れが観測された。その立ち上がりの遅れを、 V_K センターのホッピングによるエネルギー移動が起こっているとして議論した。

5. 貴金属ヨウ化物結晶の光学特性の研究 (加藤、赤松、増田、河相)

CuClを代表として貴金属ハライドは特徴ある励起子遷移を示すことから、光物性分野では盛んに研究されている。貴金属ハライドの中でも、AgIやCuIのヨウ化物結晶の研究はさほど多くない。CuIやAgIの励起子の量子サイズ効果を調べる目的で、AgIやCuIを微量添加しKI結晶に適当な熱処理を施して、光学特性を測定した。その結果、励起子に起因した吸収や共鳴発光が大きくブルーシフトして観測され、量子サイズ効果に基づいて議論した。

6. 励起子分子に内在する周波数・スピン量子もつれの研究 (竹内、中野、溝口、大島)

昨年開発した周波数領域における密度行列を定量化する分光手法(周波数領域・密度行列分光(DMS))を用い、半導体CuCl単結晶中における励起子分子に内在する周波数量子もつれの研究を行った。二光子吸収過程を利用して励起子分子の2周波数に限定した密度行列を測定し、その結果、励起子分子を形成する2つの励起子が周波数(エネルギー)の量子もつれ状態であることを初めて明らかにした。また量子もつれの度合いを表すTangleを算出しその詳細を議論した。

7. 半導体ナノ薄膜及び微小共振器における励起子ポラリトン状態の複素スペクトルに関する研究 (鎌田、宮永、溝口、大島)

近年発展が顕著である非エルミート量子力学の研究では、量子状態の光学スペクトルにおいて従来の強度スペクトルのみならず、位相の情報も含んだ複素スペクトルを用いるとその詳細を議論するのに有用であることが理論的に明らかになりつつある。我々は、半導体CuClにおけるナノ薄膜及び微小共振器構造において現れる励起子(共振器)ポラリトン状態についての複素スペクトルに着目し、実験的にこれを得ることを目的とした。実験では、CuClの励起子共鳴付近、波長400nm帯のフェムト秒超短パルスを用い、光の位相スペクトルを精度良く測定するスペクトル干渉計を新たに構築しこれを用いた。実験の結果、共鳴付近に現れる2種類のポラリトンにおける位相変化を明確に捉えることに成功した。また特に微小共振器においては、共振器ポラリトンの弱結合と強結合の2つの結合状態間の変化を位相スペクトルで初めて測定した。

8. 密度行列分光法を用いたGaAs量子井戸における励起子量子コヒーレンスに関する研究 (亀阪、古谷、溝口、大島)

本研究では、GaAsの多重量子井戸における2つの励起子状態、重い正孔励起子と軽い正孔励起子の量子的重ね合わせとそのダイナミクスに着目した。我々はPump-Probe型の周波数領域・密度行列分光を用い、超短光パルスで生成した2つの励起子の密度行列を直接測定し、その時間変化を得ることに成功した。また、密度行列の非対角項の値から状態の量子コヒーレンスのダイナミクスを議論した。

教育・研究業績

学術論文

- ◎ S. Ibuki and T. Kawai: "Excitonic feature in CsAg₂I₃ crystals prepared by Bridgman method", J. Appl. Phys. **63** (2024) art.035504(5). (Published 21 March 2024)
- ◎ T. Kawai, A. Iguchi, and K. Yuasa: "Relaxation processes among adiabatic potential energy surfaces of Tl^+ and Au^- centers in NaCl crystals", Journal of Luminescence, **266** (2024) art.120330(12). (Published February 2024)

著書

- ・大島悟郎 (分担執筆 P107-116), 「量子生命科学ハンドブック」, エヌ・ティー・エス

学会・研究会講演

1. [招待講演]大島悟郎:「密度行列分光法～量子トモグラフィを利用した新しい分光手法～」強光子場科学研究懇談会 2023年度第3回懇談会, 大阪公立大学
2. R. Miyanaga, G. Oohata, S. Tanaka, and K. Mizoguchi: "The incident-angle dependence of microcavities spectral profiles in CuCl", Physics of Open Systems and Beyond (POS&BYD), Hokkaido Univ.
3. 尾崎翔太, 大島悟郎, 溝口幸司:「励起子分子から生成された光子・励起子様ポラリトン間の偏光-スピン量子もつれとその緩和の測定」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学
4. 宮永麟太郎, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司:「CuCl半導体微小共振器における共振器ポラリトンの干渉測定」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学
5. 亀阪紀人, 大島悟郎, 溝口幸司:密度行列分光法による半導体量子井戸中の励起子量子コヒーレンスの解析」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学
6. 鎌田将行, 大島悟郎, 宮永麟太郎, 溝口幸司:「CuCl中の励起子ポラリトンに対する複素スペクトル測定」, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学
7. 亀阪紀人, 大島悟郎, 溝口幸司:「密度行列分光法を用いたGaAs/AlAs量子井戸における励起子量子コヒーレンスの解析」, 第34回光物性研究会, 大阪大学
8. 宮本隆将, 溝口幸司:「Bi₂Te₃トポロジカル絶縁体結晶の光学特性」, 第34回光物性研究会, 大阪大学
9. 仲田壮, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司:「現象論的有効リウヴィリアンを用いた n 型 GaAs における縦光学フォノン-プラズモン結合モードの解析」, 第34回光物性研究会, IA-15
10. 宮永麟太郎, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司:「半導体微小共振器における共振器ポラリトンの位相測定」, 第34回光物性研究会, 大阪大学
11. 伊吹駿、河相武利:「Ag⁺イオンを含む三元化合物結晶CsAg₂I₃の光学特性の研究」 UVSOR シンポジウム2023, 岡崎コンファレンスセンター
12. [招待講演] 大島悟郎:「密度行列分光法 ～量子もつれ, 量子コヒーレンスを定量化する新しい分光法～」, レーザー学会学術講演会第44回年次大会(シンポジウム), 日本科学未来館
13. 宮永麟太郎, 鎌田将行, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司:「CuCl半導体微小共振器における共振器ポラリトンの干渉測定II」, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催
14. 仲田 壮, 大島悟郎, 田中 智, 溝口幸司:「現象論的有効リウヴィリアンによるn型GaAs中の縦光学フォノンとプラズモン間の結合状態の実験研究」, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催
15. 竹内舜弥, 森尾 東, 大島悟郎, 溝口幸司:「励起子分子の二光子吸収過程における周波数量子もつれ II」, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催
16. 宮本隆将, 溝口幸司:「Bi₂Te₃トポロジカル絶縁体結晶における磁気光学Kerr信号の結晶軸依存性」, 日本物理学会2024年春季大会, オンライン開催

学位論文

修士論文

1. 伊吹 駿:「Ag⁺イオンをドーピングした三元化合物結晶のCsAg₂I₃, Cs₂AgI₃の光学特性」
2. 梶原大渡:「セル法で作製したAgI 薄膜の光学特性の評価」
3. 鎌田 将行:「CuCl微小共振器及びナノ薄膜における励起子ポラリトンに対する複素スペクトルの研究」
4. 亀阪 紀人:「密度行列分光法を用いたGaAs量子井戸における励起子量子コヒーレンスとその緩和に関する研究」
5. 仲田 壮:「現象論的有効リウヴィリアンによるn型GaAs中における縦光学フォノン-プラ

ズモン間の結合状態に関する研究」

6. 宮本 隆将：「磁気光学Kerr効果測定を用いた Bi_2Te_3 トポロジカル絶縁体結晶中のディラック電子の光学特性」

研究助成金取得状況

1. 大島悟郎（代表），溝口幸司（分担）：学術振興会・基盤研究(B)「密度行列分光による量子もつれ物性とそのダイナミクスの研究」208万円

その他

1. 溝口幸司：日本学術振興会・産学協力研究委員会「テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会」(運営幹事)
2. 溝口幸司：第34回光物性研究会(2023)(組織委員)
3. 大島悟郎：日本物理学会 男女共同参画推進委員会（委員）
4. 河相武利：令和5年度「堺科学教育フェスタ（2023/7/8開催）」での実演

レーザー量子物理学研究室

井上 慎 教授 米田 光佑(M2) 高橋 幹多(B4)
堀越 宗一 准教授 柳本 歩夢(B4)
加藤 宏平 特任助教 和佐 尚澄(B4)

研究概要

1. 極低温Dy原子気体を用いた人工原子核実現への挑戦（堀越、加藤、井上、板垣(原子核理論研究室)、堀内(原子核理論研究室)

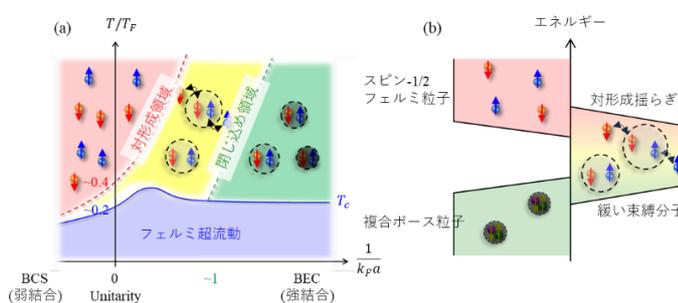
2023年10月にJST-ERATO「関口三体核カプロジェクト」が採択され、堀越がOMU内で冷却原子実験グループを組織し、極低温Dy原子気体を用いた人工原子核の実現に向けた研究プロジェクトが発足した。本ERATOにおける冷却原子実験グループの位置付けは、①量子多体精密計算グループへのベンチマークデータの提供、②核物性の創発メカニズムの解明である。人工原子核とは制御性の良い冷却原子系で実現される原子核内の核子系と非常に近い量子系を意味する。本研究では核子と同じフェルミ粒子で且つ、磁気モーメントを有するジスプロシウム(Dy)原子を、調和ポテンシャルに確定個数を用意する事で、原子核の殻モデルと非常に近い量子系を実現する。目標とする粒子数制御は1~20個を最低目標、100個までを挑戦的目標としている。

我々は人工原子核を実現するため、2024年度のDy原子レーザー冷却達成を計画としている。Dy原子をレーザー冷却するためには、固体のDy原子を真空中のオープンで1100°Cに加熱し、気化させるところから始まる。またレーザー冷却には421nmと626nmのレーザー光源が必要になる。今年度はこの蒸発オープン、626nmのレーザー光を発生させるためのレーザー光源及び波長変換用の非線形結晶、そしてレーザー光源の開発を行う光学防振台の準備を整え、421nmレーザー光源の手配を済ませた。さらに本プロジェクトは冷却原子物理と原子核物理の連携が必須であるため、今年度はレーザー量子物理学研究室と原子核理論研究室の合同勉強会を4回開催した。本プロジェクトに関する外部発表は1件行った[学会・研究会講演[2]]。

2. BCS-BECクロスオーバーにおける等温圧縮率の測定と分子間相互作用（米田、堀越）

冷却フェルミ原子系で実現されるs波相互作用しているスピン1/2フェルミ粒子系は、その相互作用パラメータである散乱長 a の大きさと温度 T に依存し、フェルミ粒子として振舞う多体系から、2原子分子となり複合ボース粒子として振舞う多体系へと連続的につながっている(図(a))。この相図は基本粒子が複合粒子に変化する階層構造(図(b))とみなすことができる。冷却原子系は散乱長と温度を制御できるため、構成粒子間の相互作用からどのように複合粒子間の相互作用が発現するのか研究する上で理想的なプラットフォームとなっている。

我々は、複合ボース粒子がボース凝縮(フェルミ超流動)に至る温度での等温圧縮率の値が、多体中における実効的な分子間相互作用で与えられる事から、図(a)の緑と青の境界に



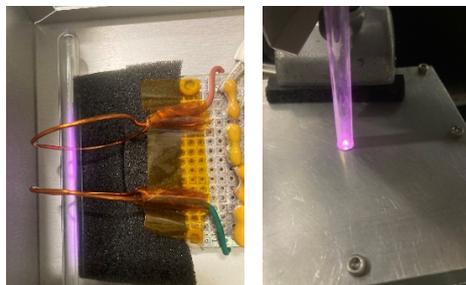
おける等温圧縮率の測定を進めている。昨年度は、散乱長が無限に発散しているユニタリー極限での温度に依存した等温圧縮率を極低温6Li原子気体を用いて測定したが、先行研究と一致しない測定結果となった。今年度はその原因を究明するため、観測系の見直しを行った。具体的には、飽和強度と吸収断面積を再評価するため、原子の密度分布測定に用いるプローブレーザー光の散乱レートを、原子が光子から受け取った運動量を直接測定する新しい方法を導入した。飽和強度と吸収断面積の再評価結果としては、今回の新しい手法と前回までの手法ではほぼ同じ値が得られることを確認した。これにより観測系の定量性は担保された。しかし、依然としてユニタリー極限での等温圧縮率は先行研究と異なる温度依存性を示している。今後、冷却原子を閉じ込めているトラップ形状の依存性に着目し調査を継続する。本研究は米田の修士論文にまとめられた。外部発表は1件行った[学会・研究会講演[1]]。

3. ヘリウム原子気体のレーザー冷却へ向けた細い管中での低圧ヘリウム気体の放電(和佐、堀越、加藤、井上)

ヘリウム3原子の原子核は、3つの核子から成る単純な核子系で且つ、核スピン1/2を持つ事から、加速器実験では多体核力を測定するためのビーム標的として用いられている。スピンに依存した核力を測定する際、核スピンの偏極度が重要になる。光トラップ中の冷却原子のスピン偏極は自由に制御でき、さらに真空中に冷却原子を用意できる。そこで我々はヘリウム3原子をレーザー冷却し光トラップ中に用意できれば、核力を測定する加速器実験の理想的な標的になるのではないかと考えている。

ヘリウム3原子をレーザー冷却するためには、ヘリウム気体を1Torr程度の低圧環境で放電させ、準安定状態に励起する必要がある。放電には電子銃を用いる方法、RF(ラジオ周波数)放電、MW(マイクロ波)放電の方法がある。RF放電とMW放電が準安定状態を高効率で生成できる手法である事は知られているが、どちらがレーザー冷却の実験に適しているか比較されている先行研究はない。そこで我々はヘリウム原子を扱っている超低温物理学研究室にヘリウム4原子気体を分けて頂き、rf放電とMW放電の比較を行った。

左図が1Torrのヘリウム気体をRF放電した様子、右図がMW放電した様子である。さらに低圧のヘリウム気体を用意したところ、およそ0.1mTorrの低圧においても両手法で放電が確認された。放電時の蛍光を分光器で観測したところ、スペクトル形状が気体の圧力と放電時の電場強度に依存する事が判った。しかしRF放電とMW放電では同様のスペクトル形状を示し、大差ないことが判った。しかし2.4GHzでMW放電させる場合約10cm×10cmのマイクロ波共振器が必要であり、レーザー冷却実験との相性面では良くないことが判った。今後はレーザー冷却可能な準安定状態効率が最大になる気体の圧力と放電パワーの最適化を、直接準安定状態を観測する吸収分光の手法を用い進めていく。本研究は和佐の卒業研究によって進められた。

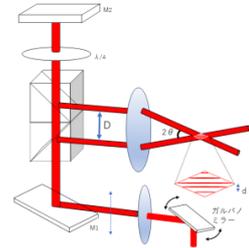


4. ボース凝縮体閉じ込めのためのアコーディオン光トラップの開発 (高橋、加藤、堀越、井上)

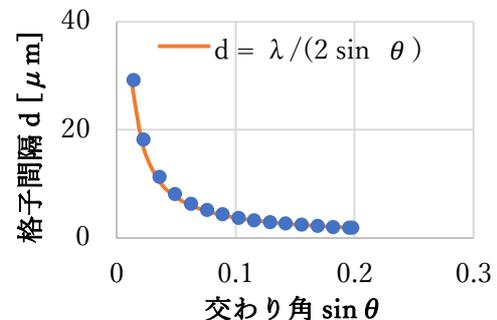
系を非秩序状態から秩序状態へ「クエンチ」させた時の秩序形成のダイナミクスは、基礎物理から応用物理まで広い範囲に渡る非平衡物理の重要な課題である。我々は混合ボース凝縮体の相分離過程の観測を通じて、秩序化過程に現われると予想される普遍的なスケールリング則を明らかにすることを目指している。閉じ込めポテンシャルの影響を最小限にし、相分離過程を精密に観測するには従来用いられてきた調和型トラップではなく、凝縮体の密度が一樣になる箱型トラップにボース凝縮体を閉じ込める必要がある。箱型トラップの実装は斥力光ポテンシャルを用いて、凝縮体を光の無い領域に閉じ込める事で達成す

る。特に鉛直方向の閉じ込めについては相分離過程を観測面に制限し、観測を容易にする為に、1次元光格子の節によって作られる薄い1層に閉じ込める方法を取った。ボース凝縮体全てを1層に閉じ込める為には、光格子の格子間隔を動的に変化させるアコーディオン光トラップが有効である。

アコーディオン光トラップは右図に示す様に、偏光ビームスプリッタとガルバノミラーを用いて間隔可変の平行ビームを作成し、集光レンズによって原子位置において角度可変の2本のビームを干渉させることによって実装することに決定した。格子間隔の可変範囲はボース凝縮体のサイズとその後の実験を考慮して、2-18 μm を目標とする。実際に光学系を組み可変範囲を確認したところ、格子間隔の最大値は偏光ビームスプリッタの端面から有効領域までの距離によって主に制限され、一方最小値は集光レンズの球面収差や入射する平行ビームの平行からのずれによって生じる焦点面での横収差が主に制限されることが分かった。まず最大値に関しては偏光ビームスプリッタを1辺25mm、有効開口80%のものから、1辺12.7mm、有効開口90%のものに変更することで改善を行った。また、最小値に関しては、まずアライメント方法の改善により平行ビーム間の角度を0.1mrad以下に抑えることに成功した。また、光線追跡と横収差の実測から、集光レンズをダブルレットレンズから非球面レンズに変更することで、球面収差による横収差をビーム径以下に抑えることができる事が分かった。

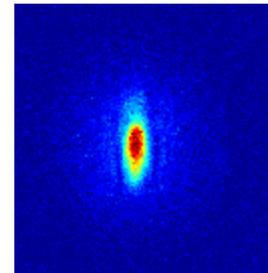


以上の改善策を元に実際に格子間隔の可変範囲をイメージング画像のフィッティングから実測したところ（右図）、1.9-27 μm の範囲で格子間隔を変化させることが可能であることが分かった。今後は動的に変化させたときの振動やそれによる凝縮体の加熱が無いかな等を検証していくことになる。本研究は高橋の卒業研究として進められた。



5. 混合ボース凝縮体生成装置の開発（加藤、井上）

昨年度に引き続き混合ボース凝縮体生成装置の開発を行った。第一段階のレーザー冷却である定常磁気光学トラップは、昨年度までに完了していたので、続いて暗スポット磁気光学トラップを行うことでより原子密度を向上させ、さらなる冷却を実現した。続いて、磁気輸送を行い、ほとんど原子数の損失なく磁気トラップ領域に原子を輸送することに成功した。続いて磁気トラップを四重極磁場トラップQUIC磁場トラップに変形させ、蒸発冷却を行った。蒸発冷却により原子数 2×10^5 個のRbボース凝縮体を生成することに成功した（右図）。一方で蒸発冷却の効率は従来よりも低い効率となった。これは磁気トラップの熱設計の不備により、想定よりもトラップ強さを上げることができなかったことによる。磁気トラップをQUIC磁場トラップからプラグ型磁場トラップへと変更することにより、これは大きく改善されると考えられる為、今後はプラグ型磁場トラップの開発を行うことになる。また、光トラップへの導入も行う。



教育・研究業績

学術論文

1. J. Kobayashi and S. Inouye: "Stability Test of Electron to Proton Mass Ratio Using Ultracold Molecules", The Review of Laser Engineering, 51, 517 (2023).

学会・研究会講演

1. 米田光佑, 加藤宏平, 井上慎, 堀越宗一: 「吸収撮像法における実効吸収断面積と飽和光強度の評価」日本物理学会第78回年次大会 2023年9月17日、東北大学川内キャンパス
2. 堀越, “C班: 冷却原子実験班”, ERATO 三体核力プロジェクト紹介の会, 2023/11/23 (理化学研究所)
3. Shin Inouye: " Measurement of the Variation of Electron-to-Proton Mass Ratio Using Ultracold Molecules Produced from Laser-Cooled Atoms" 1st NTHU-OMU Physics Meeting, Osaka, Japan, Jan. 28, 2024

学位論文

修士論文

1. 米田 光佑: 「冷却フェルミ原子気体を用いた強相関フェルミ粒子系の等温圧縮率の実験的決定」

研究助成金取得状況

1. 堀越宗一: 日本学術振興会・基盤研究(B)(代表)「FFLO超流動の直接観測と第一原理計算による探索」156万円

超低温物理学研究室

矢野英雄 教授
小原 顕 講師

西村 歩 (M2)
川村亮介 (M1)
桑平賢人 (B4)
前田竜誠 (B4)
長谷彰大 (B4)

研究概要

1. 超流動ヘリウム4 熱対向流による量子乱流生成：量子渦の直接検出（矢野、小原、川村、長谷）
超流動ヘリウム(^4He)の超流動成分と常流動成分の対向流は、臨界速度を超えると流路内に量子乱流を生成する。対向流による量子乱流の研究は数多く行われているが、対向流乱流の量子渦運動の研究はまだ少ない。我々は、狭い流路内で生成した対向流乱流から放出される量子渦輪を、流路外に設置した渦輪検出器で直接検出し、流れに対する量子渦の運動と量子乱流の空間変化を研究している。本研究では、流路外での量子乱流の空間変化を研究するために、検出器の感度向上を目指した。検出器として振動ワイヤを用いる。我々が開発したワイヤ引き抜き法は、ワイヤ質量を軽減し、表面を滑らかにすることで自身の振動による乱流生成を抑える。①ワイヤ直径と自身の振動による乱流生成臨界速度を調べた。ワイヤ直径が細いほど臨界速度が上がると予想していたが、太いワイヤで臨界速度上昇を見出した。これはワイヤ表面の滑らかさが関係すると考えられる。②細いワイヤでは、低温と室温の温度履歴がワイヤ性能を低下させることを見出した。この結果はワイヤの太さが安定性に影響することを示唆し、①の結果と合わせ、最適な太さが性能向上に欠かせないことを示している。
2. 熱対向流が生成する超流動ヘリウム4の量子乱流（矢野、小原、桑平）
前項で述べたように、超流動Heを閉じ込めた2つのバルク容器を細管でつなぎ、片側の容器に熱量を投入すると細管内に熱対向流が発生し、この熱量を更に大きくすると細管内に量子乱流が発生することは良く知られている。しかし、この量子乱流がどの向きに成長・拡散するか？という問題は、これまで誰も興味を持って調べたことがなかった。本実験では、2つのバルク容器内に第2音波共鳴を用いた渦糸検出器を設置し、どちらの容器がより低い投入熱量で量子乱流を検出するか？という問題に取り組んだ。測定の結果、ヒーターの設置されていない容器の方がより低い投入熱量で量子乱流を検出した。これは、超流動流の方向とは逆向きの方向に量子乱流が発生しやすいということを意味し、従来の渦糸モデルあるいは乱流からの渦輪放出の理解では説明できない現象である。
3. 超流動吸込渦の研究（矢野、小原、西村）
超流動ヘリウムを強制的に回転させたらどうなるだろうか？ 容器を一様回転させた場合、直線的な渦糸が等間隔で三角格子を組むのが最終状態であるということはわかっていた。我々は最近、超流動中で直接回転するタービンを開発し、このタービンを用いて吸込渦（風呂桶の栓を抜いたときにできる渦と同様）を生成することに成功した。液面の形状から、渦糸は直径2 mm程度の領域（コア）に集中していることがわかった。超音波を用いた循環測定では、コア中では直線渦糸換算で1平方ミリあたり数万本に相当する渦糸が存在することがわかった。さらに、第2音波（超流動中を伝播する温度の波で、渦糸があると減衰する）の減衰測定を加え、吸込渦のコアには螺旋状の渦糸が堆積していることが明らかになった。これは、粘性

流体でいえば、コア付近の渦度ベクトルが螺旋状に存在していることに対応する。じつは、粘性流体における吸込渦の構造もほとんど未解明である。超流動吸込渦の場合は第2音波を使って渦糸の局所平均密度（すなわち渦度）を計測できたため、粘性流体を含めた流体の吸込渦の構造を解明したことになる。さらに、固体水素微粒子を用いた量子渦の可視化実験を準備中である。

4. 噴水効果を用いた超流動吸込渦の生成実験（小原、矢野、前田）
前項で述べたタービン式の超流動吸込渦生成装置は、低速回転時に脱調しやすいこと、また、流れの定量化が困難であるという問題点があった。これを克服するため、本実験では噴水効果を用いて吸込渦を駆動する研究を開始した。噴水効果とは超流動特有の現象で、スーパーリーク（超流動のみが通過できる狭い流路）と細管を持つバルクチャンバーからなる装置に熱を入力すると、スーパーから超流動を吸込み、細管から超流動が吹き出す現象である。本実験ではまず投入熱量に対する噴水流量の校正を行った。次に、噴水効果の吸込みを吸込渦の吸込流とし、吹き出しを超流動の駆動トルクとして利用することで吸込渦を生成することに成功した。この方法は冒頭に述べたタービン式吸込渦生成装置の欠点を一挙に克服するものであり、今後の超流動吸込渦研究を発展させるものである。
5. 低温で動作する NMR 用プリアンプの制作（小原）
低温下のNMR測定、特に微小試料の場合には、ある微小信号が熱雑音に埋もれてしまうため、特別な技術が必要にある。本研究では低温で動作するバイポーラ・トランジスタと pHEMT を用いて、1 MHz 以上の周波数で入力インピーダンスが非常に大きく 10 倍以上の利得を得ることに成功した。本研究は新奇超伝導物質の評価を行う大阪大学の椋田グループ（物材研・西岡博士）への技術協力である。

教育・研究業績

国際会議講演

International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2023), Manchester University (9-15, Aug. 2023)

- (1) K. Obara: Structure of Superfluid Suction Vortex (Talk)
- (2) K.Obara: Diffusion of vortex tangle in a narrow tube due to thermal counter-flow (Poster)
- (3) K.Obara and H. Yano, Vortex emission from counter flow turbulence in superfluid helium 4 (Poster)

学会・研究会講演

日本物理学会 2023年春季大会（東北大学、2023年9月16日～19日）

- (1) 超流動吸込渦の渦度分布と吸込流
小原顕, 柿本直樹, 島村椎哉, 矢野英雄, 石川修六
- (2) 微量試料NMRを目指した極低温小型低ノイズアンプの開発
西岡颯太郎, 齋藤明子, 小原顕, 八島光晴, 椋田秀和

日本物理学会 2024年春季大会（オンライン、2023年3月14日～21日）

- (1) 熱対向乱流による細管中の量子乱流の異方的成長 II
小原顕, 吉坂颯紀, 桑平賢人, 矢野英雄
- (2) 噴水効果を用いた超流動ヘリウムの吸込渦
前田竜誠, 小原顕, 矢野英雄

学位論文
修士論文

研究助成金取得状況

1. 矢野英雄：日本学術振興会・科学研究費補助金 基盤研究（C）：「二流体流れ場における乱流の量子渦構造」（直接70万円、間接21万円）

その他

1. 石川、小原：低温工学・超電導学会関西支部基礎技術講習会（2023年9月11～13日）
2. 石川、矢野、小原：低温工学・超電導学会関西支部幹事

分子磁性研究室

細越裕子 教授	Miguel Pardo(D3)	村上清之輔(M1)
小野俊雄 准教授	飯田百佳(M2)	漁野晃大 (M1)
山口博則 准教授	築山陽菜(M2)	北川正 (B4)
	新井野修二郎(M2)	小森田一真 (B4)
	師田慧(M2)	島村樹 (B4)
	富永悠(M1)	東耕一馬 (B4)
	永井弘哉 (M1)	富井直 (B4)
	林伸行(M1)	山科任毅 (B4)

研究概要

1. 有機ラジカルによる新規磁性体の物質開発と量子磁気状態の解明（細越、新井野、林、小森田、富井、Pardo、小野）

軽元素から構成される有機ラジカル磁性体が顕著な量子効果を発現することに着目した新物質開発を行っている。ニトロニルニトロキシドの π 共役平面の二面角を制御し、 $S = 1/2$ の8倍周期鎖や、二次元磁気格子の合成に成功した。次近接相互作用による磁氣的競合を示唆する磁氣的挙動を観測した。ビスニトロキシドベンゼンが強い分子内強磁性相互作用によって $S = 1$ 種を形成することを利用して、 $S = 1$ の一次元および二次元磁気格子を合成し、低温磁気状態を考察した。

$S = 1/2$ 梯子鎖物質4-F-2-NN-BIPは、非磁性基底状態を示し、飽和磁場近傍で磁化が磁場に対して線形性を示す特異な磁気状態を示した。全磁場領域において、電子スピン共鳴実験、比熱測定を0.5 Kの極低温までを行い、量子磁気状態を考察した（国際会議講演4）。三角スピンを形成する有機トリラジカルについて、中性子線回折実験と μ SR測定を行い、弱磁場領域における磁気状態を微視的に考察した。

2. 微細加工熱伝導率測定プローブの開発と評価（小野、飯田、永井、漁野）

有機ラジカル磁性体の熱伝導率測定に向けて、微細加工技術を用いた熱伝導率測定プローブの開発を進めている。昨年度に行った単結晶磁性体を用いた本プローブの評価から、ヒーターや温度センサが成膜されているダイアフラムに存在する残留応力によって生じている座屈が、100 K以下の温度領域での測定値の再現性を悪化させる原因となっていることがわかった。そこで本年度はこのダイアフラムの材料を、これまで使用していた二酸化珪素/窒化シリコン多層膜から酸化タンタルへと変更したプローブの作成を行った。酸化タンタル薄膜はスパッタ法で成膜するが、成膜後の熱処理条件によって残留応力のある程度制御できる。この性質を利用してダイアフラムに座屈が起こらないような引張応力がはたらくような熱処理条件を探索したうえで制作したところ、平滑なダイアフラムをもつプローブが得られた。

3. ラジカル系錯体を用いた量子磁性体の開発（山口、築山、師田、富永、村上）

安定有機ラジカル的一种であるフェルダジルラジカル設計性と多様性を活用した量子磁性体の開発に取り組んだ。特に、配位子として設計したフェルダジルラジカルを3d遷移金属と組み合わせた錯体の合成に積極的に取り組んだ。新規Cu錯体では、スピン1/2の繋がりが八角形からなる2次元格子を形成した。量子モンテカルロ法を用いた数値解析を通して、八角形のトポロジーを反映した特異な量子物性の発現を実証した(論文1)。また、結晶学的に独立な2分子から成る新規Cu錯体では、磁気相関の競合を持つスピン1/2のハニカム格子の形成が示唆された。量子性を反映した特異な磁化曲線が、磁気相関

の競合に由来したものであることを実証した (論文2)。

教育・研究業績

学術論文

1. Satoshi Morota, Takanori Kida, Masayuki Hagiwara, Yasuyuki Shimura, Yoshiki Iwasaki, and Hironori Yamaguchi: “Magnetic properties of a spin- 1/2 octagonal lattice”, *Phys. Rev. B*, **109**, No.5, 054401/1-6 (2024).
2. Hironori Yamaguchi, Satoshi Morota, Takanori Kida, Seiya Shimono, Koji Araki, Yoshiki Iwasaki, Yuko Hosokoshi, and Masayuki Hagiwara: “Quantum gapped state in a spin-1/2 distorted honeycomb-based lattice with frustration”, *Phys. Rev. Mater.*, **7**, No.10, 104403/1-6 (2023).
3. Hironori Yamaguchi, Kazutoshi Shimamura, Yasuo Yoshida, Akira Matsuo, Koichi Kindo, Kiichi Nakano, Satoshi Morota, Yuko Hosokoshi, Takanori Kida, Yoshiki Iwasaki, Seiya Shimono, Koji Araki, and Masayuki Hagiwara: “Field-induced quantum phase in a frustrated zigzag-square lattice”, *Phys. Rev. Mater.*, **7**, No.9, L091401/1-5 (2023).
4. Y. Tominaga, A. Matsuo, K. Kindo, S. Shimono, K. Araki, Y. Iwasaki, Y. Hosokoshi, S. Noguchi, and H. Yamaguchi: “Mixed-spin two-dimensional lattice composed of spins 1/2 and 1 in a radical-Ni complex”, *Phys. Rev. B*, **108**, No.2, 024424/1-7 (2023).
5. H. Yamaguchi, Y. Tominaga, A. Matsuo, S. Morota, Y. Hosokoshi, M. Hagiwara, and K. Kindo: “Ladder-based two-dimensional spin model in a radical-Co complex”, *Phys. Rev. B*, **107**, No.17, 174422/1-8 (2023).
6. Satoshi Morota, Yoshiki Iwasaki, Masayuki Hagiwara, Yuko Hosokoshi, and Hironori Yamaguchi: “Magnetic Anisotropy in a Verdazyl-Based Complex with Cobalt(II)”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **92**, No.5, 054705/1-7 (2023).
7. M. Pardo-Sainz, A. Toshima, G. André, J. Basbus, G. J. Cuello, V. Laliena, T. Honda, T. Otomo, K. Inoue, Y. Hosokoshi, Y. Kousaka, and J. Campo, “New ($\alpha \beta \gamma$)-incommensurate magnetic phase discovered in the MnCr₂O₄ spinel at low temperatures”, *Phys. Rev. B*, **107**, No.14, 144401/1-14(2023)

国際会議講演

1. Yuko Hosokoshi: “Quantum spin states in frustrated magnets made of organic radicals”, The VIII International Conference on Superconductivity and Magnetism, 2023 年 5 月 6 日, Fethiye, Turkey [招待講演]
2. Yuko Hosokoshi, Hiroki Setogawa, Toshio Ono, Hiroyuki Nojiri: “Anomalous ground state on an $S = 1$ Shastry-Sutherland model formed by a novel organic biradical”, 26th IUPAC International Conference on Chemical Thermodynamics (ICCT2023), 2023 年 8 月 1 日, Senri Life Science Center, Osaka, Japan
3. Yuko Hosokoshi: “Designing of organic quantum magnets and quantum phenomena in magnetic fields”, 26th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2023), 2023 年 8 月 28 日, Melbourne, Australia [招待講演]
4. Miguel Pardo-Sainz, Toshio Ono, Ismael F. Diaz-Ortega, Takumi Kihara, Hiroyuki Nojiri, Yohei Kono, Toshiro Sakakibara, Hironori Yamaguchi, Yuko Hosokoshi and Javier Campo: “Quantum criticality and anomalous magnetization in a purely organic spin ladder” *ibid.*, 2023 年 8 月 28 日, Melbourne, Australia
5. Yuko Hosokoshi, Rei Otsuka, Yuma Kajimoto, Hiroki Setogawa, Toshio Ono, Hiroyuki Nojiri: “Novel magnetic states induced by competing interactions in organic radical crystals”, The 9th International Conference on Nitroxide Radicals (SPIN-2023), The 76th Yamada Conference, 2023 年 9 月 23 日, Yokohama, Japan
6. Yuko Hosokoshi: “Anomalous quantum states on two-dimensional frustrated lattice formed by organic radical crystals”, Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2023 (AC2MP 2023), 2023 年 11 月 28 日, Fullon Hotel Hualien, Taiwan [招待講演]
7. Yuko Hosokoshi: “Dielectric properties of weakly coupled spin-triangle”, 14th Japan-China Joint

学会・研究会講演

1. 細越裕子, 瀬戸川大喜, 小野俊雄, 野尻浩之: 「 $S=1$ 二次元有機フラストレート磁気格子の低温物性」第 17 回分子科学討論会 大阪大学豊中キャンパス 2023 年 9 月 15 日
2. 新井野修二郎, 小野俊雄, 野尻浩之, 細越裕子: 「有機ラジカルが形成する二次元磁気格子の物性」日本物理学会 第78回年次大会 東北大学川内キャンパス 2023年9月16日
3. 辻林実莉, 野口悟, 新井野修二郎, 細越裕子: 「2組の同軸型ピックアップコイルを用いたパルス強磁場磁化測定装置の開発」日本物理学会 第78回年次大会 東北大学川内キャンパス 2023年9月16日
4. 師田慧, 山口博則, 細越裕子, 岩崎義己, 萩原政幸: 「ラジカル系Co錯体における磁気異方性の検証」日本物理学会 第78回年次大会 東北大学川内キャンパス 2023年9月18日
5. 山口博則: 「有機ラジカル系を活用したスピン配列制御による量子現象の開拓」強磁場コラボラトリーセミナー オンライン開催 2023年9月29日
6. 新井野修二郎: 「低次元有機磁性体の物性」南部・アインシュタインセミナー 奥琵琶湖マキノパークホテル&セミナーハウス 2023年11月22日
7. 山口博則: 「量子系有機物質群が創り出す新規スピンモデルの強磁場物性」強磁場科学研究会強磁場研究における次世代ネットワーク形成とサイエンスの新展開 東北大学金属材料研究所 2023年12月7日
8. 辻林実莉, 野口悟, 新井野修二郎, 細越裕子: 「4-C1-2-NN-BIP の 40 T, 1.2 K におけるパルス強磁場磁化測定」日本物理学会 2024 年春季大会 オンライン開催 2024 年 3 月 18 日
9. 林伸行, 小野俊雄, 野尻浩之, 細越裕子: 「ニトロキシド系有機磁性体の構造と低温物性」日本物理学会 2024 年春季大会 オンライン開催 2024 年 3 月 18 日
10. 新井野修二郎, 小野俊雄, 野尻浩之, 細越裕子: 「ねじれた分子平面を持つ有機磁性体の低温物性」日本物理学会 2024年春季大会 オンライン開催 2024年3月20日

学位論文

修士論文

1. 飯田百佳: 「微細加工熱伝導率プローブの改良と $S=5/2$ 擬一次元反強磁性体の磁性」
2. 築山陽菜: 「フェルダジル系錯体の低温物性」
3. 新井野修二郎: 「ニトロニルニトロキシド結晶の低次元磁性」
4. 師田慧: 「フェルダジル系錯体におけるミックス型スピン系の磁気特性」

研究助成金取得状況

1. 小野俊雄: 学術振興会・基盤研究(C) 「量子スピンによる熱マネジメントに向けた微細熱流プローブの開発」104万円
2. 細越裕子: 学術振興会・基盤研究(B) 「有機ビラジカルを用いた $S=1$ 種の多彩な磁気格子形成と量子磁気状態の解明」572万円
3. 細越裕子: 学術振興会・挑戦的研究(萌芽) 「パイ電子スピンによる量子磁気熱伝搬」325万円
4. 細越裕子: 天野工業技術研究所・研究助成 「有機ラジカル共役 π 電子スピンを利用したマルチフェロイクスの高機能化」150万円

その他

1. Miguel Pardo: Young Scientist Award at the 26th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (IUCr 2023), 2023年8月29日

構造物性研究室

久保田 佳基 教授
石橋 広記 准教授

田中 将晴(M2)
西川 圭祐(M2)
宮川 昌之(M1)

天野 瑞穂(B4)
嘉納 智也(B4)
佐久間 駿(B4)
原 千紗都(B4)

研究概要

1. 多孔性配位高分子のガス吸着構造に関する研究 (久保田、田中、宮川、天野、佐久間)

多孔性配位高分子 (PCP: Porous Coordination Polymer) 優れたガス吸着能を持ち、これまで我々は放射光粉末回折法によりそのガス吸着状態の結晶構造解析を行ってきた。PCPが骨格構造を柔軟に変形しながらガス分子を取り込む機構は他の多孔性材料とは異なる特徴であり、静的な結晶構造を解明するだけでなく、ガス吸着ダイナミクス研究も重要と考えられる。

今年度は、相互貫入型骨格構造を持つ $\text{Cu}_2(\text{fum})_2\text{L}$ (fum = fumaric acid, L = bpa (1,2-bis(4-pyridyl)acetylene), bpbd (1,4-bis(4-pyridyl)butadiyne)) を対象として2種類のリガンドの違いによる吸着挙動の違いを実験的に調査した。これら2つの物質では、リガンド(L)の2つの六員環の結合部分の長さや三重結合の数が異なっている。この違いにより、 CO_2 吸着等温線の形が大きく異なることが明らかとなっていた。Sigmoid型とLangmuir型それぞれの吸着等温線を示すPCPのガス吸着に伴うエネルギー変化の関係が、理論研究により提案されている。その報告によれば、PCPのガス吸着は、骨格構造の変形エネルギー (E_{def}) とホスト-ゲスト間やゲスト-ゲスト間の相互作用エネルギー (E_{int}) の競合により、吸着後の系全体のエネルギー (E_{tot}) が吸着前のそれよりも下回る際に吸着が生じると考えられる。本研究では、放射光粉末回折法により $\text{Cu}_2(\text{fum})_2\text{L}$ (L = bpa, bpbd) のDegas相と CO_2 吸着相の結晶構造を決定し、得られた結晶構造から、 CO_2 吸着に伴う骨格構造の変形エネルギーの大小や、リガンドと吸着 CO_2 分子、リガンド同士、吸着 CO_2 分子同士の距離から相互作用の大小を推察し、骨格構造の柔軟性の違いが吸着等温線の形の違いに大きく関係することを実験的に示すことができた。また、 $\text{Cu}_2(\text{fum})_2(\text{bpa})$ のゲートオープン吸着挙動は、Ligand- CO_2 分子間相互作用と CO_2 - CO_2 分子間相互作用により誘起されることが示唆された。

2. 層状酸化物の酸素吸収・放出と結晶構造の相関に関する研究 (石橋、西川、嘉納、原)

マルチフェロイック物質として知られる六方晶マンガン酸化物 RMnO_3 (R = Y, Ho - Lu)は、 RO_6 多面体層と5配位の MnO_5 六面体層がc軸に沿って積層した層状構造をもつ。我々は、これまでに HoMnO_3 のTi置換体について、Ti置換量の増加にともなって六方晶から菱面体晶に結晶構造が変化することを明らかにしてきた。さらに、 HoMnO_3 のTi置換体の酸素吸収・放出の挙動に伴う結晶構造の変化について明らかにしてきた。

今年度は、 RMnO_3 のうち、Hoイオンよりもイオン半径の小さいR = Tm, YbについてTi置換体の相図の作成を行うとともに、それらの酸素吸収・放出挙動の有無、およびその挙動に伴う結晶構造の変化を放射光粉末回折により詳細に調べた。その結果、R = Hoとは異なり、R = Tm, YbのTi置換体はともにTi置換量を増加させても六方晶のままであることがわかった。また、六方晶の $\text{YbMn}_{0.7}\text{Ti}_{0.3}\text{O}_{3+\delta}$ について異なるガス雰囲気中で加熱することにより質量の変化をとらえ、酸素の吸収・放出の特性を示すことがわかった。さらに、金属イオンの価数を調べるためにYb, Mn, Tiの吸収端付近におけるX線吸収スペクトルの測定を行い、Ybは3価、Tiは4価であったが、Mnは酸素吸収・放出にともなって3価から少しシフトすることが分かった。また、高分解能放射光粉末回折データによる結晶構造解析により、Ybイオンがc軸方向に沿って大きく変位し、それが過剰酸素量 δ の大きさと相関があることを明らかにした。しかし、過剰酸素位置に関してはX線回折データから決定することが困難であるため、酸素の散乱能が大きい中性子回折実験を計画している。

教育・研究業績

学術論文

1. M. Shivanna, J. Zheng, K. G. Ray, S. Ito, H. Ashitani, Y. Kubota, S. Kawaguchi, V. Stavila, M. Yao, T. Fujikawa, K. Otake, and S. Kitagawa: “Selective sorption of oxygen and nitrous oxide by an electron donor-incorporated flexible coordination network”, *Commun. Chem.* **6**, 62, (2023).
2. B. Chen, J. Xu, W. Lai, C. Chang, J. Chen, J. Lee, J. Chen, H. Sheu, J. Lee, Y. Kubota, M. Chiang, Y. Kitagawa, Y. Chuang, and I. Hsu: “Structure determination and magnetic studies of triazole chelated Co(II) coordination polymers”, *J. Chinese Chem. Soc.* **70**, 1187-1199, (2023).
3. M. Yao, K. Otake, J. Zheng, M. Tsujimoto, Y. Gu, L. Zheng, P. Wang, S. Mohana, M. Bonneau, T. Koganezawa, T. Honma, H. Ashitani, S. Kawaguchi, Y. Kubota, and S. Kitagawa: “Integrated Soft Porosity and Electrical Properties of Conductive-on-Insulating Metal-Organic Framework Nanocrystals”, *Angew. Chem. Int. Ed.* **62**, e202303903, (2023).
4. H. Nakajima, K. Uchihashi, H. Tsukasaki, D. Morikawa, H. Tanaka, T. Furukawa, K. Kurushima, J. Yamasaki, H. Ishibashi, Y. Kubota, A. Sakuda, A. Hayashi, and S. Mori: “Nanoscale coexistence of polar-nonpolar domains underlying oxygen storage properties in $\text{Ho}(\text{Mn,Ti})\text{O}_{3+\delta}$ ”, *Phys. Rev. Research* **5**, 023203, (2023).
5. Y. Gu, J. Zheng, K. Otake, S. Sakaki, H. Ashitani, Y. Kubota, S. Kawaguchi, M. Yao, P. Wang, F. Li, and S. Kitagawa: “Soft corrugated channel with synergistic exclusive discrimination gating for CO_2 recognition in gas mixture”, *Nature Commun.* **14**, 4245, (2023).
6. H. Minamihara, K. Kusada, T. Yamamoto, T. Toriyama, Y. Murakami, S. Matsumura, L. Kumara, O. Sakata, S. Kawaguchi, Y. Kubota, O. Seo, S. Yasuno, and H. Kitagawa: “Continuous-Flow Chemical Synthesis for Sub-2 nm Ultra-Multielement Alloy Nanoparticles Consisting of Group IV to XV Elements”, *J. Am. Chem. Soc.* **145**, 17136-17142, (2023).
7. N. Nakamura, D. Wu, M. Mukoyoshi, K. Kusada, T. Toriyama, T. Yamamoto, S. Matsumura, Y. Murakami, S. Kawaguchi, Y. Kubota, and H. Kitagawa: “B2-structured indium–platinum group metal high-entropy intermetallic nanoparticles”, *Chem. Commun.* **59**, 9485-9488, (2023).
8. B. Huang, Y. Liu, H. Kobayashi, Z. Tan, T. Yamamoto, T. Toriyama, S. Matsumura, S. Kawaguchi, Y. Kubota, H. Zheng, and H. Kitagawa: “ $\text{Cu}_x\text{Ru}_{1-x}$ catalysts for carbon neutralization with CH_4 or CO production”, *Chem. Catalysis* **3**, 100705, (2023).
9. S. Mohana, K. Otake, S. Hiraide, T. Fujikawa, P. Wang, Y. Gu, H. Ashitani, S. Kawaguchi, Y. Kubota, M. Miyahara, and S. Kitagawa: “Crossover sorption of $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CO}_2$ and $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_4$ in soft porous coordination networks”, *Angew. Chem. Int. Ed.* **135**, e202308438, (2023).
10. J. Manabe, N. Sako, M. Ito, M. Fujibayashi, C. Kato, G. Cosquer, K. Inoue, K. Takahashi, T. Nakamura, T. Akutagawa, S. Shimono, H. Ishibashi, Y. Kubota, and S. Nishihara: “Irreversible Structural Phase Transition in $[(9\text{-tritylammonium})([18]\text{crown-6})][\text{Ni}(\text{dmit})_2]$: Origin and Effects on Electrical and Magnetic Properties”, *Eur. J. Inorg. Chem.* **26**, e202300449, (2023).
11. M. Yao, K. Otake, T. Koganezawa, M. Ogasawara, H. Asakawa, M. Tsujimoto, Z. Xue, Y. Li, N. C. Flanders, P. Wang, Y. Gu, T. Honma, S. Kawaguchi, Y. Kubota, and S. Kitagawa: “Growth Mechanisms and Anisotropic Softness Dependent Conductivity of Orientation-Controllable Metal–Organic Framework Nanofilms”, *PNAS* **120**, e2305125120, (2023).
12. S. Okazoe, K. Kusada, Y. Yoshida, M. Maesato, T. Yamamoto, T. Toriyama, S. Matsumura, S. Kawaguchi, Y. Kubota, Y. Nanba, S. M. Aspera, M. Koyama, and H. Kitagawa: “Molybdenum–Ruthenium–Carbon Solid-Solution Alloy Nanoparticles: Can They Be Pseudo-Technetium Carbide?”, *J. Am. Chem. Soc.* **145**, 24005-24011, (2023).
13. K. Matsui, N. Yoshikane, A. G. V. Terzidou, J. Arvanitidis, S. Kawaguchi, Y. Kubota, and K. Prassides: “Electron injection into superconducting trivalent fullerides close to the Mott transition boundary”, *Modern Phys. Lett. B* **38**, 2342001, (2024).
14. S. Hanabata, K. Kusada, T. Yamamoto, T. Toriyama, S. Matsumura, S. Kawaguchi, Y. Kubota, Y. Nishida, M. Haneda, and H. Kitagawa: “Denary High-Entropy Oxide Nanoparticles Synthesized

by a Continuous Supercritical Hydrothermal Flow Process”, J. Am. Chem. Soc. **146**, 181-186, (2024).

15. X. Zhou, M. Mukoyoshi, K. Kusada, T. Yamamoto, T. Toriyama, Y. Murakami, T. Ina, S. Kawaguchi, Y. Kubota, and H. Kitagawa: “RuIn Solid-Solution Alloy Nanoparticles with Enhanced Hydrogen Evolution Reaction Activity”, ACS Mater. Lett. **6**, 353-359, (2024).
16. M. Vrankić, T. Nakagawa, M. Menelaou, Y. Takabayashi, N. Yoshikane, K. Matsui, K. Kokubo, K. Kato, S. Kawaguchi-Imada, H. Kadobayashi, J. Arvanitidis, Y. Kubota, and K. Prassides: “On the structural and vibrational properties of the solid endohedral metallofullerene Li@C₆₀”, Inorganics **12**, 99, (2024).

国際会議発表

1. Y. Kubota, H. Ashitani, S. Kawaguchi, H. Furukawa, H. Ishibashi, Y. Yokoyama, M. Mizumaki, K. Otake, and S. Kitagawa: “Time-resolved *in-situ* X-ray diffraction of CO₂ adsorption on porous coordination polymer”, XXVI Congress of the International Union of Crystallography (IUCr2023), 2023年8月28-29日, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia.
2. K. Nishikawa, H. Ishibashi, H. Ashitani, S. Kawaguchi, and Y. Kubota: “Phase diagram and crystal structure analysis of pseudobinary oxides RMnO₃-R₂Ti₂O₇ (R = Dy, Ho, Er, Yb, Tm) by synchrotron powder X-ray diffraction measurements”, XXVI Congress of the International Union of Crystallography (IUCr2023), 2023年8月24-25日, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia.
3. H. Ishibashi, H. Masaki, S. Otani, K. Nishikawa, H. Ashitani, S. Kawaguchi, K. Tomiyasu, S. Mori, and Y. Kubota: “Crystal structure change and oxygen absorption/release behavior in layered oxides HoMn_{1-x}Ti_xO_{3+δ} by synchrotron powder diffraction”, XXVI Congress of the International Union of Crystallography (IUCr2023), 2023年8月24-25日, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia.
4. S. Shimono, H. Ishibashi, Y. Nagayoshi, H. Ikeno, S. Kawaguchi, M. Hagiwala, S. Torii, T. Kamiyama, K. Ichihashi, S. Nishihara, K. Inoue, Y. Ishii, and Y. Kubota: “Observation of structural phase transition in Co₃Sb₄O₆F₆ by multi-quantum beam”, XXVI Congress of the International Union of Crystallography (IUCr2023), 2023年8月24-25日, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia.

学会・研究会発表

1. 田中将晴, 河口彰吾, 石橋広記, 大竹研一, 北川進, 久保田佳基: 「多孔性配位高分子 Cu₂(fum)₂L(L=bpa,bpbd)のガス吸着構造解析」 日本結晶学会令和5年(2023年)度年会 2023年10月28日 宇部市文化会館・山口大学常盤キャンパス
2. 西川圭祐, 石橋広記, 芦谷拓嵩, 河口彰吾, 久保田佳基: 「層状酸化物Tm(Mn_{1-x}Ti_x)O_{3+δ}, Yb(Mn_{1-x}Ti_x)O_{3+δ}の結晶構造解析および酸素吸収・放出挙動」 日本結晶学会令和5年(2023年)度年会 2023年10月28日 宇部市文化会館・山口大学常盤キャンパス

学位論文

修士論文

1. 田中将晴: 「多孔性配位高分子の吸着等温線と結晶構造の相関」
2. 西川圭祐: 「層状酸化物RMn_{1-x}Ti_xO_{3+δ}(R = Dy - Yb)の酸素吸収・放出挙動と結晶構造」

研究助成金取得状況

1. 久保田佳基(分担): 学術振興会・基盤研究(A)「単分子誘電体が拓く未踏材料領域の探査」西原禎文 13万円
2. 久保田佳基(分担): 学術振興会・基盤研究(B)「不可逆ガス吸着過程をターゲットにしたミリ秒高精度粉末回折手法の開発」河口彰吾 130万円

熱電物性研究室

小菅厚子	准教授	今井大樹 (M2)	松尾 遼 (M1)
安藤美恵	技術スタッフ	岡明則 (M2)	竹内 久太 (B4)
青木理恵子	事務スタッフ	高尾 侑希 (M1)	森山 翔 (B4)

研究概要

本研究室では、物質科学、固体物理、半導体物性に立脚した新物質開発と、それらの機能の発現機構を明らかにするための物性研究を行っている。特に、熱と電気の相互作用を利用したエネルギー変換材料である熱電変換材料を対象に、構造と輸送特性の相関を探り、かつ高熱電性能化させるための研究を推進してきた。

1. ハイエントロピー熱電材料の作製とその物性測定（岡, 高尾, 松尾, 安藤, 小菅）
ニッケル基合金とカルコゲナイド系材料において、エンタルピー変化に対する配置エントロピーの変化を大きくすることで、対称性の高い結晶構造を安定化させることを狙ったハイエントロピー熱電材料を作製し、配置エントロピー、結晶構造、構造安定性、熱電特性の相関を明らかにする研究を行った。今年度は、昨年度作製した試料について、物性測定を行った。
2. ゲルマニウムテルライド系熱電材料のp/n極性の制御に向けて（今井, 森山, 小菅）
ゲルマニウムテルライド系熱電材料に存在すると考えられる欠陥構造に着目し、形成相, バンド構造, 熱電特性の関係について、実験及び第一原理計算を用いて明らかにすることを試みた。種々の実験結果より、今年度は、試料に存在する欠陥が原子空孔であると仮定し、解析を進めた。
3. 結晶/非晶の混相材料の作製とその構造（竹内, 安藤, 小菅）
ゲルマニウムテルライド系熱電材料の組成を変化させることで、X線回折パターンに結晶と非晶の混相構造の形成を示唆する結果が得られたことから、得られた構造の同定や、形成相の再現性を確認した。

教育・研究業績

学術論文や著書

1. “Strategies for Development of High Performance Thermoelectric Materials” (Chapter 1)
Takao Mori, Atsuko Kosuga, and Hiroyuki Akinaga
in “Thermoelectric Micro/Nano Generators ~Fundamental Physics, Materials and Measurements~”
(ISTE Science Publishing), 2023.
2. “Landscape of Thermoelectric Generators in Energy Harvesting Technologies” (Introduction)
Hiroyuki Akinaga, Atsuko Kosuga, and Takao Mori
in “Thermoelectric Micro/Nano Generators ~Challenges and Prospects~”
(ISTE Science Publishing), 2023.

学会誌・商業誌での書き物

1. 小菅厚子：「準安定相を利用した新規熱電材料の開発」
CSJ カレントレビュー（日本化学会），130-135, 2024.

国際会議講演

1. “Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Room Temperature GeTe-based Bulk Materials”
Ryosuke Hamamoto, Tomohiro Oku, Atsuko Kosuga
MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting, Kyoto, Japan, December 2023.
2. “Alloying Behavior and Thermoelectric Properties of Nickel-based High Entropy Alloys Prepared by Mechanical Alloying and Spark Plasma Sintering”
Akinori Oka and Atsuko Kosuga
MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting, Kyoto, Japan, December 2023.
3. “Toward the Elucidation of the Origin of N-type Conduction in GeBi₄Te₇ Homologous-based Thermoelectric Materials”
Daiki Imai, Atsuko Kosuga
MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting, Kyoto, Japan, December 2023.

学会・研究会講演

1. 今井大樹，船島洋紀，久保田佳基，小菅厚子：「GeSb₄Te₇-GeBi₄Te₇ 熱電材料の p/n 極性の起源の解明に向けて」，第 20 回日本熱電学会学術講演会, 2023 年 9 月.
2. 岡 明則，船島洋紀，小菅厚子:「メカニカルアロイニングによる Ni 基熱電合金のハイエントロピー化と形成相」，第 20 回日本熱電学会学術講演会, 2023 年 9 月.
3. 小菅厚子：「非熱平衡反応により作製した Ge-Sb-Te 系バルク材料の構造と室温熱電特性」
<招待講演>，応用物理春季学術講演会「エネルギーハーベスティングのフロンティア」，
2024 年 3 月.

研究助成金取得状況

1. 小菅厚子：公益財団法人高橋産業経済研究財団 研究助成 他2件

その他

- <地域貢献> 大阪公立大学市民セミナーでの講演，2023年11月.
- <地域貢献> 尼崎小田高校，大学訪問研修の講座講師，2023年12月.
- <書籍のeditor> “Thermoelectric Micro/Nano Generators 1” と “Thermoelectric Micro/Nano Generators 2” SCIENCE シリーズ (ISTE-Wiley), 2023年12月発刊.
- <学会のorganize> MRM/IUMRS-ICA2023, B-1 Symposium Organizer, 2023年12月開催.
- <学会等の委員> 日本熱電学会 理事/学会誌編集委員長
応用物理学会 機関紙企画・編集委員会 委員 など

以上