

研究室活動状況 2022 年度

研究室の活動状況を、以下順を追って報告する。記載されている項目は、次の通りである。

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

- 論文 (国内外の専門学術雑誌記載のオリジナルな研究論文)
- 国際会議報告集 (国際会議, 国際ワークショップ等のプロシーディング)
- 学会講演 (日本物理学会等の学会や, 国際会議での講演. 招待講演の場合はそのことが明記されている.)
- 著書, 訳書, 編集等 (著, 訳, 編の別が氏名の後に示されている. 訳書は邦訳の後に () 内に原著者名, 原著名が示されている.) 学会誌等 (商業誌等を含む) に発表された論文, 解説等. (研究所レポートや研究会報告は含んでいない.)
- 特許

素粒子理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 長基線ニュートリノ実験における地球密度不定性の影響 (安田)

これまでのニュートリノ振動に関する実験データにより、標準的な三世代間混合のパラメーターのほとんどが決定されてきている。現時点で未定量量は、質量パターン (Δm_{31}^2 が正か負か)、大気ニュートリノ振動の混合角 θ_{23} のオクタント (θ_{23} が $\pi/4$ より大きい小さいか)、CP 位相の値である。特に CP 位相の効果は、一番小さい混合角 θ_{13} に比例して小さいと考えられているため、統計誤差を小さくして $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率を精密に測定しなければならない。そのためには事象数を増やすような大強度加速器と巨大測定器が必要となる。その条件を満たすのが現在建設中である日本の T2HK 実験とアメリカの DUNE 実験であり、これらの実験により上述の未定量が決定されると期待されている。一方、これまでの解析では地球密度の不定性は考慮されて来なかったが、CP 位相を精度良く測定するには、地球物質密度の不定性が CP 位相の測定にどれだけ影響するかも考慮する必要が出てくる時代になってきた。特に基線長の長い DUNE 実験では、物質効果が大きく影響するため、地球密度不定性を考慮することが必要である。地球の物質密度の不定性については、地球物理の研究者 Geller-Hara (2001 年) によって、5%程度が妥当であると議論されているが、この研究では密度の不定性が悲観的な場合も含めて、0%、5%、10%の場合に CP 位相の測定値の精度について調べた。その結果、基線長の長い DUNE では、物質効果が比較的大きいため、無視出来ない効果が存在することがわかった。この研究はルジェルボスコヴィッチ研究所の Ghosh 氏との共同研究である。

2) 高エネルギーの物質中における (3+1)-スキームニュートリノ振動確率の解析的表式 (安田・加藤)

従来のニュートリノ振動に関する実験データのほとんどは標準的な三世代間混合の枠組みで記述されている一方、いくつかの実験結果は標準的なシナリオでは説明が出来ないことも指摘されている。その代表的な例が LSND 実験と MiniBooNE 実験のデータである。これらは $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 又は $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ のいわゆる出現チャンネルで 1 eV^2 以上の質量自乗差のニュートリノ振動があれば説明出来ることが知られている。これらをニュートリノ振動現象として解釈するためには、4種類以上のニュートリノの状態が必要となる。1990年代の LEP 実験の結果から、弱い相互作用をする軽いニュートリノの種類は3種類であることがわかっているため、4番目のニュートリノは弱い相互作用をしないステライルニュートリノと呼ばれる状態である必要がある。ステライルニュートリノが1種類存在する (3+1)-スキームと呼ばれるシナリオでは、上記の出現チャンネルのニュートリノ振動の確率には、 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ のいわゆる消失チャンネルによる否定的な結果により上限値が存在することが知られている。しかし、LSND 実験・MiniBooNE 実験の肯定的結果から推論される出現チャンネルの振動確率の値は、上述の上限値よりも大きいことから、(3+1)-スキームは現在では否定されつつある。いずれにしても、さらなる実験でステライルニュートリノが存在するのかどうかを検証することが必要であると考えられている。一方、 1 eV^2 程度の質量自乗差のステライルニュートリノ振動が存在する場合には、低エネルギー・短基線実験においてわずかなニュートリノ振動効果を測定するよりも、高エネルギーの大気ニュートリノや宇宙ニュートリノを観測する IceCube 実験等のニュートリノ望遠鏡施設で、物質効果により増幅されたニュートリノ振動を観測した方が有利であることが指摘されている。高エネルギーにおけるそのようなニュートリノ振動の増幅がどのチャンネルに現れるかを理解するには、振動確率を解析的に表すことが有用である。一般にステライルニュートリノが他の3種類のニュートリノと混合している場合、高エネルギー領域に限っても、物質中におけるニュートリノ振動の確率を解析的に表すことは難しいことが知られてい

る。2021年度のワン – 安田の仕事では、(3+1)-スキームで新たに現れる混合角 θ_{41} , θ_{42} , θ_{43} のうち、(i) $\theta_{41} \neq 0$, $\theta_{42} = \theta_{43} = 0$ の場合と (ii) $\theta_{41} = 0$, $\theta_{42} \neq 0$, $\theta_{43} \neq 0$ の場合に、それぞれ2種類間の混合の問題に帰着することが示され、解析的なニュートリノ振動確率の解析的表式が与えられている。この研究では、 $\theta_{41} \neq 0$, $\theta_{42} \neq 0$ の場合に、それぞれの混合角が小さいと仮定し、混合角に関する摂動論で解析的表式を与えた。その結果、ニュートリノモードでは $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ の混合角が増幅され、反ニュートリノモードでは $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_s$ の混合角が増幅されることがわかった。

3) 弦理論における量子効果による質量生成 (北澤)

素粒子の標準模型において、電弱対称性の自発的破れの動力学は未知である。これまでの場の量子論の枠内でのさまざまな努力は実を結んでおらず、それを含み、かつ超えた枠組みとしての弦理論の動力学に期待がかかる。弦理論における量子効果による質量生成について詳細な研究を行った。特に弦理論におけるスカラー場の2点関数について詳細に研究をおこなった。本来は散乱行列しか計算できない現状の弦理論の定式化においても、外線運動量を質量殻からずらした2点関数は、量子効果による質量補正を正しく与える可能性を指摘した。新しい技術として「部分モジュラー変換」をいうものを駆使して、それを示した。このようにして得られる量子効果による質量補正について、その2乗質量が負になるときに対称性の自発的破れが起きる。それが実現するための条件を見出すことが次の課題である。この研究は高エネルギー加速研究機構の磯暁氏と須山孝夫氏との共同研究である。

4) 宇宙の自然な「暖かいインフレーション」(北澤)

宇宙初期に起きたと信じられている加速度的な宇宙膨張は、あるスカラー場のポテンシャルエネルギーによるものと考えられている。観測によると、そのスカラー場の時間変化は極めて緩やかで、それを実現するポテンシャルエネルギー関数の自然な実現は極めて難しい問題である。スカラー場を擬南部ゴールドストーン場であると考えてこの問題を解決するアイデアは観測によって既に排除されたと考えられているが、「暖かいインフレーション」というシナリオにおいてはまだ可能性が残されていることを指摘した。

2. 研究業績

1) 論文

M. Ghosh, O. Yasuda, Effect of matter density in T2HK and DUNE, *Nuclear Physics* **B989** (2023) 116142.

Noriaki Kitazawa, Reionization process dependence of the ratio of CMB polarization power spectra at low-ell, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2205** (2022) 016.

2) 学会講演

国内研究会

● Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023, 2023年2月19-22日, サンプラザ天文館, 鹿児島市

安田修: Sterile neutrinos and non-standard interactions of neutrinos (招待講演)

● 研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学研究会, 2022年05月30日, 大阪大学核物理研究センター, オンライン同時開催

安田修：ニュートリノ振動研究の現状と研究用原子炉によるステライルニュートリノ探索の可能性 (招待講演)

国際会議

● 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22), 28 - 30 September 2022, Hida City, Gifu, Japan

O. Yasuda: Theoretical overview (invited talk)

● XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2022), 30 May - 4 June 2022, online conference

O. Yasuda: Synergy of HK & DUNE (invited talk)

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

The research of our Laboratory in the academic year 2022/2023 was devoted to theoretical studies of cosmological inflation in the early Universe, the primordial black hole formation and the induced gravitational waves, and the current dark matter composition, by using supergravity theory and string theory. Our research was based on our earlier research results in the theoretical model building of cosmological inflation and the primordial black hole formation in modified gravity and supergravity theory, which were derived by S.V. Ketov and his collaborators during the last few years. On the one side, we proposed the new models of primordial black hole formation by generalizing the so-called alpha-attractor models of cosmological inflation. This research was conducted by S.V. Ketov in collaboration with two Russian researchers (D. Frolovsky and S. Saburov). We adapted the known (Appleby-Battye-Starobinsky) model of modified F(R) gravity in order to describe the double cosmological inflation and the formation of primordial black holes with the masses up to 10^{19} g with a single scalar field. We found that it is possible to get an enhancement (peak) of the power spectrum of scalar curvature perturbations to the level beyond the Hawking (black hole evaporation) limit of 10^{15} g, so that the primordial black holes resulting from gravitational collapse of large primordial scalar perturbations can survive in the present universe and form part of cold dark matter. Our results agree with the current measurements of cosmic microwave background radiation but require fine-tuning of the parameters. We also proposed and investigated the new (generalized) E-type alpha-attractor models of inflation, in order to include formation of primordial black holes. In this case, the inflaton potential has a near-inflection point where slow-roll conditions are violated, thus leading to large scalar perturbations collapsing to primordial black holes later. An ultra-slow roll (short) phase exists between two (longer) phases of slow-roll inflation. We numerically investigated the phases of inflation, derived the power spectrum of scalar perturbations and calculated the masses of primordial black holes in those models. For certain values of the parameters, the asteroid-size primordial black holes can be formed with the masses of 10^{17} g to 10^{19} g, beyond the Hawking evaporation limit and in agreement with current cosmological observations. The gravitational waves induced by the primordial black hole formation may be detectable by the future space-based gravitational interferometers (LISA, DECIGO).

On the other side, we got new results in the theory of supergravity coupled to chiral matter. This line of research conducted by S.V. Ketov in collaboration with A. Addazi from China and Y. Aldabergenov from Thailand. We proposed a novel model of the modified (Starobinsky-like) old-minimal-type supergravity coupled to a chiral matter superfield, which simultaneously describes multi-field inflation, the primordial black hole formation, current dark matter, and spontaneous supersymmetry (SUSY) breaking after inflation in a Minkowski vacuum. The latter is a highly non-trivial result for the first time. The masses of primordial black holes in our supergravity model of double slow-roll inflation, with a short phase of ultra-slow-roll between two slow-roll phases, are close to 10^{18} g. We found a significant fraction of the primordial black holes in the observationally allowed mass window, and supplemented it by spontaneous supersymmetry breaking in the vacuum with the gravitino mass close to the scalaron (inflaton) mass M of the order 10^{13} GeV. Our supergravity model favors the composite nature of

the current dark matter as a mixture of primordial black holes and super-heavy gravitino particles as the lightest supersymmetric particles. The composite dark matter significantly relaxes fine-tuning needed for the whole scenario of the current dark matter. The fraction of primordial black holes in the current dark matter was derived, and the second-order gravitational wave background induced by the enhanced scalar perturbations was calculated. Those gravitational waves may also be accessible by the future space-based gravitational interferometers. Finally, the superstring-induced quantum gravity correction to the known Starobinsky inflationary model was investigated in detail, in the context of the so-called Starobinsky-Bel-Robinson modified gravity theory proposed by S.V. Ketov. Superstring/M-theory is the theory of quantum gravity that can provide the ultra-violet completion to viable inflation models beyond the Planck cut-off scale. This line of research was conducted by S.V. Ketov in collaboration with Russian researchers E.O. Pozdeeva and S. Yu.Vernov. We modified the well-known Starobinsky modified gravity by adding the Bel-Robinson tensor squared term and proposed it as the leading quantum gravity correction to the gravitational effective action inspired by superstring theory. Our model has only two parameters: the inflaton mass and the superstring-inspired positive parameter β . We derived the equations of motion in the Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker universe and investigate their solutions. We discovered the physical bounds on the value of the new quantum parameter by demanding the absence of ghosts and consistency of the inflationary observables in our model with the Planck satellite measurements of the cosmic microwave background radiation. We also investigated the physical properties of a Schwarzschild-type black hole in the framework of the Starobinsky-Bel-Robinson modified theory of gravity, working perturbatively in the new coupling constant. In particular, we computed the temperature, entropy, pressure and lifetime of a Schwarzschild-type black hole. This research was conducted by S.V. Ketov in collaboration with Ruben Campos Delgado in Germany.

2. 研究業績

1) 論文

D. Frolovsky, S. V. Ketov, S. Saburov, Formation of primordial black holes after Starobinsky inflation, *Modern Physics Letters A* 37 (2022), No. 21, 2250135, 9 pages (査察済)

S. V. Ketov, Starobinsky-Bel-Robinson gravity, *Universe* 8 (2022), No. 7, 351, 7 pages

Y. Aldabergenov, A. Addazi, S.V. Ketov, Inflation SUSY breaking and primordial black holes in modified supergravity coupled to chiral matter, *European Physical Journal C* 82 (2022), 681, 27 pages (査察済)

D. Frolovsky, S. V. Ketov, S. Saburov, E-models of inflation and primordial black holes, *Frontiers in Physics* 10 (2022), 1005333, 11 pages (査察済)

S. V. Ketov, E. O. Pozdeeva, S. Yu. Vernov, On the superstring-inspired quantum correction to the Starobinsky model of inflation, *Journal of Cosmology and Astrophysics* 12 (2022), 032, 24 pages (査察済)

S. V. Ketov, Ruben Campos Delgado, Schwarzschild-type black holes in Starobinsky-Bel-Robinson gravity, *Physics Letters B* 838 (2023) 137690, 4 pages (査察済)

2) 学会講演

国際会議

セルゲイ・ケトフ, Inflation and gravitational effective action from higher dimensions (invited talk),
International Workshop on the Standard Model and Beyond, 2022年8月28日-9月8日, Corfu, Greece

原子核ハドロン物理研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、自然界の力のうちの1つ「強い相互作用」をする粒子ハドロンを研究対象とし、エキゾチックな内部構造を持つと期待されるハドロンの研究を通じて、強い相互作用の非摂動的動力学を解明している。2022年度の研究室構成はスタッフ1名、大学院生5名、卒研究生2名である。

1) 高エネルギー衝突実験における D^-p 相関関数の測定

従来の散乱実験が困難であったハドロン対の相互作用を引き出す新たな手段として、高エネルギー衝突実験でのハドロン間相関関数を用いたフェムトスコーピーと呼ばれる手法が注目を集めている。高エネルギー重イオン衝突や、TeV領域の高多重度の陽子・陽子衝突など、終状態に多数のハドロンが生成される衝突実験において測定されるハドロン対の運動量相関は、理論的には放出源の形状を記述するソース関数と、ハドロン対の相互作用を反映した波動関数を用いて記述される。何らかの方法でソース関数の推定が可能な場合には、測定された相関関数からハドロン間相互作用の情報を引き出すことが可能になる。これまでに、 K^-p 相関関数や $\Lambda\Lambda-N\Xi$ 相関関数、 $N\Omega$ 相関関数など、ストレンジネスを含むハドロン対の相関関数の測定が行われ、多くの知見が得られてきた。一方で、チャームクォークを含むハドロンに関する相関関数は、高エネルギー衝突でも生成量が限られるため、これまでに測定が行われていなかった。

本研究では、チャームクォークを含む D 中間子と核子の運動量相関関数の測定を ALICE collaboration として行った。LHCでの高エネルギー pp 衝突実験の高多重度反応において、 D^-p および $D^+\bar{p}$ 対の2粒子運動量相関関数が測定された。測定結果は、クーロン相互作用のみで計算した相関関数と $(1.1-1.5)\sigma$ の範囲で一致するものの、強い相互作用による D^-p ポテンシャルを導入することで実験結果をより再現することが確認された。既存の理論モデルの予言する D^-p 散乱長に基づいてガウス型ポテンシャルを構築し、実験結果との比較を行った結果、定量的にアイソスピン $I=0$ の散乱長 f_0 が $-0.4 \text{ fm}^{-1} \leq f_0^{-1} \leq 0.9 \text{ fm}^{-1}$ と制限された。この結果はチャームクォークを含むハドロンの散乱長に関する初の直接的な実験的制限である。

2) DD^* および $D\bar{D}^*$ 相関のフェムトスコーピーによる研究

通常のハドロンはクォーク・反クォーク対で構成されるメソンと、クォーク3体の複合系であるバリオンに大別されるが、近年これらの分類に当てはまらないエキゾチックハドロンと呼ばれる状態の観測が報告されており、理論的・実験的に精力的に研究が行われている。2003年に Belle collaboration で観測された $X(3872)$ に端を発し、2021年には LHCb collaboration により T_{cc} と呼ばれるクォーク4体の複合系と思われる状態が報告され、注目を集めている。これらのエキゾチックハドロンは主にチャームクォークを含むため、生成するために高いエネルギーが必要であり、関係するハドロン間相互作用に関する情報は実験的に得られていない。1)の D^-p 相関関数の測定が成功したことで、今後はチャームクォークを2個含むハドロン対の測定も可能になると期待されている。

本研究では、エキゾチックハドロンである T_{cc} と $X(3872)$ の性質を明らかにすることを目標とし、チャームクォークを2個含む DD^* 相関および $D\bar{D}^*$ 相関関数の理論的計算を行った。 T_{cc} と $X(3872)$ に関する経験的なデータに基づいて、異なる荷電状態とのチャンネル結合を持つ $D^0D^{*+}-D^+D^{*0}$ および $D^0\bar{D}^{*0}-D^+D^{*-}$ ポテンシャルを構築した。チャンネル結合とクーロン相互作用の効果を含めて D^0D^{*+} , D^+D^{*0} , $D^0\bar{D}^{*0}$ および D^+D^{*-} ペアの運動量相関関数を計算した。結果として、閾値下に準束縛状態が存在することを反映し、相関関数は特徴的なソースサイズ依存性を示すことを明らかにした。

3) カイラルユニタリー法を用いた $\Xi(1620)$ 共鳴と $\bar{K}\Lambda$ 散乱長の解析

Ξ 励起状態はストレンジクォークを 2 個含むため実験的な測定が困難であり、従来は理論研究があまり進展していなかった。実際に、これまでに核子の励起状態は 30 個近く観測されているものの、 Ξ 励起状態は 10 個程度しか状態が確立されていない。しかし近年になり新たな実験手法が開発され、 Ξ 励起状態に関する新たな実験データが得られつつある。例えば Belle collaboration は、 $\pi^+\Xi^-$ の質量スペクトルにおいて、 $\bar{K}\Lambda$ 閾値の少し下に $\Xi(1620)$ の共鳴ピークを観測した。また、ALICE collaboration は、高エネルギー重イオン衝突における運動量相関関数の測定から $K^-\Lambda$ 散乱長を決定した。

本研究では、近年の実験的制限を考慮することで、 $\Xi(1620)$ 共鳴の性質を明らかにする。まず、崩壊チャンネルが存在する状況で、有効レンジ展開を用いて、閾値付近の固有状態の極の性質を分類し、散乱長との関係を明らかにした。結果として、閾値よりエネルギーの低い準束縛状態は散乱長のみで記述できるのに対し、閾値より高いエネルギーを持つ共鳴状態の記述には有効レンジの寄与が必要であることを示した。次に、メソン・バリオン散乱を記述するカイラルユニタリー法を用いて、Belle collaboration の結果が示唆するような閾値より低いエネルギーを持ち、比較的狭い崩壊幅を持つ $\Xi(1620)$ を記述する理論モデルを構築した。このモデルにより、 $\Xi(1620)$ 共鳴のスペクトルが $\bar{K}\Lambda$ 閾値が存在する効果によって歪められることを定量的に示した。次に、ALICE collaboration の決定した $K^-\Lambda$ 散乱長を再現するモデルを構築した。このモデルでは固有状態は物理的に意味のあるリーマン面には現れず、スペクトルは $\bar{K}\Lambda$ 閾値でカスプ構造を示すことが明らかになった。最後に、実験の誤差を考慮した上で、 $K^-\Lambda$ 散乱長の値と、準束縛状態の $\Xi(1620)$ 共鳴の整合性を定量的に議論した。

4) クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルによるエキゾチックハドロンの解析

強い相互作用の研究において、ポテンシャルの解明は重要な役割を果たしてきた。例えば、核力が短距離力である事実の物理的起源は、 π 中間子交換ポテンシャルが提案されることで解明された。また、無限に重い静的クォーク間ポテンシャルが長距離で距離に線形に依存する性質を持つことで、カラーの閉じ込め現象が特徴づけられることが知られている。クォーク間ポテンシャルとハドロン間ポテンシャルの研究は、格子 QCD を用いた数値計算も含め、それぞれ独立に発展してきたが、近年のエキゾチックハドロンの研究ではクォーク自由度とハドロン自由度が混在し、両者の結合を考える必要性が指摘されている。

本研究ではクォーク間ポテンシャルとハドロン間ポテンシャルをチャンネル結合の観点から解析し、エキゾチックハドロンの研究に応用する。フェッシュバッハの方法に基づいて、どちらかの自由度を消去した有効ポテンシャルを構築すると、得られるポテンシャルが非局所型になり、エネルギー依存性を持つことを示した。さらに、クォーク質量が有限の場合、ハドロン自由度の散乱状態との結合がクォーク間ポテンシャルに虚部を生じさせることが明らかになった。これは無限に重いクォーク間ポテンシャルとは定性的に異なる結果である。得られたハドロン間ポテンシャルをエキゾチックハドロンの研究に応用するためには、非局所型ポテンシャルを扱いが容易な局所ポテンシャルに変換する必要がある。先行研究で提案された微分展開を用いる局所近似の方法と HAL QCD 法に基づいた近似法をハドロン間有効ポテンシャルに応用し、エネルギー依存性を持つポテンシャルも同様の手法で局所ポテンシャルに変換できることを示した。応用として、 $X(3872)$ を記述するような $c\bar{c}$ 状態と $D^0\bar{D}^{*0}$ 状態の結合したポテンシャルモデルを構築し、 $c\bar{c}$ チャンネルを消去することで $D^0\bar{D}^{*0}$ 有効ポテンシャルの性質および局所近似の妥当性を議論した。エネルギー依存性を持つ場合も HAL QCD 法による局所近似が元の非局所ポテンシャルの位相差をよく再現するが、 $X(3872)$ のように浅い束縛状態を持つ場合は、位相差などの物理量がポテンシャルを構築する際の波動関数の運動量に強く依存することを明らかにした。

2. 研究業績

1) 論文

S. Acharya et al. (ALICE Collaboration): "First study of the two-body scattering involving charm hadrons", *Phys. Rev. D*, **106** (2022) 052010

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi: "Femtoscopic study on DD^* and $D\bar{D}^*$ interactions for T_{cc} and $X(3872)$ ", *Eur. Phys. J. A*, **58** (2022) 131

T. Kinugawa, T. Hyodo: "Structure of exotic hadrons by a weak-binding relation with finite-range correction", *Phys. Rev. C*, **106** (2022) 015205

R.L. Workman et al. (Particle Data Group): "Review of Particle Physics", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2022** (2022) 083C01

2) 学会講演

● J-PARC ハドロン研究会 2023 年 3 月 22–25 日 (J-PARC, Tokai / オンライン)

衣川友那, 兵藤哲雄: Compositeness of T_{cc} and $X(3872)$ with decay and coupled channel effects

西淵拓磨, 兵藤哲雄: Analysis of Ξ resonances with chiral unitary approach based on experimental data

寺島伊吹, 兵藤哲雄: $X(3872)$ を用いたクォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルの微分展開

曾根克佳, 兵藤哲雄: Near-threshold hadron scattering using effective field theory

● 日本物理学会 2023 年春季大会 2023 年 3 月 22–25 日 (オンライン)

衣川友那, 兵藤哲雄: 崩壊幅を考慮したエキゾチックハドロンの複合性

西淵拓磨, 兵藤哲雄: $K-\Lambda$ 散乱長に基づいた Ξ 励起状態の研究

寺島伊吹, 兵藤哲雄: $X(3872)$ を用いたクォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルの微分展開

三澤悠人, 兵藤哲雄: QCD 近藤効果のストレンジネス系への応用

曾根克佳, 兵藤哲雄: 有効場の理論を用いた閾値近傍のハドロン散乱

● 第 8 回クラスター階層領域研究会 2023 年 2 月 9 日–11 日 (大阪大学 / オンライン)

曾根克佳, 兵藤哲雄: Near-threshold hadron scattering using effective field theory

● 2022 年度 ELPH 研究会「ハドロン分光に迫る反応と構造の物理」 2022 年 12 月 6 日–7 日 (東北大学 / オンライン)

衣川友那, 兵藤哲雄: 有効場の理論を用いた T_{cc} の性質

西淵拓磨, 兵藤哲雄: ALICE 実験に基づいた Ξ 励起状態の理論モデル

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルによる $X(3872)$ の構造解析

曾根克佳, 兵藤哲雄: Near-threshold hadron scattering using effective field theory

● 日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 29 日–10 月 1 日 (岡山理科大)

衣川友那, 兵藤哲雄: 有効場の理論を用いた T_{cc} の性質

西淵拓磨, 兵藤哲雄: Ξ 共鳴状態のスペクトルに対する閾値効果

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルによる $X(3872)$ の構造解析

● 原子核三者若手夏の学校 2022 2022 年 8 月 6–9 日 (オンライン)

衣川友那, 兵藤哲雄: 有効場の理論を用いた T_{cc} の性質

西淵拓磨, 兵藤哲雄: Ξ 共鳴状態のスペクトルに対する閾値効果

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルによる $X(3872)$ の構造解析

三澤悠人, 兵藤哲雄: QCD 近藤効果のストレンジネス系への応用

曾根克佳, 兵藤哲雄: 有効場の理論を用いた閾値近傍のハドロン散乱

● 国内モレキュール型研究会「少数系の量子ダイナミクス」 2022 年 8 月 22–26 日 (京都大学基礎物理学研究所)

兵藤哲雄: 共鳴状態の理論とハドロンへの応用 (招待公演)

● ブラックホール準固有振動研究会 2022 年 8 月 4–5 日 (立教大)

兵藤哲雄: 散乱理論の共鳴状態とハドロン物理での応用 (招待公演)

国際会議

● Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF-ex WS) 2023 年 3 月 14–16 日 (J-PARC, Tokai / Online)

Tetsuo Hyodo: Theoretical progress and future direction in kaonic nuclei (Invited Talk)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Compositeness of exotic hadron with decay and coupled-channel effects

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Analysis of Ξ resonances with chiral unitary approach based on experimental data

Ibuki Terashima, Tetsuo Hyodo: Structure of $X(3872)$ with hadronic potentials coupled to quarks

Katsuyoshi Sone, Tetsuo Hyodo: Near-threshold hadron scattering using effective field theory

● 3rd Japan-France Workshop Few-body problems in Physics - from atoms to quarks 2023 年 2 月 27 日–3 月 3 日 (Tohoku Univ.)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Compositeness of hadrons from effective field theory

● Workshop on Physics of heavy quark and exotic hadrons 2023 2023 年 1 月 30–31 日 (J-PARC, Tokai / Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Nature of T_{cc} with effective field theory (Invited Talk)

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Study of excited Ξ baryons based on the $K^-\Lambda$ scattering length (Invited Talk)

Ibuki Terashima, Tetsuo Hyodo: Structure of $X(3872)$ with hadronic potentials coupled to quarks (Invited Talk)

Katsuyoshi Sone, Tetsuo Hyodo: Near-threshold hadron scattering using effective field theory (Invited Talk)

● The 2022 International Conference on the Structure of Baryons (Baryons 2022) 2022 年 11 月 7–11 日 (Universidad Pablo de Olavide, Spain / Online)

Tetsuo Hyodo: Antikaon-nucleon interactions and the momentum correlation functions in high-energy collisions

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Nature of T_{cc} with effective field theory

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Threshold effects for excited Ξ baryons

Ibuki Terashima, Tetsuo Hyodo: Structure of $X(3872)$ with hadronic potentials coupled to quarks

● International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2022) 2022 年 10 月 31 日–11 月 3 日 (Tohoku Univ. / Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Nature of T_{cc} with effective field theory

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Threshold effects for excited Ξ baryons

Ibuki Terashima, Tetsuo Hyodo: Structure of $X(3872)$ with hadronic potentials coupled to quarks

Haruto Misawa, Tetsuo Hyodo: Application of QCD Kondo effect to strangeness systems

Katsuyoshi Sone, Tetsuo Hyodo: Near-threshold hadron scattering using effective field theory

● The International School for Strangeness Nuclear Physics 2022 2022 年 10 月 24–28 日 (Tohoku Univ. / Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Nature of T_{cc} with effective field theory

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Threshold effects for excited Ξ baryons

Ibuki Terashima, Tetsuo Hyodo: Structure of $X(3872)$ with hadronic potentials coupled to quarks

Haruto Misawa, Tetsuo Hyodo: Application of QCD Kondo effect to strangeness systems

Katsuyoshi Sone, Tetsuo Hyodo: Near-threshold hadron scattering using effective field theory

● EXOTICO: EXOTIc atoms meet nuclear COLLisions for a new frontier precision era in low-energy strangeness nuclear physics 2022 年 10 月 17–21 日 (ECT*, Italy / Online)

Tetsuo Hyodo: Kaon-deuteron systems and femtoscopy (Invited Talk)

● International workshop on Hadron physics with kaon beam and related topics 2022 年 10 月 3–4 日 (Online)

Tetsuo Hyodo: Theory of kaon-nuclear systems

● APCTP workshop on Exotics and Exotic phenomena in Heavy Ion Collision (ExHIC) 2022 年 9 月 29 日–10 月 1 日 (APCTP, Korea / Online)

Tetsuo Hyodo: $X(3872)$, T_{cc} , and heavy meson interactions (Invited Talk)

● 14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2022) 2022 年 6 月 27 日–7 月 1 日 (OREA Hotel Pyramida, Czech Republic / Online)

T. Hyodo: Theory of few-body kaon-nuclear systems (Invited Talk)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Structure of exotic hadrons by the weak-binding relation with finite range correction

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Nature of excited Ξ baryons with threshold effects

Ibuki Terashima, Tetsuo Hyodo: Analysis of coupled-channel potentials with quark and hadron degrees of freedom

宇宙理論研究室

1. 研究活動の概要

宇宙理論研究室では、相対論が関わるような高エネルギー天体现象、銀河・銀河団の形成と進化、および関連する宇宙プラズマの基礎的物理過程をテーマとして、様々な天体や現象を対象に理論的、観測的研究を進めている。2022年度の研究室構成はスタッフ2名、ポストク2名、大学院生3名、学部学生1名である。

1) 高エネルギー宇宙物理学の研究

超新星残骸から放射されるガンマ線の起源 本研究では超新星残骸 (SNR) RX J1713.7-3946 からのガンマ線の起源に着目した。まず解析モデルを用いて、SNR 周辺の宇宙線 (CR) の分布を計算した。これまでの研究結果から、SNR は2相の星間物質 (ISM) と相互作用していると仮定し、高密度の塊は、希薄な塊間物質で囲まれているとした。また、高エネルギー陽子 ($> \text{TeV}$) のみが密な塊を透過できると仮定した。その結果、陽子によって生成された π^0 崩壊ガンマ線は、 $\sim \text{TeV}$ にピークを持つガンマ線スペクトルの観測値を再現することがわかった。一方、最近、SNR の格子点における ISM 柱密度 (N_p)、X線表面輝度 (I_X)、ガンマ線表面輝度 (I_g) が、3次元空間 (N_p, I_X, I_g) において平面を形成することが指摘されている。我々はこの平面配置は、ISM や CR の電子対陽子比が球対称分布をしていない場合にも自然に再現されることを見出した。また、3次元空間における観測データの分布から、ISM 密度、宇宙線電子陽子比、磁場のうち、どの量が SNR の方位角方向で変化しているのかを特定できることも示した。

フェルミバブルの起源 フェルミバブルは、ガンマ線を放出する大きな構造物である。このバブルは銀河系中心 (GC) を中心に左右対称に存在しており、その生成は GC での集中的なエネルギー注入に起因すると考えられている。本研究では、バブルに付随する非平衡な X線ガス構造に注目した。まず、X線ガスの密度、温度、衝撃波年齢のプロファイルを組み合わせることで、エネルギー注入のメカニズムを見分けることができることを明らかにした。そこで具体的に数値シミュレーションの結果を観測と比較することで、バブルは GC からの高速風によって作られたことが示した。特に高速風は強い逆ショックを発生させ、そこで観測された温度ピークをよく再現する。一方、高速風ではなく、GC での瞬間的なエネルギー注入では、温度プロファイルを再現できないことも示した。得られた高速風モデルによると、風の速度は $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ で、 $\sim 10^7$ 年間吹き続けた。風の質量フラックスが大きいので、ブラックホールからの広角のアウトフローによる星間ガスの巻き込みが必要である。この風は、他の銀河でしばしば観測され、銀河とその中心ブラックホールの成長を制御していると考えられている活動銀河核のアウトフローと同じである可能性がある。

衝突する銀河団からの放射 銀河団の衝突速度は超音速になるので、そのガス中に衝撃波が発生する。そのような銀河団 CIZA J1358.9-4750 を XMM-Newton 衛星や uGMRT 電波望遠鏡で調べた。まず衝撃波後面の高温領域と前面の低温領域の間の Rankin-Hugoniot 関係から、衝突速度や衝突時間を見積もった。さらにシンクロトロン電波放射強度から、衝撃波での宇宙線加速効率が低いことを明らかにした。

ブラックホールへのガス降着過程の解明 銀河中心に位置する活動銀河核 (AGN) 一般において、銀河中心の 100 pc 以内の空間スケールでの質量降着の現場や、それを引き起こす素過程については観測的な理解がほとんど進んでいない。そこで、我々は最近傍 AGN の一つである Circinus 銀河に対する ALMA

電波望遠鏡の最高解像度 0.02" で高密度分子ガス (HCN J=3-2) データを解析した。その結果, AGN 周辺の数 pc スケールに集中して存在する高密度ガス円盤を発見し, さらに, その中心 = AGN 位置では HCN(3-2) 吸収線も検出することに成功した。その輝線プロファイルは inflow ガスに特徴的な形状を示していたため, この結果は銀河中心数 pc でのガスインフローの現場を, 初めて直接捉えたものとなった。さらに詳細な力学解析の結果, このガス円盤は重力的に不安定になっていて, そのため質量降着が駆動されていることも示した。これまで全くもって未解明であった超巨大ブラックホールへの質量降着の機構を解明した記念碑的な成果となった。

活動銀河核トーラスの動的構造 活動銀河核 (Active Galactic Nucleus = AGN) は, 電離広輝線領域が確認できる 1 型と, それが見えない 2 型に大別される。その違いを, 光学的かつ幾何学的に厚いトーラス構造を覗き込む角度の違いによって説明するのが, AGN トーラスモデルである。我々のグループは, このトーラスの物理的起源が, AGN の輻射圧により駆動されたアウトフローと, その一部が銀河中心部の高密度円盤に舞い戻る際に生じる乱流にあるという理論モデルに立脚し, ALMA 望遠鏡による多相星間物質観測を通じた検証を進めている。今回, 比較的高密度な分子ガスをトレースする CO(3-2) 輝線の ~ 10 pc に達する高解像度データがある NGC 5643 と NGC 6300 という天体について, 原子ガスをトレースする [CI](1-0) 輝線での追観測を行なった。結果, NGC 5643 では [CI](1-0) 輝線は CO 円盤の上空に分布しており, NGC 6300 ではアウトフローに特徴的な広輝線を持つことが分かった。これらは原子ガスは分子ガスとは異なる分布や運動を示すと予想する上述の理論モデルと整合する結果である。

高赤方偏移クエーサーの母銀河の研究 赤方偏移が 6 を超える (すなわち宇宙年齢 10 億歳以下) の初期宇宙で, すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いて発見されたクエーサーの母銀河を, ALMA 望遠鏡を用いて観測している。具体的には, 星形成活動や銀河の力学をよく反映する [CII]158 μ m 輝線を用いて, 銀河の星形成率や力学質量を測定し, 初期宇宙での銀河とブラックホールの共進化の進展具合を調査している。Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 等の先行サーベイで発見された最大級に明るいクエーサーに比べて, HSC で発見されたクエーサーは 1 桁程度暗く, 当時の宇宙のより一般的なブラックホール種族の進化を追うことができる。HSC クエーサーを 12 天体観測した結果, これらの母銀河は銀河の星形成活動の主系列に乗る, もしくはそれよりも星形成活動が弱い天体が多いことが分かった。これは爆発的星形成銀河で構成される高光度クエーサーには見られなかった特徴である。さらに, 複数天体でアウトフローの兆候も確認できた。これらの結果は, この時代に既に活動銀河核による星形成活動の抑制が始まっていたことを示唆する。

2) 恒星の自転の研究

光度曲線の解析 黒点などによる恒星表面の光度の変動が及ぼす光度曲線への影響をモデル化することを通して, 恒星の情報 (微分回転のパラメータや, 視線方向と回転軸とのなす角など) を導く方法論を確立した。また, その結果を実際の観測データに適用した

2. 研究業績

1) 論文

A. Shimaguchi, K. K. Nobukawa, S. Yamauchi, M. Nobukawa, Y. Fujita: "Tuning Localized Transverse Surface Plasmon Resonance in Electricity Selected Single Wall Carbon Nanotubes by Electrochemical Doping", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **74** (2022) 126

- Y. Fujita, R. Yamazaki, Y. Ohira: "The Gamma-Ray Emission from the Supernova Remnant RX J1713.7-3946 Interacting with Two-phase Medium", *Astrophys. J.*, **933** (2022) 043106
- Y. Fujita: "Evidence for powerful winds and the associated reverse shock as the origin of the Fermi bubbles", *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, **518** (2023) 4551
- Y. Omiya, K. Nakazawa, K. Matsushita, S. B. Kobayashi, N. Okabe, K. Sato, T. Tamura, Y. Fujita, L. Gu, T. Kitayama, T. Akahori, K. Kurahara, T. Yamaguchi: "XMM-Newton view of the shock heating in an early merging cluster, CIZA J1358.9-4750", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **75** (2023) 37
- K. Kurahara, T. Akahori, R. Kale, H. Akamatsu, Y. Fujita, L. Gu, H. Intema, K. Nakazawa, N. Okabe, Y. Omiya, V. Parekh, T. Shimwell, M. Takizawa, R. J. Van Weeren : "Diffuse radio source candidate in CIZA J1358.9-4750", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **75** (2023) S138
- Y. Suto, S. Sasaki, Y. Nakagawa, O. Benomar: "Analytic model for photometric variation due to starspots on a differentially rotating star", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **74** (2022) 857
- Y. Suto, S. Sasaki, M. Aizawa, K. Fujisawa, K. Kashiya: "Modeling photometric variations due to a global inhomogeneity on an obliquely rotating star: Application to light curves of white dwarfs", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **75** (2023) 103
- M. T. Sato, S. Aalto, K. Kohno, S. König, N. Harada, S. Viti, T. Izumi, Y. Nishimura, M. Gorski: "APEX and NOEMA observations of H₂S in nearby luminous galaxies and the ULIRG Mrk 231. A possible relation between dense gas properties and molecular outflows", *Astron. & Astrophys.*, **660**, (2022) A82
- S. Baba, M. Imanishi, T. Izumi, T. Kawamuro, N. D. Dieu, T. Nakagawa, N. Isobe, S. Onishi, K. Matsumoto: "The Extremely Buried Nucleus of IRAS 17208-0014 Observed at Submillimeter and Near-infrared Wavelengths", *Astrophys. J.*, **928**, (2022) 184
- J. Li, J. D. Silverman, T. Izumi, H. Wanqiu, M. Akiyama, K. Inayoshi, Y. Matsuoka, M. Onoue, Y. Toba; "On the Connection between Supermassive Black Holes and Galaxy Growth in the Reionization Epoch", *Astrophys. J. Let.*, **931**, (2022) L11
- R. Ikeda, K. Tadaki, D. Iono, T. Kodama, J. C. C. Chan, B. Hatsukade, M. Hayashi, T. Izumi, K. Kohno, Y. Koyama, R. Shimakawa, T. L. Suzuki, Y. Tamura, I. Tanaka: "High-resolution ALMA Study of CO J = 2-1 Line and Dust Continuum Emissions in Cluster Galaxies at $z = 1.46$ ", *Astrophys. J.*, **933**, (2022) 11
- T. Saito, S. Takano, N. Harada, T. Nakajima, E. Schinnerer, D. Liu, A. Taniguchi, T. Izumi, Y. Watanabe, K. Bamba, K. Kohno, Y. Nishimura, S. Stuber, T. Tosaki: "AGN-driven Cold Gas Outflow of NGC 1068 Characterized by Dissociation-sensitive Molecules", *Astrophys. J.*, **935**, (2022) 155
- I. García-Bernete, D. Rigopoulou, A. Alonso-Herrero, F. R. Donnan, P. F. Roche, M. Pereira-Santaella, A. Labiano, L. Peralta de Arriba, T. Izumi, C. Ramos-Almeida, T. Shimizu, S. Hönig, S. García-Burillo, D. J. Rosario, M. J. Ward, E. K. S. Hicks, L. Fuller, C. Packham: "A high angular resolution view of the PAH emission in Seyfert galaxies using JWST/MRS data", *Astron. & Astrophys.*, **666**, (2022) L5

T. Kawamuro, C. Ricci, M. Imanishi, R. F. Mushotzky, T. Izumi, F. Ricci, F. E. Bauer, M. J. Koss, B. Trakhtenbrot, K. Ichikawa, A. F. Rojas, K. L. Smith, T. Shimizu, K. Oh, J. S. den Brok, S. Baba, M. Balokovic, C.-S. Chang, D. Kakkad, R. W. Pfeifle, G. C. Privon, M. J. Temple, Y. Ueda, F. Harrison, M. C. Powell, D. Stern, M. Urry, D. B. Sanders: "BASS XXXII: Studying the Nuclear Millimeter-wave Continuum Emission of AGNs with ALMA at Scales $\leq 100\text{-}200$ pc", *Astrophys. J.*, **938**, (2022) 87

H. Fukuchi, K. Ichikawa, M. Akiyama, C. Ricci, S. Chon, M. Kokubo, A. Liu, T. Hashimoto, T. Izumi: "H1821+643: The Most X-Ray and Infrared Luminous Active Galactic Nucleus (AGN) in the Swift/BAT Survey in the Process of Rapid Stellar and Supermassive Black Hole Mass Assembly", *Astrophys. J.*, **940**, (2022) 7

K. Lee, K. Kohno, B. Hatsukade, F. Egusa, T. Yamashita, M. Schramm, K. Ichikawa, M. Imanishi, T. Izumi, T. Nagao, Y. Toba, H. Umehara: "Massive Molecular Gas Companions Uncovered by Very Large Array CO(1-0) Observations of the $z = 5.2$ Radio Galaxy TN J0924-2201", *Astrophys. J.*, **944**, (2023) 35

2) 学会講演

● 日本天文学会秋季年会 2022年9月13~15日 (新潟大学)

藤田裕, 山崎了, 大平豊: 2相星間ガスと相互作用をする超新星残骸 RX J1713.7-3946 からのガンマ線放射

泉拓磨, 今西昌俊, 中西康一郎, 和田桂一, 工藤祐己, 馬場俊介, 川室太希, 松本尚輝, 河野孝太郎, 藤田裕, Konrad R. W. Tristram 高解像度サブミリ波水素再結合線による AGN 電離アウトフローの検出

● 高エネルギー宇宙物理学研究会 2022年11月8~10日 (広島大学)

藤田裕, 山崎了, 大平豊: 超新星残骸 RX J1713.7-3946 からのガンマ線放射と SNR 平面について

● 高エネルギー宇宙物理学研究会 2023年3月6~8日 (青山学院大学)

泉拓磨: X線広域サーベイに対するミリ波サブミリ波観測からの期待

● 日本天文学会春季年会 2023年3月13~16日 (立教大学)

藤田裕: Reverse Shock が示す高速 AGN 風でできたフェルミバブル

泉拓磨, 今西昌俊, 鳥羽儀樹, 尾上匡房, 稲吉恒平, 松岡良樹, 長尾透, 藤本征史, Michael A. Srauss, 河野孝太郎, John. D. Silverman, 柏川伸成, 梅畑豪紀, 川口俊弘, 井上昭雄, SHELLQs team: ALMA 多天体観測で調べる高赤方偏移低光度クエーサーでの始原的共進化

池田裕, 泉拓磨, 藤田裕, 市川幸平, 河野孝太郎, 上田佳宏, 今西昌俊, 川室太希, 宇野慎介, BASS TEAM: ALMA による近傍高光度 Swift/BAT-AGN の高解像度 CO(2-1) サーベイ観測

平澤凌, 泉拓磨, 藤田裕, 今西昌俊, 和田桂一, GATOS team: ALMA 観測で明らかにする AGN 遮蔽の動的構造

● AGN ワークショップ in 鹿児島 2022年8月30日 (鹿児島大)

泉拓磨: パーセク級解像度で調べる AGN へのガス供給と多相ガスの動的構造

● ALMA フェローシンポジウム 2022 年 12 月 19 日 (国立天文台)

泉拓磨: Resolving supermassive black hole feeding and feedback

● ngVLA サイエンスワーキンググループ合同検討会 2023 年 3 月 29 日 (国立天文台)

泉拓磨: 高解像度ミリ波観測で描き出す活動銀河中心核近傍の構造

国際会議

● IAUGA 2022 (Busan, Korea (Online))

Y. Fujita, N. Kawakatu, H. Nagai: Massive molecular gas as a fuel tank for active galactic nuclei feedback in central cluster galaxies

● Behind the Curtain of Dust IV (Sesto, Italy)

T. Izumi: Multiphase dynamical gas fountain that replaces the classical black hole obscuration
COSPAR 2022 (Athens, Greece)

T. Izumi: ALMA observations of low-luminosity quasars at cosmic dawn: less-biased view on the early co-evolution

● What Drives the Growth of Black Holes (Reykjavik, Iceland)

T. Izumi: Multiphase dynamical gas fountain that replaces the classical black hole obscuration

● TORUS 2022 (Leiden, Netherland)

T. Izumi: Resolving supermassive black hole feeding, feedback, and obscuration: multiphase gas flows down to sub-parsec

● HSC-AGN face-to-face meeting (Kagoshima, Japan)

T. Izumi: ALMA observations of low-luminosity quasars at cosmic dawn

● KIAA-DoS Seminar (KIAA/Pekin University, China)

T. Izumi: Resolving supermassive black hole feeding and feedback: multiphase flows down to sub-parsec

● East-Asia ALMA Science Workshop 2023 (New Taipei City, Taiwan)

T. Izumi: Resolving supermassive black hole feeding and feedback down to sub-parsec scales

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) トンネル効果の非可積分性と複素軌道のエルゴード性

「非可積分系とトンネル効果は可積分系のそれと何が本質的に違うのか？」量子力学の基本的問題とも言えるこの問いが発せられてから30年余りの年月が経つ。以来、さまざまな系を用いてさまざまなアプローチが試みられてきたものの、諸説紛々としたままこの問題には未だ統一見解が得られていない。その解決を阻む大きな要因として、トンネル効果が指数関数的に小さな現象であるのに対し、その舞台となる非可積分系の位相空間が規則領域とカオス領域が自己相似的に入り交じる極めて複雑な様相を呈することが挙げられる。その困難を打開すべく、一昨年より「超近可積分系」と我々が呼ぶ、可積分系に極めて微弱な摂動の加わった系の研究を開始した。ここまでのところその成果は目覚ましく、超近可積分系の固有関数では、実位相空間上に、非可積分性由来の構造が現れない状況であっても、トンネル尾に非自明な階段構造が出現することわかった。この構造は、インスタントに基づく説明を拒むという意味で、非可積分性由来のトンネル効果が顕在化したものとみなさざるを得ない。ここでは、面積保存写像に対する複素半古典論を考えることによりその階段構造の”古典力学的”起源を探った。一般の面積保存写像の位相空間には、規則領域とカオス領域とが互いに互いの動的障壁となり系のエルゴード性が破れるが、複素領域の力学では、実領域の如何に依らずエルゴード性が回復される。ここでは、非可積分性由来の階段構造がこの複素力学系のもつエルゴード性を背景に現れるものであることを明らかにした。この結果は、これまで我々が提唱した「複素安定多様体機構」とは別の「複素回転領域機構」が非可積分系のトンネル効果の特徴づけるものであることを示唆し、長らく論争の続いた非可積分系のトンネル効果の問題に大きな光を当てる可能性がある。

2) 3次元および4次元馬蹄型力学の位相的性質

スモールが提唱した馬蹄型力学はカオス発生の問題の基本的な機構である。2次元内の領域が引き延ばしと折畳みの変換を受けることにより、初期の記憶を喪失し長時間の予測を困難にする。ダイナミクスの位相的な特性を記述する馬蹄型力学に加え系の各点ごとの不安定性（一様双曲性）が加わると、系は記号力学系と等価になることが証明され（Moser-Conleyの定理）、動力学の記述は著しく単純になる。自由度2のハミルトン力学系はポアンカレ写像を考えることにより、系のダイナミクスは本質的に2次元写像でその本質を捉まえることが可能になるが、自由度が3以上のハミルトン系、特にその中で発生するカオスは2次元写像上のカオス、すなわち2次元平面上の馬蹄型力学ではモデル化することができない。ここでは、エノン写像と呼ばれる、2自由度ハミルトン系を離散化して得られる2次元保測写像を2つ結合した結合エノン写像を手がかりに、3次元および4次元空間上の馬蹄型力学を調べ、高次元の馬蹄型力学には2次元の場合とは異なり、位相的に異なるいくつかのタイプが存在することを明らかにした。発見された5つのタイプを列挙すると以下である。

- a) Topology I: Singly-folded horseshoe in three dimensions
- b) Topology II: Doubly-folded horseshoe with independent creases in three dimensions
- c) Topology III-A: Doubly-folded horseshoe with independent creases and independent stacking directions in four dimensions
- d) Topology III-B: Singly-folded horseshoe in four dimensions
- e) Topology IV: Doubly-folded horseshoe with independent creases and common stacking direction in four dimensions

3) 古典可積分系での作用変数のホロノミーからトポロジカルポンプへ

これまで量子系で調べられてきた新奇な量子ホロノミーに対応する古典系での現象を探索している。新奇な量子ホロノミーとは、断熱サイクルが量子系の定常状態を別の状態に移行させることである。その具体例は近年になって見いだされるようになり、一次元量子気体での実験的な実現が「量子エネルギーポンプ」として報告された。一方で、新奇な量子ホロノミーの具体例の多くが単純な量子古典対応を許さないため、以前は新奇な量子ホロノミーに対応する古典現象を論じ得るか否かすら不明であった。これを受け、古典的な微小振動への断熱的なピン止め操作を含む断熱サイクルをここしばらく調べている。この結果、基準振動のポンプとして機能する断熱サイクルを見いだした。これは古典完全可積分系における作用変数のホロノミーと呼ぶべきものである。

本年度は、作用変数のホロノミーのトポロジカルポンプへの応用を調べた。その背景をまず説明する：トポロジカル絶縁体の端に局在するモード（固有状態）を別の局在状態に輸送する断熱過程は Thouless ポンプの一種であるエッジ・エッジポンプとして近年良く調べられている。これに類似する状況を、ピン止め操作を含む断熱サイクルによって構成した。両者の重大な違いは、前者では無限系のトポロジカルな特徴が有限系での局在状態を説明し、ポンプはチャーン数と呼ばれるトポロジカル数で特徴付けられる。一方、我々の例では局在状態は人為的なピン止めで形成する必要があり、さらには、ポンプをトポロジカル数で特徴付ける従来の処方箋が適用できない。このような断熱サイクルを幾何学的に特徴付けることは今後の課題である。

2. 研究業績

1) 論文

Ryonosuke Koda and Akira Shudo: Complexified stable and unstable manifolds and chaotic tunneling, *J. Phys. A: Math. Theor.* **55** (2022) 174004 (38 pages).

Kensuke Yoshida, Giulio Casati, Shingo Watanabe and Akira Shudo: Sublinear diffusion in the generalized triangle map *Phys. Rev. E* **106** (2022) 014206 (10 pages).

Riku Iijima, Ryonosuke Koda, Yasutaka Hanada and Akira Shudo: Quantum tunneling in ultra-near integrable systems, *Phys. Rev. E* **106** (2022) 064205 (11 pages).

Domenico Loppolis and Akira Shudo: Towards the Resolution of a Quantized Chaotic Phase-Space: The Interplay of Dynamics with Noise, *Entropy*, **25(3)** (2023) 411 (16 pages).

Gergö Nemes: Dingle's final main rule, Berry's transition, and Howls' conjecture, *J. Phys. A: Math. and Theor.* **55** (2022) 494001 (25 pages).

Wei Shi, Gergö Nemes, Xiang-Sheng Wang and Roderick Wong: Error bounds for the asymptotic expansions of the Hermite polynomials, *Proc. Royal Soc. of Edinburgh, Section A: Mathematics* **153** (2023) 417 (24 pages).

Atushi Tanaka: Topological adiabatic dynamics in classical mass-spring chains with clamps, *Phys. Lett. A* **460** (2023) 128621 (6pages).

2) 学会講演

● 日本物理学会 秋季大会 2022年9月12日–15日（東京工業大学）

幸田遼之介, 首藤啓: 超微弱摂動系の量子トンネル効果と複素古典力学

藤岡佳佑, Li Jizhou, 首藤啓: 結合エノン写像における位相的馬蹄と一様双曲性の十分条件 II

● 日本物理学会 春季大会 2023年3月22日-25日 (オンライン開催)

藤岡佳佑, Li Jizhou, 首藤啓: 結合エノン写像における位相的馬蹄と一様双曲性の十分条件 III

田中篤司: クランプを使った断熱トポロジカルポンプ

国際会議

● “Mathematics of beyond all-orders phenomena(AR2W02)”, 31 October–November 2022 (Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge)

Akira Shudo: Time-domain semiclassical approach to quantum tunneling in nearly integrable systems (invited).

Gergő Nemes: Dingle’s final main rule, Berry’s transition, and Howls’ conjecture (invited).

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 量子力学的粒子系への機械学習の応用

量子力学的粒子系の数値解析技法としてこれまで多用されてきた量子モンテカルロシミュレーションの世界線データを画像として扱い、機械学習を用いて相の特定を行うアプローチを考案した。世界線データには（原理的には）相に関する情報がすべて含まれている。従来手法では、あらかじめ計算したい物理量を決め、世界線データを用いてその物理量を計算し、相や相境界を定めていた。そのため未知の相については、計算すべき物理量を適切に選ぶことが重要であり、一般にはこれは容易なことではない。機械学習では、この過程を省き、世界線データから直接、相に関する情報を引き出すことが可能であり、予備的な計算については学会発表を行った。[森]

2) BCS-BEC クロスオーバーにおける擬 1 次元光格子中の Fermi 超流動気体の臨界速度

レーザーによって捕捉された原子気体を nK 程度の極低温まで冷却することで、原子気体の超流動が実現されている。Fermi 原子気体では、対を形成することで Bose-Einstein 凝縮が起き、超流動現象が発生する。レーザーの定在波を用いることで極低温原子気体に周期ポテンシャル (光格子) を印加させることが可能となった。超流動に弱強度光格子あて光格子を超流動臨界速度よりも速く等速運動させることで、超流動の崩壊を誘起させ、BCS-BEC クロスオーバーにおける超流動の性質の違いを観測することを試みた実験が行われている。2022 年度は擬 1 次元光格子中の Fermi 超流動気体の BCS-BEC クロスオーバー領域における新たな理論を構築し、臨界速度を数値計算によって求めた。臨界速度は、実際に実験によって得られているものとよい一致が見られた。超流動臨界速度の計算により、超流動の崩壊機構を解明することで超流動を担う原子対の性質の解明が行えることが検証できた。関連する論文を執筆中である。[荒畑]

3) 二次元格子対称性をもつ普遍的漸近式を用いた短距離相関関数の数値的研究

非臨界状態にある古典格子模型の相関関数が普遍的に示す漸近形の研究を行っている。従来型の Ornstein-Zernike タイプの解析と異なり正方格子の C_{4v} 対称性を持つ漸近式には一般的に 3 つのパラメタが必要であること、また三角格子の C_{6v} 対称性の場合には 2 パラメタのミニマルな漸近式となることなどを指摘してきた。本年度は与えられた相関関数のデータに対してこれらパラメタの最適値を Levenberg-Marquardt 法を用いて求めるプログラムを作成し正方および三角格子上の統計模型の主に高温相で観測される異方的相関長の解析を行った。[大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

4) 二次元フラストレートスピン系に見られる 6-state clock universality に関する数値的研究

反強磁性 (AF) 体は強磁性 (F) 体と異なり格子構造の影響を受けやすく低温まで秩序しないものや新奇的な相転移を示すものが多く知られている。正方格子 AF 3-state Potts 模型や三角格子 AF Ising 模型はその代表例であり基底状態は共にコンパクトボソンにより記述される二次元 Gaussian 臨界性を示す。これに対して次近接 F 相互作用はコンパクト化半径を変化させる効果があり結果として低温において 6 重縮退した秩序相を安定化させる。一方高温では常磁性相になることより、これら次近接相互作用を含む模型は双対 sine-Gordon 模型で記述される 6-state clock universality にあると考えられる。これらの模型は Monte-Carlo 法や level-spectroscopy 法などを用いて調べられている。一方、最近椎名らは機械学習を用いた相の判別法の提案を行なっており新しい試みとして注目を集めている。我々はこれら 3 つの数値的手法を用いて求められた BKT 型の相転移温度 $T_{1,2}$ を詳細に比較した。その結果、3 つの方法は

お互い無矛盾な評価値を与えることが明らかになると共に機械学習による相の判別法の有効性を確認できた。現在、関連論文が出版準備中である。[大塚, 椎名拳太 (AiCAN Inc.), 岡部豊]

2. 研究業績

1) 論文

M. Fujimoto and H. Otsuka: “Universal asymptotic correlation functions for point group C-6v and an observation for triangular lattice Q-state Potts model” , Phys. Rev. E 107 (2023) 024118.

2) 和書

3) 学会講演

●日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日-25 日 オンライン

坂本晟学, 森弘之: 機械学習による世界線画像判別に基づいた相転移現象の数値解析

国内研究会

国際会議

強相関電子論研究室

1. 研究活動の概要

強相関電子論研究室では、量子臨界点近傍の新奇な量子多体状態や、遷移金属化合物、希土類化合物、アクチノイド化合物などのいわゆる強相関電子系物質の磁性や超伝導に関する理論的研究を行っている。これらの系では電子間のクーロン斥力の影響が非常に強く、従来のバンド理論を超えた理論的枠組みが必要となるが、本研究室では、場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して研究を行っている。2022年度の研究室構成は、常勤教員2名、連携客員教授1名、大学院生6名、卒研究生4名であった。以下は、2022年度に行った主な研究の概要である。

1) d^1 ダブルペロブスカイト化合物における強四極子モーメントの発現機構

d 電子系化合物である立方晶ダブルペロブスカイト $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ はその特異な磁気構造と軌道秩序の関係から、近年精力的に研究がなされている。通常、立方晶では、磁気異方性は $[110]$ 方向にあることはないが、 $\text{Ba}_2\text{MgReO}_6$ ではその強磁性転移温度 $T_C = 18$ K 以下での磁化容易軸が $[110]$ であることが知られている。このことは低温で立方晶からより低対称な正方晶になっていることを示しており、実際に詳細な X 線回折実験により、 $T_q = 33$ K での反強四極子秩序が見出された。本研究では、この反強四極子秩序下において強四極子モーメントが誘起されるという X 線回折実験の結果に関して、磁性を担う Re イオンの d 電子の結晶場励起状態を考慮することで説明を試みた。ダブルペロブスカイト構造における結晶場基底状態は、その強いスピン軌道結合により有効的な全角運動量 $J_{\text{eff}} = 3/2$ で記述される 4 重項である。先行研究ではこの 4 重項のみを考慮した理論モデルが提案されていたが、本研究では励起状態と基底状態の間の四極子演算子の行列要素に、四極子の異方性を反映する最低次の項があることを見出した。この寄与を考慮し、反強四極子秩序を記述する先行研究のモデルの平均場近似の解析から、反強四極子秩序下で強四極子モーメントが有限に発現することを明らかにした。

2) 三角格子上の四極子の統計力学

三角格子上に定義された二次元的な四極子自由度 $\{x^2 - y^2, 2xy\}$ は、その二次元性ととも、特異な形の 3 次の結晶場異方性を有するため、対応する磁気双極子のモデルと異なる物理が発現することが期待される。特に 3 次異方性はトリプル q 秩序を誘起することがこれまでの研究により明らかになっており、本モデルの統計力学的相図を明らかにすることは重要な課題である。本研究では、上記自由度の間の最近接相互作用をもつミニマルモデルを提案し、古典モンテカルロシミュレーションによりその相図を明らかにした。三角格子における最近接相互作用は等方的なものと同方的なもの二種類が存在する。その大きさの比を変化させることで、秩序波数がブリルアン境界の整合波数から別の整合波数へ連続的に移り変わることがわかった。その結果、非整合波数の四極子トリプル q 秩序が実現する領域が存在する。この相では、四極子の長周期構造はいわゆる “Moire” 構造をとり、副格子毎に定義されたボルテックスチャージで特徴づけられる。また、整合波数の秩序についても種々の Potts 模型のユニバーサリティクラスに属することを明らかにした。特に、4 状態 Potts 模型で表せる部分秩序状態が実現することが本モデルの特徴といえることができる。

3) BiS_2 系層状超伝導体の超伝導ギャップ関数に対するサイト間クーロン相互作用の影響

BiS_2 系超伝導体は、2012 年に水口らによって発見された層状超伝導物質である。その母物質である LaOBiS_2 は、 BiS_2 伝導層と LaO ブロック層が交互に積層してできた半導体であるが、O を F に置換することで BiS_2 層に電子がドーピングされ、超伝導が発現する。 BiS_2 系層状超伝導体の超伝導転移温度 T_c の

上昇に興味を持たれているが、その超伝導発現機構についてはまだ完全には解明されておらず、フォノン機構とスピン揺らぎ機構の間で議論が続いている。本研究では、スピン揺らぎ機構の立場に立ち、2次元 BiS_2 面に対する2軌道拡張ハバードモデルを乱雑位相近似の範囲で解析してギャップ方程式を解き、フェルミ面上のギャップ関数のノード構造を調べた。特に、サイト間クーロン相互作用の大きさが増加したときのノード構造の変化を調べ、角度分解光電子分光 (ARPES) の実験結果と比較した。サイト間クーロン相互作用としては、隣接する同種軌道間のクーロン相互作用 V_1 、隣接する異種軌道間のクーロン相互作用 V_2 を考え、 V_1 - V_2 平面上で超伝導状態相図を描いた。ギャップ関数のフェルミ面上のノードの数 N_s で超伝導状態を分類し、 $N_s = 2$ の場合をタイプ1、 $N_s = 4$ の場合をタイプ2と定義した。タイプ1は V_1, V_2 が比較的小さい領域に広がり、 V_1 や V_2 が大きくなると、軌道秩序相に隣接してタイプ2の領域が現れることがわかった。ARPESの結果は $N_s = 2$ であることを示唆している。今のモデルでは、軌道の形状から $V_2 > V_1$ と推測され、また、 V_1 や V_2 の大きさは軌道内クーロン相互作用よりもずっと小さいとすると、 V_1 や V_2 を取り入れてもタイプ1となっている可能性が高く、ARPESの結果と矛盾しないことがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

服部一匡, 石飛尊之, 常次宏一: “ユニークな四極子秩序の安定化機構の発見” 固体物理 **57**, 255 (2022).

Y. Matsumoto and T. Hotta: “Effect of Local Jahn–Teller Phonons on Quantum Critical Point in a Two-Orbital Anderson Model” J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 124712 (2022).

T. Ishitobi and K. Hattori: “Triple- Q partial magnetic orders induced by quadrupolar interactions: Triforce order scenario for UNi_4B ” Phys. Rev. B **107**, 104413 (2023).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2022年秋季大会 2022年9月12日(月) – 15日(木)

石飛尊之, 服部一匡: 部分秩序下で現れるフラットバンド系

石飛尊之, 服部一匡: CeCoSi におけるダブル Q 四極子秩序の可能性と異種四極子間結合の役割

● 日本物理学会 2023年春季大会 2023年3月22日(水) – 25日(土) (オンライン開催)

服部一匡: (一般シンポジウム講演) アシンメトリ量子を視る (理論)

● 第1回アシンメトリ量子研究会 2022年8月9日(火) – 10日(水) 大阪大学基礎工学部国際棟シグマホール

石飛尊之, 服部一匡: UNi_4B の新奇秩序変数の提案と四極子自由度の役割

服部一匡: 強相関係におけるエキゾチックな四極子秩序について

国際会議

● 29th International Conference on Low Temperature Physics, 2022年8月18日(木) – 24日(水), Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan

T. Ishitobi and K. Hattori: Novel order parameter for UNi₄B stabilized by quadrupole interaction

K. Hattori and T. Ishitobi: Multipolar multiple- q physics in PrV₂Al₂₀

高エネルギー物理実験研究室

1. 研究活動の概要

高エネルギー物理実験研究室では、日本が世界をリードしている B ファクトリー実験を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、ニュートリノ振動実験などの幅広い物理実験を展開している。

1) Belle 実験, Belle II 実験

高エネルギー加速器研究機構で行われている、世界最高輝度の電子・陽電子衝突型加速器 Super-KEKB を用いた国際共同実験 Belle II に参加している。Belle II 実験は、ルミノシティフロンティアの衝突型加速器実験であり、Super-KEKB 加速器で生成された大量の B 中間子対およびタウ粒子対の崩壊を、衝突点を取り囲むように設置された粒子検出器 Belle II で観測する。Belle II 実験は、2018 年春のビーム衝突開始から 2022 年 5 月までに、積分ルミノシティ 427fb^{-1} のデータを収集し、現在は最初の長期シャットダウンに入って加速器と検出器の改良を行っている。

本研究室では、Belle II 検出器の前方エンドキャップ部において荷電 π 中間子と荷電 K 中間子の粒子識別を担う Aerogel RICH (ARICH) 検出器をこれまで長く開発してきた。ARICH 検出器は、シリカエアロゲル輻射体を荷電粒子が通過する際に放出するチェレンコフ光を位置分解能をもつ光検出器 HAPD で検出し、その位置情報（ヒットパターン）から粒子識別を行う、リングイメージング型のチェレンコフ検出器である。ARICH 検出器の粒子識別性能は、検出される光子の位置の精度に大きく左右される。粒子識別性能を最大限引き出すために、Belle II 実験で蓄積されたビームデータを用いた ARICH 検出器のアライメントを行っている。本年度は、新しいアルゴリズムを用いた ARICH 検出器のアライメントによる粒子識別の性能の向上の定量的な評価を行った。

現在の ARICH 検出器の性能向上の研究と並行して、将来の ARICH 検出器の高度化に向けた研究開発も進めている。とくに、ARICH 検出器で用いている光検出器に代わる新しい光検出器の開発に取り組んでいる。その光検出器の候補として、シリコン光電子増倍管 (SiPM) の検討を行っている。SiPM は中性子に対する耐性が懸念されており、J-PARC の中性子中間子実験施設における中性子照射試験を 2020 年 2 月に行った。本年度はそのデータの解析進め、SiPM をアニーリングすることにより、中性子による損傷を一定程度緩和出来ることを確認した。

現在の Super-KEKB 加速器では、突然ビームが失われて Belle II 検出器やビーム衝突点付近の超伝導電磁石に大きな被爆を生じさせる問題があり、ルミノシティ向上を阻む大きな要因になっている。本研究室では、この問題に取り組むプロジェクトにも参加している。Belle II 検出器に大きな被爆を生じさせる前にビームを正常に破棄するためのビームアポートシステムの高速化に取り組んでおり、本年度は大気中レーザーを用いたビームアポート信号伝達システムの開発を開始した。

2) ATLAS 実験

ATLAS 実験は、ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) で行われている衝突型加速器実験であり、LHC 加速器によって世界最高エネルギーで陽子と陽子を衝突させ、ヒッグス粒子の性質を調べたり、超対称性理論などの標準模型を超えた新物理の探索を行っている。LHC 加速器は 2022 年度に Run3 と呼ばれる重心エネルギー 13.6TeV での運転を開始した。2025 年末から長期シャットダウンを行い、2029 年から高ルミノシティでの実験 (HL-LHC) を開始する計画である。

本研究室は、HL-LHC での実験に用いられる予定の、ATLAS 検出器最内層で飛跡検出を行う ITk (Inner Tracker) の開発に参加している。ITk は、シリコン・ピクセル検出器に電子回路基板が取り付けられた構造をしており、各国で約 10,000 個の検出器モジュールを製作する。2023 年度から始まる予定の ITk

モジュール量産に備え、組立て過程における各種検査の情報を登録するデータベースのグラフィカル・インターフェース開発を行った。

3) T2K 実験

茨城県東海村の J-PARC で生成した大強度ニュートリノビームを、直線距離で 295km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器で検出する長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験に参加している。T2K 実験は、ニュートリノを生成するニュートリノビームライン、生成したニュートリノを測定する前置検出器、および 295km の飛行後のニュートリノを観測するスーパーカミオカンデの 3 つの構成要素から成り立っており、本研究室では、とくにニュートリノビームラインおよび前置検出器に関係した研究に参加している。T2K 実験では、ミューニュートリノが 295km の飛行中に電子ニュートリノに変化する現象を 2013 年に発見し、現在は、それらの事象を用いてニュートリノの CP 対称性（粒子と反粒子の対称性）の破れの探索を行っている。

CP 対称性の破れを発見するためには、統計誤差とともに系統誤差も大きく削減していく必要があり、系統誤差の一つであるニュートリノと物質との相互作用の不定性の削減を目指した、前置検出器のアップグレードに参加している。アップグレードされる検出器の一つとして、 1cm^3 角のシンチレータキューブを約 200 万個積み重ね、ニュートリノ反応を 3 次元的に捉える新しい検出器 SuperFGD の開発に本研究室では取り組んでいる。本研究室では、SuperFGD の光信号の読み出しに用いる約 6 万本の波長変換ファイバーおよび約 6 万個の光検出器の健全性を調べるためのキャリブレーションシステムの開発に取り組んでいる。キャリブレーションシステムは 93 個のモジュールからなる。本年度はキャリブレーションシステムの最終的な仕様を固めて、予備を含めた 110 個のモジュールの量産を行った。さらに、量産したモジュールの品質確認を行い、SuperFGD へのインストールを完了した。

4) 宇宙線ミュオンを用いた大規模構造物の透視

地上に飛来する宇宙線ミュオンを用いて大規模な物体を透視する研究を進めている。これまで高エネルギー加速器研究機構および筑波大学と共同で、原子炉の透視を行う研究を進めてきた。国際廃炉研究機構および東京電力が行なっている福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの一つとして、溶融したと考えられる一号機から三号機の原子炉の炉心の核燃料の状態の調査に協力し、これまでに、福島第一原発 1 号機および 3 号機の炉心の状態の調査を行ない、一連の調査を行ってきた。現在は岩手大学および岩手県立大学などと共同で岩手山の観測を進めており、本年度も引き続き 2 台体制で岩手山の観測を行った。また、新たに、茨城県東海村、J-PARC、および茨城大と共同で、東海村の古墳（舟塚 2 号墳）の透視を行うプロジェクトを開始した。

2. 研究業績

1) 論文

J. Borah *et al.* (Belle Collab.), “Search for the decay $B_s^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.5, L051101

J. F. Krohn *et al.* (Belle Collab.), “Measurements of the branching fractions $\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \pi^-)$ and $\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} K^-)$ and tests of QCD factorization”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.1, 012003

D. Wang *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the mass and width of the $\Lambda_c(2625)^+$ charmed baryon and the branching ratios of $\Lambda_c(2625)^+ \rightarrow \Sigma_c^0 \pi^+$ and $\Lambda_c(2625)^+ \rightarrow \Sigma_c^{++} \pi^-$ ”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, 032008

- Y. Ma *et al.* (Belle Collab.), “First Observation of $\Lambda\pi^+$ and $\Lambda\pi^-$ Signals near the $\bar{K}N(I=1)$ Mass Threshold in $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+\pi^+\pi^-$ Decay”, Phys. Rev. Lett. **130** (2023) no.15, 151903
- F. Meier *et al.* (Belle Collab.), “First observation of $B \rightarrow \bar{D}_1(\rightarrow \bar{D}\pi^+\pi^-)\ell^+\nu_\ell$ and measurement of the $B \rightarrow \bar{D}^{(*)}\pi\ell^+\nu_\ell$ and $B \rightarrow \bar{D}^{(*)}\pi^+\pi^-\ell^+\nu_\ell$ branching fractions with hadronic tagging at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.9, 092003
- G. Gong *et al.* (Belle Collab.), “Study of $e^+e^- \rightarrow \Sigma^0\bar{\Sigma}^0$ and $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-$ by initial state radiation method at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.7, 072008
- L. K. Li *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of branching fractions of $\Lambda_c^+ \rightarrow pK_S^0K_S^0$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow pK_S^0\eta$ at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, 032004
- X. Han *et al.* (Belle Collab.), “Evidence for the singly Cabibbo-suppressed decay $\Omega_c^0 \rightarrow \Xi^-\pi^+$ and search for $\Omega_c^0 \rightarrow \Xi^-K^+$ and Ω^-K^+ decays at Belle”, JHEP **01** (2023), 055
- M. Kumar *et al.* (Belle Collab.), “Search for rare decays $B^+ \rightarrow D_s^{(*)+}\eta$, $D_s^{(*)+}\bar{K}^0$, $D^+\eta$, and D^+K^0 ”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, L031101
- L. K. Li *et al.* (Belle Collab.), “Search for CP violation and measurement of branching fractions and decay asymmetry parameters for $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda h^+$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 h^+(h = K, \pi)$ ”, Sci. Bull. **68** (2023), 583-592
- Y. Seino *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of two-photon decay width of $\chi_{c2}(1P)$ in $\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c2}(1P) \rightarrow J/\psi\gamma$ at Belle”, JHEP **01** (2023), 160
- S. Choudhury *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the B^+/B^0 production ratio in e^+e^- collisions at the $\Upsilon(4S)$ resonance using $B \rightarrow J/\psi(\ell\ell)K$ decays at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, L031102
- Y. Li *et al.* (Belle Collab.), “First search for the weak radiative decays $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+\gamma$ and $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^0\gamma$ ”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, 032001
- C. L. Hsu *et al.* (Belle Collab.), “Angular analysis of the low K^+K^- invariant mass enhancement in $B^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+$ decays”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, 032013
- Y. C. Chen *et al.* (Belle Collab.), “Two-particle angular correlations in e^+e^- collisions to hadronic final states in two reference coordinates at Belle”, JHEP **03** (2023), 171
- J. H. Yin *et al.* (Belle Collab.), “Search for $X(3872) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.5, 052004
- Y. B. Li *et al.* (Belle Collab.), “Evidence of a New Excited Charmed Baryon Decaying to $\Sigma_c(2455)^{0,++}\pi^\pm$ ”, Phys. Rev. Lett. **130** (2023) no.3, 031901
- S. S. Tang *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the branching fraction of $\Xi_c^0 \rightarrow \Lambda_c^+\pi^-$ at Belle”, Phys. Rev. D **107** (2023) no.3, 032005
- I. Adachi *et al.* (Belle II Collab.), “Search for Lepton-Flavor-Violating τ Decays to a Lepton and an Invisible Boson at Belle II”, Phys. Rev. Lett. **130**, no.18, 181803 (2023)

F. Abudinén *et al.* (Belle II Collab.), “Search for a Dark Photon and an Invisible Dark Higgs Boson in $\mu^+\mu^-$ and Missing Energy Final States with the Belle II Experiment”, *Phys. Rev. Lett.* **130**, no.7, 071804 (2023)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021”, *JINST* **17**, no.10, P10028 (2022)

I. Alekseev, T. Arihara, V. Baranov, L. Bartoszek, L. Bernardi, A. Blondel, A. V. Boikov, M. Buizza-Avanzini, F. Cadoux and J. Capó, *et al.* “SuperFGD prototype time resolution studies”, *JINST* **18**, no.01, P01012 (2023)

2) 学会講演

● 日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 6 日～8 日（岡山理科大学（岡山キャンパス））

本橋完太, 角野秀一, 汲田哲郎, 住吉孝行, 米永匡伸, 鶴藤昌人, 渡辺啓太, 他
Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレードに向けた光検出器 MPPC の放射線耐性の評価 2

● 日本物理学会 2023 年春季大会 2023 年 3 月 22 日～25 日（オンライン）

北村和樹, 角野秀一, 他
SuperKEKB 加速器におけるビームアポート高速化に向けた基礎研究

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

反応物理化学研究室と毎週合同ミーティングを開いて情報交換を行いつつ、理化学研究所の東原子分子物理研究室との共同研究体制を維持しながら、研究室の独自性を保った研究とのバランスを取って、イオン衝突を中心とした原子・分子物理学の実験的研究を精力的に推進している。

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程と分光研究

静電型イオン蓄積リングは、静電場のみを用いて周回イオンの軌道制御を行うため、周回イオン種の質量に関する制限がないという特徴を持つ。本学に設置された TMU E-ring は世界で三番目に開発された静電型イオン蓄積リングであり、主に分子イオンおよびクラスターイオンについて、内部エネルギーの緩和過程、すなわち冷却過程の研究を行ってきた。加えて、近年ではレーザー分光に関する研究も精力的に行っている。昨年度から京大の馬場正昭名誉教授のお力添えにより、新たに色素レーザーを導入し、これまで出来なかった2色2光子による特定の電子状態へのアプローチが可能となり、垂直入射によるドップラーフリーで分光スペクトルの測定も可能となった。

1-a) 炭素・シリコンクラスター負イオン 本研究室では、レーザーアブレーション法によって生成した高温の直鎖状炭素クラスター負イオンの冷却過程について、系統的な研究を行ってきた。電子親和力より高い内部エネルギーを持った負イオンは電子脱離を起こし、また、振動状態の遷移に伴う赤外線放出によって冷却される振動輻射冷却は広い内部エネルギー領域において主要な冷却機構である。近年、これに加えて、電子基底状態の高振動励起状態から逆内部転換によって電子励起状態に遷移し、そこから蛍光を放出することで冷却が急速に進む再帰蛍光という過程が見いだされた。以前から静電型イオン蓄積リングを周回中の負イオンに対してレーザーを照射することで電子脱離閾値をわずかに超える状態へと励起し、照射時間とレーザー波長を変えながら生成する中性粒子を観測することで、内部エネルギー状態分布を測定する手法を編み出していた。しかし、 C_4^- および C_6^- に関する実験データとシミュレーション結果は全く一致せず、定性的な議論すら不十分だった。そこで振動冷却速度と再帰蛍光放出速度を補正する係数を導入したところ、十分な精度で実験結果を再現することに成功し、冷却過程のモデリングがほぼ確立したと言える。昨年度から、 C_4^- および C_6^- の研究から確立された手法を用いて、より複雑な C_n^- ($n > 6$) の冷却速度を測定する実験を開始した。今年度は C_n^- , $n=27$ までの炭素クラスター負イオンの輻射冷却速度を網羅的に測定した。さらに、 C_7^- の遅延電子脱離の速度定数を実験的に決定することに成功し、実験値と理論値に2桁ずれがあることを見出した。最近、共同研究者の協力により、このずれは理論計算において状態密度を非調和振動ではなく調和振動子モデルで計算していることが主な要因であることが判明している。本研究により非調和振動子で計算することの重要性を示すことができた。シリコンクラスター負イオン Si_n^- については、従来よりも大きな $n=10$ までのクラスターを生成する方法を確立し、それぞれ冷却速度の測定を行った。現在、これらの結果を元に共同研究者の方が理論計算をしている。

1-b) 二原子分子負イオンの振動回転励起スペクトルの測定 本研究室の先行研究から、 $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移の強度分布が他の遷移に対して極めて低いことが明らかとなった。この現象を解明するために、先行研究よりも広範囲の領域を波長走査し、各回転準位における電子脱離収量を計測した。さらに、PGOPHER を用いて得られたシミュレーション結果を比較することで、各回転線の回転準位の同定と共に、実験と理論の強度比を算出した。加えて、状態密度のバランス理論から得られる関係式を用いて、実験結果をフィッティングすることで、 C_2^- の $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移の電子

脱離速度を見積った。B($v = 5$)とB($v = 6$)における回転線の強度の差は、電子脱離と蛍光放出の競合によるものだと考えられる。今年度から電子脱離速度を正確に測定するために、 $X^2\Sigma_g^+ \rightarrow B^2\Sigma_u^+$ の分光スペクトルの測定を開始した。

2) 多価イオンの電荷移行反応

中性原子から複数の電子を剥ぎ取ることで生成される多価イオンは、高い内部エネルギーを有するために中性の物質とは非常に激しい反応を起こす。そのダイナミクスは原子衝突物理学の重要な研究対象であるが、一方で、重原子については多価イオンの原子分光学的データは非常に乏しく、応用的な分野からの基礎データの要求に対して十分に答えられない状況が続いている。本研究室では電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance, ECR) 型多価イオン源を用いて様々な原子の多価イオンビームを生成し、衝突ダイナミクスと原子分光という二つの視点での研究を推進している。但し、2021年12月に発生した火災のために半年以上の停電期間があり、その間に複数箇所の装置故障が起きて長期に亘って復旧作業を行う必要があった。そのため、新しい実験的成果が極めて乏しい1年間となってしまった。

2-a) 連星中性子星合体による重元素合成過程 連星中性子星合体におけるrプロセスによる重元素合成を理解するため、圧倒的に不足している多価重イオンの原子分光学的データを取得する共同研究を東北大・電通大・核融合研と進めている。理論シミュレーションによる予想によれば、可視・赤外発光にはランタノイドの寄与が大きいとされているため、ランタノイドの1つであるErについて実験を行っている。今年度は新たな測定が全くできなかったが、これまでの測定データの解析を進めて、3価のErイオンの可視領域の遷移波長について同定を行った。Er³⁺の基底電子配置は4f¹¹で閉殻であるため、多数の微細構造準位が存在し、1電子励起状態である4f¹⁰nl配置の多数の微細構造準位との間の光学遷移は膨大な数になる。EUV領域の発光に関する論文に掲載されていた電子状態エネルギーのデータを用いて、6本の遷移の同定を行った。また、都立大での実験が全くできなかった時期には、電気通信大学・レーザー新世代研究センターにおいて数年前から実施されているレーザー誘起ブレイクダウン分光 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) の実験に参加し、1価Laイオンの可視領域での数本の発光について遷移速度の決定を行った。

2-b) EUV 分光における標的からの発光断面積測定 昨年度までに、精度の高い裸のイオンやHe様イオンとHe原子との電荷移行断面積の理論計算値から発光断面積を求め、実測スペクトルの輝線強度と比較することによって、斜入射型極端紫外分光器の検出効率を決定する方法論を確立した。この手法を用いて、5価から10価までのArイオンとHeとの電荷移行衝突によって生成した励起He⁺の1s-2p遷移 (波長: 30.38 nm) の発光断面積を系統的に測定したところ、7-8価入射の場合の断面積が、より低価数およびより高価数の場合に比べて大きなことが判明した。この結果は、reaction windowという概念に基づく近似的なポテンシャル交差モデルによる予想と一致しており、定性的にはそのメカニズムを理解することができた。

2-c) 電子ビームイオントラップへの中性水素原子ビーム入射システムの開発 狭い空間に閉じ込めた水素様多価イオンに中性水素原子ビームを入射して電荷移行反応を起こさせ、生成したHe様イオンの励起状態からの共鳴遷移・異重項間遷移・禁制遷移を全て同じ効率で検出することができれば、電荷移行反応によって生成したHe様イオンの一重項と三重項の比が求められる筈である。そこで、電通大レーザー研に設置されている電子ビームイオントラップを用いた実験を計画し、マイクロ波放電型プラズマイオン源で生成した大強度H⁺ビームを、希薄なCH₄で満たした気体セルの中で近共鳴電荷移行反応によって効率的に中性化することで、高速中性水素原子ビームを生成する装置の開発を行っている。この研究は、CH₄の垂直イオン化エネルギーがH原子のイオン化エネルギーと一致するという事実に基づ

いたことから始まった。多くの高速中性原子ビーム生成で負イオンビームの光電子脱離が採用されているのは、正イオンの電荷移行反応で励起状態が生成することを嫌っているためである。しかし、近共鳴過程では励起状態の生成は無視できる。今年度は放電型イオン源で生成した H^+ ビームを静電レンズによって細い平行ビームに成形した後、希薄な CH_4 ガスを満たした長いガスセルを通過させることで、疑似共鳴型電荷移行反応によって効率的な中性化を行い、高強度の中性水素原子ビームの生成に成功した。

3) 超流動ヘリウム液滴を用いた冷却分子イオン生成

高圧ノズルから He 気体を噴出させると 0.4 K の He 液滴が生成する。この液滴は超流動性を示し、衝突した分子を内部に容易に取り込む性質を持っている。この性質を利用して冷却された分子イオンを生成することを目的にし、理化学研究所において実験を行っている。今年度は、アニリン分子を内包させた He 液滴を電子衝撃することでアニリンをイオン化し、赤外レーザー照射によって解離生成したアニリンイオン強度を測定してその波長依存性から、分子イオンの振動励起を観測することに成功し、He 液滴内での分子イオンの振動状態のエネルギーが孤立気相状態からわずかにだけシフトしてことを見いだした。

4) 次世代アストロケミストリー

原始惑星系形成領域における多様な化学組成とその進化過程を、ALMA 望遠鏡による観測、はやぶさ 2 が採取した小惑星リュウグウのサンプル分析、理論計算・シミュレーション、気相および固体表面での反応素過程実験、などの情報を合わせて総合的に理解することを目指して学術変革領域研究 (A) 「次世代アストロケミストリー：素過程理解に基づく学理の再構築」が 2020 年 12 月に発足した。このプロジェクトにおいて、イオン移動管法を用いてイオン-分子反応の速度定数および反応分岐比の測定を行うためには、これまで用いてきた He 気体では宇宙化学的に興味ある反応が起こらないため、星間分子雲の主成分である水素分子気体を用いることにした。まずは既存の装置を用いて、電子衝撃イオン源によって生成した H_2^+ を冷却された希薄な H_2 気体に入射したところ、イオン-分子反応によって生成した H_3^+ だけでなく、三体結合反応によって H_2 が結合した H_5^+ , H_7^+ , および H_9^+ が観測された。 H_3^+ は化学進化において極めて重要な分子イオンであり、正三角形構造を取ることが知られている。ところが、今回の実験では 2 つの状態が観測され、その一つは直線型の H_3^+ である可能性が高いと考えられる。直線型については理論予想はあるものの、実測されたことはなく、星間分子内での分子進化を正しく理解する上で意味のある発見の可能性があるため、さらに詳細な実験的検討を進めている。 H_3^+ は非常に小さな分子イオンであることから、高精度な理論計算が期待できるため、学術変革領域研究 (A) の理論班との連携研究を進めている。また、 H_3^+ 以上の大きなクラスターイオンは低電場領域でのみ観測されるものの、その移動度はクラスターのサイズには依存せず同じ値を取ることが判った。これは従来の気体中のイオン移動度に関する理論では説明することができない現象であり、単純な三体結合反応によるクラスター生成と衝突解離が化学平衡状態にあるとする単純なモデルだけでは理解するのが難しい。今後も異なるイオンを凝集核とした水素クラスターイオンについて実験的研究を進めていく必要があると考え、装置改造を含めた検討を行っている。

2. 研究業績

1) 論文

S. Iida, W. Hu, R. Zhang, H. Tanuma, K. Masuhara, P. Ferrari, H. Shiromaru, T. Azuma and K. Hansen: Thermal radiative cooling of carbon cluster cations C_N^+ , $N = 9, 11, 12, 17-27$, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **514**, 844-851 (2022).

Y. Nishimura, S. Imaizumi, H. Tanuma, N. Nakamura, Y. Sekiguchi, S. Wanajo, H. A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, M. Tanaka and G. Gaigalas: Charge exchange spectroscopy of multiply charged erbium ions, *Atoms*, **11**, 40 (2023).

2) 学会講演

● 第 10 回イオン移動度研究会 2022 年 4 月 16 日 (オンライン開催)

星野琢郎, 田沼肇: 水素気体中のイオン移動度測定

● 原子衝突学会第 47 回年会 2022 年 9 月 8 日-9 日 (宮崎大学・木花キャンパス)

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行: 極低温に冷却された孤立分子イオンの赤外振動分光に向けた開発

岩田昌幸, 田中雅臣, 加藤太治, 田沼肇, 中村信行: レーザー誘起ブレイクダウン分光によるランタンイオンの遷移確率の測定

浅野裕哉, 中村信行, 坂上裕之, 飯田進平, 田沼肇: 高速中性水素原子ビーム源の開発

片岡健太郎, 飯田進平, 久間晋, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, Piero Ferrari, Klavs Hansen: レーザーアブレーションによるシリコンクラスター負イオン生成条件の検討

田上祐輝, 飯田進平, 久間晋, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: C_7^- の電子脱離速度の決定

伊藤拓哉, 今泉咲希, 宇井諒, 田沼肇: 液体窒素温度の H_2 気体中における H_3^+ および H_5^+ の移動度

● 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022 年 9 月 20 日-23 日 (東北大学・川内北キャンパス)

神野智史, 藤田奈津子, 田沼肇: 同重体干渉抑制のためのイオントラップ反応セルの開発

● 第 23 回 AMS シンポジウム 2022 年 12 月 1 日 (山形大学)

神野智史, 藤田奈津子, 田沼肇: 塩素-36 年代測定における同重体干渉抑制のためのイオントラップ反応セルの開発

● 核融合科学研究所 2022 年合同素過程研究会 2022 年 12 月 21 日-23 日 (オンライン開催)

田沼肇: 電荷移行断面積の理論値を用いた斜入射分光器の感度較正

● 次世代アストロケミストリー第 3 回領域全体集会 2023 年 3 月 7 日-9 日 (東京大学・本郷キャンパス)

田沼肇, 今泉咲希, 伊藤拓哉, 宇井諒: イオン移動度測定による直線型 H_3^+ の観測

● 日本物理学会 2023 年春季年会 2023 年 3 月 22 日-25 日 (オンライン開催)

田沼肇, 今泉咲希, 伊藤拓哉, 宇井諒: 低温水素気体中におけるイオンに移動度 I

田沼肇, 今泉咲希, 伊藤拓哉, 宇井諒: 低温水素気体中におけるイオンに移動度 II

国際会議

● 20th International Conference on the Highly Charged Ions, Matsue, Japan, 29 August–3 September, 2022

Y. Nishimura, S. Imaizumi, H. Tanuma, N. Nakamura, Y. Sekiguchi, S. Wanajo, H.A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, M. Tanaka, and G. Gaigalas: Charge exchange spectroscopy of multiply charged erbium ions

● Symposium on Next Generation Astrochemistry, Hongo, Tokyo, 29 November–2 December, 2022

H. Tanuma, T. Hoshino, S. Imaizumi, T. Ito, and R. Ui: Ion mobility and ion-molecule reactions in cooled hydrogen gas

● 14th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, online, 13–17 February, 2023

H. Tanuma, S. Imaizumi, T. Ito, and R. Ui: Mobility and reaction of drifting ions in cooled hydrogen gas

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、(1) X線を観測手段とした銀河団、中性子星、白色矮星、太陽系等の、多様な宇宙における高エネルギー現象の解明と、(2) 宇宙X線観測のための衛星に搭載する望遠鏡やX線マイクロカロリメータ等の装置開発の2つを柱として活動を行っている。今年度は、観測的研究では地球磁気圏、彗星、矮新星、Wolf Rayet星に関する研究を進めた。装置開発では、X線精密分光観測を主目的とするX線天文衛星XRISMに搭載するマイクロカロリメータの中心的役割を果たすと共に、地球磁気圏のX線によるグローバル撮像を行うGEO-X衛星を中心となって推進した。その他にも広視野を観測可能なLobster eye光学系の独自手法による製作評価や新しいX線偏光計の開発を進めた。

1) 「すざく」等の衛星データを用いた多様な高エネルギー現象の研究

既存の衛星データを活用した宇宙高エネルギー現象研究として、地球磁気圏周辺で生じる太陽風と地球高層大気との電荷交換反応による発光現象の解明に向けた新たなモデル構築を行った。本モデルは磁気圏構造、衛星軌道、視野、太陽風情報を取り込んだ従来にないもので、「すざく」衛星で観測した代表的発光現象と比較して、OVII輝線の絶対強度や分オーダーの短時間変動の再現に成功した。

分子雲に埋もれた大質量星の形成領域中の星風の衝撃波に起因すると考えられる広がった放射についても研究した。広がった放射に最高感度を持つ「すざく」と点源感度が高いChandra衛星のデータを併用することでRCW 38領域の広がった放射を定量化し、他の領域のデータとも比較することで分子雲密度が高いほど高温プラズマや非熱的放射が生じるという傾向を見出した(図1)。これは数十年にわたり成因が謎であった本放射の解明に繋がる。

その他にも矮新星の鉄輝線のスペクトルフィットを用いた放射領域の制約や、Wolf Rayet星の時間変動を用いた衝撃波面の幾何学形状の研究、彗星コマと太陽風の衝突発光を用いたコマの化学組成制約といった新たな成果も得られた。これらは将来衛星の観測に繋がる。

2) X線天文衛星XRISMの開発

日本の次期フラッグシップX線天文台であり、2023年度の打ち上げを目指している。搭載装置であるX線マイクロカロリメータResolve(図2)は、X線光子の光電吸収による素子の温度上昇を測定することで、分光能力の飛躍的な向上が可能であり、都立大が大きく開発に貢献してきた。2022年度は装置を衛星に搭載した装置の性能評価及び射場である種子島への輸送と輸送後のヘルスチェックを行い問題がないことを明らかにした。並行して打ち上げオペレーションおよび軌道上データ解析を含めた準備を行い、打ち上げ後の準備も整えた。打ち上げ後のチェックアウト後は開発チームによる天体観測が予定されており、都立大が中心となって提案した彗星や木星がターゲットとして含まれる。電荷交換反応を始めとした宇宙での新しいプロセスや現象を明らかにする。

3) 地球磁気圏X線撮像衛星GEO-Xの開発

世界初の地球磁気圏のX線によるグローバル撮像を目指す超小型衛星であり、2024-25年頃の打ち上げを目指している。広視野・軽量望遠鏡と高速読み出しのCMOSS検出器を組み合わせた小型でありながら広がった放射に「すざく」並の高感度を持つX線撮像分光装置を搭載する。都立大は中心組織として全体マネジメントと望遠鏡開発を担当しており、2022年度は観測装置の試作と性能評価、衛星の詳細設計と姿勢制御系の開発、推進系の真空チェンバー内での性能評価を行って、フライトモデルの準備

を整えた。同時に MHD シミュレーションを用いた X 線発光強度予測や衛星軌道や視野を考慮した観測シミュレータの構築といったサイエンスの検討も大きく進んだ。

4) 新しい放射線計測装置の開発

次世代の宇宙 X 線観測を目指した観測装置の高性能化に取り組んだ。宇宙観測に必須でありながら重量と角度分解能にトレードオフ関係が知られている望遠鏡について、マイクロマシン技術を用いた独自の微細穴光学系を開発している。Si 基板のドラエッチング等の微細加工により製作するもので、長時間の水素アニールと化学機械研磨の併用により従来の X 線望遠鏡並の結像性能を達成すると共に軟 X 線に高い反射率を持つ Co の成膜に成功して、プレスリリースも行った。

より高角度分解能を目指す方式として Si 基板の高温塑性変形による手法も開発した。Si 基板を変形治具に挟み込み高温でプレス変形する方法であり、従来は 1 枚ずつの変形であったが、バッファー基板を挟み込むことで複数枚の同時変形に成功した。さらに同技術を応用した独自の X 線偏光計の開発や Schmidt 配置 Lobster eye 光学系の製作プロセスの改良にも成功した。

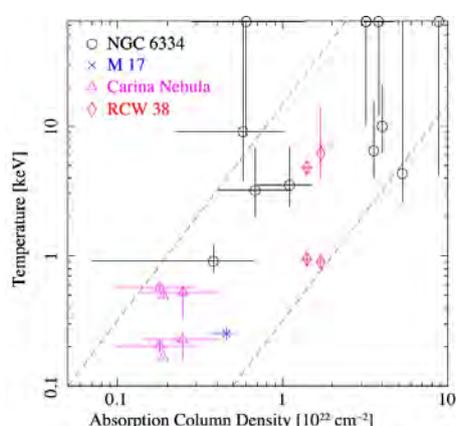


図 1: 星形成領域 RCW 38 の星間吸収と温度の関係 (Fukushima et al. 2023, Figure 9)

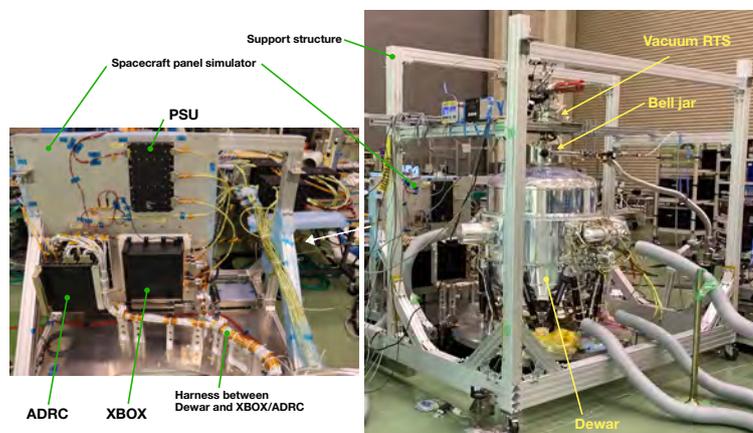


図 2: 筑波宇宙センターで実施した、XRISM 衛星搭載 Resolve 検出器の地上試験の写真 (Ishisaki et al. 2022, Figure 7).

2. 研究業績

1) 論文

Fukushima, Aoto; Ishi, Daiki; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Numazawa, Masaki; Sakuda, Sae; Uchino, Tomoki; Inagaki, Ayata; Ueda, Yoko; Morishita, Hiromi; Sekiguchi, Luna; Murakawa, Takatoshi; Tsuji, Yukine; Mitsuda, Kazuhisa; Kanamori, Yoshiaki: “Improvement of imaging performance of silicon micropore X-ray optics by ultra long-term annealing”, *Optics Express*, vol. 30, issue 14, p. 25195, DOI: 10.1364/OE.459774 (July 2022)

Miyamoto, Asca; Sugawara, Yasuharu; Maeda, Yoshitomo; Ishida, Manabu; Hamaguchi, Kenji; Corcoran, Michael; Russell, Christopher M. P.; Moffat, Anthony F. J.: “Understanding the physical state of hot plasma formed through stellar wind collision in WR140 using high-resolution X-ray spectroscopy”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 513, Issue 4, pp.6074-6087, DOI: 10.1093/mnras/stac1289 (July 2022)

Ishisaki, Yoshitaka; Kelley, Richard L.; Awaki, Hisamitsu; Balleza, Jesus C.; Barnstable, Kim R.; Bialas, Thomas G.; Boissay-Malaquin, Rozenn; Brown, Gregory V.; Canavan, Edgar R.; Cumbee, Renata S.; Carnahan, Timothy M.; Chiao, Meng P.; Comber, Brian J.; Costantini, Elisa; den Herder, Jan-Willem; Dercksen, Johannes; de Vries, Cor P.; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Ezoe, Yuichiro; Ferrigno, Carlo; Fujimoto, Ryuichi; Gorter, Nathalie; Graham, Steven M.; Grim, Martin; Hartz, Leslie S.; Hayakawa, Ryota; Hayashi, Takayuki; Hell, Natalie; Hoshino, Akio; Ichinohe, Yuto; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; James, Bryan L.; Kenyon, Steven J.; Kilbourne, Caroline A.; Kimball, Mark O.; Kitamoto, Shunji; Leutenegger, Maurice A.; Maeda, Yoshitomo; McCammon, Dan; Miko, Joseph J.; Mizumoto, Misaki; Okajima, Takashi; Okamoto, Atsushi; Paltani, Stephane; Porter, Frederick S.; Sato, Kosuke; Sato, Toshiki; Sawada, Makoto; Shinozaki, Keisuke; Shipman, Russell; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Soong, Yang; Szymkiewicz, Richard; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tamura, Keisuke; Tsujimoto, Masahiro; Uchida, Yuusuke; Wasserzug, Stephen; Witthoef, Michael C.; Wolfs, Rob; Yamada, Shinya; Yasuda, Susumu: “Status of resolve instrument on-board X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121811S, DOI: 10.1117/12.2630654 (August 2022)

Sato, Kosuke; Yamasaki, Noriko Y.; Yamada, Shinya; Mitsuishi, Ikuyuki; Ichinohe, Yuto; Omami-uda, Hajime; Uchida, Yuusuke; Mitsuda, Kazuhisa; Nagai, Daisuke; Yoshikawa, Kohji; Osato, Ken; Matsushita, Kyoko; Fujita, Yutaka; Ishisaki, Yoshitaka; Ezoe, Yuichiro; Ishida, Manabu; Maeda, Yoshitomo; Kawai, Nobuyuki; Fujimoto, Ryuichi; Tsuru, Takeshi G.; Ota, Naomi; Nakashima, Yuki: “Super DIOS for exploring dark baryon”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 1218123, DOI: 10.1117/12.2629066 (August 2022)

Ezoe, Yuichiro; Funase, Ryu; Nagata, Harunori; Miyoshi, Yoshizumi; Nakajima, Hiroshi; Mitsuishi, Ikuyuki; Ishikawa, Kumi; Kawabata, Yosuke; Nakajima, Shintaro; Kamps, Landon; Numazawa, Masaki; Yoneyama, Tomokage; Hagino, Kouichi; Matsumoto, Yosuke; Hosokawa, Keisuke; Kasahara, Satoshi; Hiraga, Junko; Mitsuda, Kazuhisa; Fujimoto, Masaki; Ueno, Munetaka; Yamazaki, Atsushi; Hasegawa, Hiroshi; Mitani, Takefumi; Kawakatsu, Yasuhiro; Iwata, Takahiro; Koizumi, Hiroyuki; Sahara, Hironori; Kanamori, Yoshiaki; Morishita, Kohei: “GEO-X (GEOspace X-ray imager)”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 1218124, DOI: 10.1117/12.2629107 (August 2022)

Nakajima, Hiroshi; Nakamura, Shotaro; Hagino, Koichi; Kiuchi, Ayumi; Matsumoto, Takuya; Yamagami, Tohya; Yoneyama, Tomokage; Hiraga, Junko S.; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi: “Development of the focal-plane CMOS detector for the GEO-X mission”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121812C, DOI: 10.1117/12.2628788 (August 2022)

Ueda, Y.; Uchino, T.; Ishi, D.; Ezoe, Y.; Ishikawa, K.; Numazawa, M.; Fukushima, A.; Sakuda, S.; Inagaki, A.; Morishita, H.; Sekiguchi, L.; Murakawa, T.; Tsuji, Y.; Mitsuda, K.; Morishita, K.; Nakajima, K.: “Development of Bragg reflection-type x-ray polarimeter based on a bent silicon crystal using hot plastic deformation”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121812O, DOI: 10.1117/12.2629635 (August 2022)

Ishikawa, Kumi; Murakawa, Takatoshi; Ishi, Daiki; Numazawa, Masaki; Fukushima, Aoto; Sakuda, Sae; Uchino, Tomoki; Inagaki, Ayata; Morishita, Hiromi; Ueda, Yoko; Sekiguchi, Luna; Tsuji, Yukine;

Ezoe, Yuichiro: “Collimator of the ultra-lightweight x-ray telescope for the GEO-X mission”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121816O, DOI: 10.1117/12.2631464 (August 2022)

Numazawa, Masaki; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Ishi, Daiki; Fukushima, Aoto; Sakuda, Sae; Uchino, Tomoki; Inagaki, Ayata; Morishita, Hiromi; Ueda, Yoko; Murakawa, Takatoshi; Sekiguchi, Luna; Tsuji, Yukine; Mitsuishi, Ikuyuki; Nakajima, Hiroshi; Kanamori, Yoshiaki; Morishita, Kohei; Mitsuda, Kazuhisa: “Ultra-lightweight x-ray telescope fabricated with multiple MEMS technologies for GEO-X mission”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121815G, DOI: 10.1117/12.2630501 (August 2022)

Mizumoto, Misaki; Tsujimoto, Masahiro; Cumbee, Renata S.; Eckart, Megan E.; Ishisaki, Yoshitaka; Kilbourne, Caroline A.; Hodges-Kluck, Edmund; Leutenegger, Maurice A.; Porter, Frederick S.; Sawada, Makoto; Takei, Yoh; Uchida, Yuusuke; Yamada, Shin'ya: “High count rate effects in event processing for XRISM/Resolve x-ray microcalorimeter”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121815Z, DOI: 10.1117/12.2628784 (August 2022)

Omama, Tomoki; Tsujimoto, Masahiro; Sawada, Makoto; Kilbourne, Caroline A.; de Vries, Cor; Eckart, Megan E.; Ishisaki, Yoshitaka; Kitamoto, Shunji; Leutenegger, Maurice A.; Porter, Frederick S.; Wolfs, Rob: “Relative timing calibration of the Resolve x-ray microcalorimeter onboard XRISM using the modulated x-ray source”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 1218162, DOI: 10.1117/12.2629753 (August 2022)

Imamura, Ryuta; Tsujimoto, Masahiro; Awaki, Hisamitsu; Chiao, Meng P.; Fujimoto, Ryuichi; Ishisaki, Yoshitaka; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Porter, Frederick S.; Sawada, Makoto; Sneiderman, Gary A.; Takei, Yoh; Yamada, Shinya: “Results of accelerometer monitor in the ground testing of Resolve x-ray microcalorimeter instrument onboard XRISM”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12191, id. 121912C, DOI: 10.1117/12.2629773 (August 2022)

Sato, K.; Yamasaki, N. Y.; Ishida, M.; Maeda, Y.; Mitsuda, K.; Ishisaki, Y.; Fujita, Y.; Ezoe, Y.; Mitsuishi, I.; Tawara, Y.; Osato, K.; Kawai, N.; Matsushita, K.; Nagai, D.; Yoshikawa, K.; Fujimoto, R.; Tsuru, T. G.; Ota, N.; Yamada, S.; Ichinohe, Y.; Uchida, Y.; Nakashima, Y.: “Super DIOS Project for Exploring ”Dark Baryon””, *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 209, issue 5-6, pp. 971-979, DOI: 10.1007/s10909-022-02910-w (December 2022)

Ishi, Daiki; Ishikawa, Kumi; Miyoshi, Yoshizumi; Terada, Naoki; Ezoe, Yuichiro: “Modeling of geocoronal solar wind charge exchange events detected with Suzaku”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 75, Issue 1, pp.128-152, DOI: 10.1093/pasj/psac095 (February 2023)

Fukushima, Aoto; Ezoe, Yuichiro; Odaka, Hirokazu: “Suzaku and Chandra study of diffuse X-ray emission from the massive star-forming region RCW 38”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 75, Issue 1, pp.187-198, DOI: 10.1093/pasj/psac100 (February 2023)

2) 著書

江副 祐一郎: 「我々が暮らす環境を知る - 太陽系」, XRISM note, 2022年6月,
<https://note.com/xrism/n/nd6ae24688c90>

K. Sato, Y. Uchida, K. Ishikawa: “Hitomi/XRISM micro-calorimeter”, invited chapter for edited book, <https://arxiv.org/abs/2303.01642>

3) 学会講演

● 日本天文学会 秋季年会, 2022 年 9 月 13 日～15 日 (新潟大学, ハイブリッド)

石川久美, 伊師大貴, 福島碧都, 稲垣綾太, 上田陽功, 他: 微細加工技術を用いた軽量ロブスターアイ光学系の開発

松本岳人, 武尾舞, 宮本明日香, 前田良知, 石田学: XRISM XMA フライト品性能試験のための X 線結像測定システムの開発

関口るな, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 伊師大貴: X 線天文衛星「すざく」で観測した彗星におけるコマの中性気体組成分析

武尾舞, 林多佳由, 石田学, 前田良知: 矮新星静穏時における硬 X 線放射領域の物理状態の解明

宮本明日香, 菅原泰晴, 前田良知, 石田学, 濱口健二: WR140 の X 線分光解析による衝撃波プラズマの物理状態の解明

● 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 2022 年 11 月 1～4 日 (熊本城ホール)

江副祐一郎, 船瀬龍, 川端洋輔, 中島晋太郎, 永田晴紀, 他: GEO-X 計画の現状と将来展望

● 2040 年代のスペース天文学研究会, 2022 年 11 月 14～15 日 (オンライン)

江副祐一郎: 機動的な衛星群による太陽系 X 線天文学

● 原子分子過程研究の最先端と先進的プラズマ分光計測研究会, 2022 年 12 月 (オンライン)

江副祐一郎: 電荷交換反応を用いた地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X と将来展望 (招待講演)

● 第 23 回 宇宙科学シンポジウム, 2023 年 1 月 5～6 日 (宇宙科学研究所, ハイブリッド)

江副祐一郎, 船瀬龍, 永田晴紀, 三好由純, 中嶋大, 他: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状

村川貴俊, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 伊師大貴, 他: MEMS 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発

石崎欣尚, R. L. Kelley, 他: X 線分光撮像衛星 (XRISM) 搭載 Resolve の開発状況

● 第 24 回 惑星圏研究会, 2023 年 2 月 20 日～22 日 (東北大学)

伊師大貴, 石川久美, 江副祐一郎, 三好由純, 寺田直樹: Modeling of solar wind charge exchange X-ray emission associated with the Earth’s magnetosphere and exosphere

関口るな, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 伊師大貴: すざく衛星 X 線観測データを用いた彗星コマの中性気体組成分析

● 超小型衛星利用シンポジウム 2023, 2023 年 2 月 21 日 (X-NIHONBASHI TOWER, ハイブリッド)

江副祐一郎, 船瀬龍, 永田晴紀, 三好由純, 中嶋大, 他: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状

● 第 22 回高宇連研究会, 2023 年 3 月 6 日~8 日 (関東学院大学)

伊師大貴: Modeling of solar wind charge exchange X-ray emission associated with the Earth's magnetosphere and exospher

● 日本天文学会 春季年会, 2023 年 3 月 13 日~16 日 (立教大)

辻雪音, 伊師大貴, 福島碧都, 江副祐一郎, 石川久美, 他: 原子層堆積法を用いた Co 成膜 Si 光学系の開発

村川貴俊, 石川久美, 沼澤正樹, 江副祐一郎, 伊師大貴, 他: GEO-X 衛星に向けた迷光防止用コリメータの開発

● 化学工学会 第 88 年会, 2023 年 3 月 15 日~17 日 (東京農工大)

辻雪音, 伊師大貴, 福島碧都, 江副祐一郎, 石川久美, 他: 超軽量 X 線望遠鏡への原子層堆積法による Co 成膜

● 日本物理学会 春季年会, 2023 年 3 月 22 日~25 日 (オンライン)

石崎欣尚, 他: X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 XI

国際会議

● Japan Geophysical Union, 2022 年 5 月 22 日~27 日 (幕張メッセ, Japan)

H. Morishita, Y. Ezoe, K. Ishikawa, M. Numazawas, D. Ishi, et al.; Development of MEMS X-ray telescopes for GEO-X mission

● 22nd International Conference on Atomic Layer Deposition, 2022 年 6 月 26-29 日 (Ghent, Belgium)

Y. Tsuji, A. Fukushima, D. Ishi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al.; Co-coated Si X-ray optics with atomic layer deposition

M. Numazawa, D. Ishi, A. Fukushima, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al.; Pt-coated Si X-ray optics with plasma atomic layer deposition for GEO-X mission

● COSPAR 2022 44th Scientific Assembly, 2022 年 7 月 16-24 日 (Athena & virtual)

Y. Ezoe, R. Funase, H. Nagata, Y. Miyoshi, H. Nakajima, et al.: Status of GEO-X (GEOspace X-ray imager) mission

● SPIE Astronomical Telescope + Instrumentation, 2022 年 7 月 17-22 日 (Montreal, Canada)

Y. Ezoe, R. Funase, H. Nagata, Y. Miyoshi, H. Nakajima, et al.: GEO-X (GEOspace X-ray imager)

M. Numazawa, Y. Ezoe, K. Ishikawa, D. Ishi, A. Fukushima, et al.: Ultra-lightweight X-ray telescope fabricated with multiple MEMS technologies for GEO-X mission

K. Ishikawa, T. Murakawa, D. Ishi, M. Numazawa, A. Fukushima, et al.: Collimator of the ultra-lightweight X-ray telescope for the GEO-X mission

Y. Ueda, T. Uchino, D. Ishi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al.: Development of Bragg reflection-type X-ray polarimeter based on a bent silicon crystal using hot plastic deformation

Y. Ishisaki, R. L. Kelley, et al.: Status of resolve instrument onboard X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)

● Comet Interceptor Science Meeting, 2022 年 10 月 28 日 (Tokyo, Japan)

Y. Ezoe: X-ray view of comets (招待講演)

● TMU-UM Joint Symposium, 2023 年 1 月 25 日 (Virtual)

Y. Ezoe: GEO-X (GEOspace X-ray imager) mission (招待講演)

● Geotail Symposium, 2023 年 3 月 30 日 (Tokyo, Japan)

Y. Ezoe: GEO-X (GEOspace X-ray imager) mission (招待講演)

ソフトマター研究室

1. 研究活動の概要

ソフトマターとは、高分子や液晶、ゴムといった”柔らかい”物質群の総称である。ソフトマターは階層的な構造を有しており、分子が結合した構造を作り、さらにその構造がより大きな構造（高次構造）を作る。この階層性のため、熱エネルギー程度のエネルギーで様々な転移を起し、時間スケールが長いために非平衡になりやすい。我々の研究室では、ソフトマターの相転移ダイナミクスや非平衡系に興味を持って、泡沫や粉体の研究を行っている。2021年度より細胞内液体液体相分離やタンパク質の線維化などの生体系の物理学的機構の解明を目指して、東京大学薬学部、都医学研、都立大数理・化学・生命科学・応用化学科と共同研究を行っている。

1) 泡沫の状態間転移

液体中に気泡が多く入っている状態を泡沫と呼ぶ。これまで液体の体積分率によって、状態が経験的に分類されてきた。5%以下であれば、dry foam と呼ばれ、15%以下であれば、wet foam と分類されてきた。これまで気泡の形状で経験的に分類してきたが、我々は dry-wet 転移が曖昧なものではなく、シャープな転移であり、気泡の再配置と関係があることを見出した。すなわち、力学的な特性によって状態が転移していることを意味している。さらに dry 状態の上に superdry 状態があることも見出した。この superdry 状態も dry 状態と力学的な特性が異なることがわかった。

我々は高速度カメラを用いて、崩壊現象を観察した。液体分率が低い場合には、一つの泡の崩壊が連鎖して周囲も壊していく雪崩的に崩壊する。この雪崩的崩壊には、伝搬モードと貫通モードの2種類あることを見つけ、さらにその濃度依存性について膜の揺らぎが重要であることを見出した。

泡沫のレオロジーは、油洗浄などで日常生活と深く関係している重要なことであるが、泡沫が複雑なため、いまだにそのダイナミクスすら明らかになっていない。基板上に泡沫をおき、それを塗り広げる研究を行い、そのダイナミクスを泡沫のレオロジーから解明した。基板との濡れ剥がれや泡沫の降伏応力によって、塗り広げやすさが起こることを見出した。

長年、未解明であった泡沫の物理学的な状態を明確にし、今後、物理学の発展だけでなく、応用にも大きく繋がる研究を行っている。

2) シリコンオイルコーティングされた粉体系

粉体には、水分を含んでいない乾いた粉体と水分を含んで架橋されている濡れた粉体系に大分される。濡れた粉体系は、水分の空間分布や蒸発が起こるため、安定した実験を行うことが難しく、あまり研究が進んでいない。我々の研究室では、子ども用玩具のシリコンオイルコーティングされた粉体 (coated sand) は、安定した引力相互作用を持った粉体系として着目し、研究を行っている。コーティングされていない普通の砂 (uncoated sand) と coated sand を混合することで、物性が大きく変化することを見出した。混合比が0.2で一度固くなり、0.5で更に急激に固くなることを見いだされた。接続性のクラスターと剛性クラスターというパーコレーションの概念で説明できると考えている。さらには、内部構造のシミュレーションや破壊などの研究を行い、物理的な理解だけでなく、今後の応用展開まで目指している。

3) 高エントロピー合金の数値シミュレーション

都立大物理学科の超伝導研究室と共同して、高エントロピー合金の動的性質について数値シミュレーション研究を行っている。様々な種類の原子が混ざっている系において、原子サイズや電荷、空間局在化、

結晶格子歪など多くの要素が関係しており、それぞれの効果を分離することは実験系では困難である。シミュレーションでは、理想的な物質を構築することができるため、高エントロピー合金におけるそれぞれの効果を明らかにすることが可能である。この利点を活かして、高エントロピー合金の物性をミクロスコピックから起源を明らかにすることを目指して、研究を行っている。

2. 研究業績

1) 論文

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : Cross over to collective rearrangements near the dry-wet transition in two-dimensional foams *Sci. Rep.* **13**, 4939 (2023)

Yoshikazu Mizuguchi, Hidetomo Usui, Rei Kurita, Kyohei Takae, Md. Riad Kasem, Ryo Matsumoto, Kazuki Yamane, Yoshihiko Takano, Yuki Nakahira, Aichi Yamashita, Yosuke Goto, Akira Miura, Chikako Moriyoshi : Glassy atomic vibrations and blurry electronic structures created by local structural disorders in high-entropy metal telluride superconductors *Materials Today Physics* **32**, 101019 (2023)

Rikuya Ishikawa, Marie Tani, and Rei Kurita : Three-dimensional phase separation under a nonstationary temperature field *Phys. Rev. Res.* **4**, 033152 (2022)

Rei Kurita, Takumi Kanazawa, Yukihiro Terada, and Marie Tani : Dynamics and mechanism of a deswelling transition of the sponge phase in a bilayer membrane system *Phys. Rev. Res.* **4**, 023254 (2022)

Takumi Yashima, Marie Tani, Rei Kurita : Filamentous crystal growth in organic liquids and selection of crystal morphology *Sci. Rep.* **12**, 9946 (2022)

Kazuya U Kobayashi and Rei Kurita : Key connection between gravitational instability in physical gels and granular media *Sci. Rep.* **12**, 6290 (2022)

2) 著書

谷 茉莉, 栗田 玲 : 泡沫滴からの液体ピンチオフ, *日本物理学会誌* 77, 11

栗田 玲 : 可視化技術が拓く非平衡現象の理解, *可視化情報学会誌* vol.42, No.164 p2-p5

3) 学会講演

● 日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年) (オンライン開催)

石川 陸矢, 高江 恭平, 水口 佳一, 栗田 玲 : NaCl 型高エントロピー合金結晶における粒子の拡散挙動

柳沢 直也, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 泡沫の気泡再配置による液体の浸透挙動への影響

● 日本金属学会 2023 年春期 (第 172 回) 講演大会 (東京大学駒場キャンパス)

石川 陸矢, 高江 恭平, 水口 佳一, 栗田 玲 : 高エントロピー合金型テルル化合物における安定性と拡散挙動

● 第 10 回ソフトマター研究会 (九州大学 西新プラザ)

谷 茉莉：壁に吹き付けられた泡沫からの液体ピンチオフ [招待講演]

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲： Directional quenching により形成される相分離パターンの非平衡転移 (PA05) [Poster]

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲： 泡沫の塗り広げにおける厚みの速度依存性の観察 (PA07)[Poster]

越智 友都, 谷 茉莉, 栗田 玲： シリコンオイルコーティングされた粉体の圧縮速度による破壊挙動の変化 (PA10)[Poster]

井出 薫, 谷 茉莉, 栗田 玲： lock-exchange 条件における流動場の実験観察 (PA11)[Poster]

柳沢 直也, 谷 茉莉, 栗田 玲： ミクロ・マクロ同時観察による泡沫への液体の浸透ダイナミクス (PB18)[Poster]

古田 祐二郎, 谷 茉莉, 栗田 玲： 高分子架橋過程がコロイドの運動に与える影響 (PB22)[Poster]

谷 茉莉, 藤尾 穂香, 栗田 玲*： シリコンオイルコーティングされた粉体の特異的物性 [oral]

● 第 21 回関東ソフトマター研究会（青山学院大学 相模原キャンパス）

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲： 泡沫の塗り広げ挙動の観察 [oral]

石川 陸矢, 高江 恭平, 水口佳一, 栗田 玲： 高エントロピー合金結晶における安定性と易動度の相関関係 [Poster]

古田 祐二郎, 谷 茉莉, 栗田 玲： 高分子架橋過程におけるコロイドダイナミクス [Poster]

横田 瑤, 谷 茉莉, 栗田 玲： シリコンオイルコーティングされた粉体混合系の加振応答 [Poster]

柳沢 直也, 谷 茉莉, 栗田 玲： 泡沫への液体の浸透ダイナミクス [Poster]

井出 薫, 谷 茉莉, 栗田 玲： lock-exchange 条件における流動場の実験研究 [Poster]

越智 友都, 谷 茉莉, 栗田 玲： シリコンオイルコーティングされた砂の圧縮速度による破壊挙動の変化 [Poster]

横地 晃平, 高橋 知未, 山根 大典, 巽 理紗, 堀 由起子, 富田 泰輔, 谷 茉莉, 栗田 玲： タウタンパク質の相分離の温度依存性 [Poster]

高橋 知未, 山根 大典, 巽 理紗, 堀 由起子, 富田 泰輔, 谷 茉莉, 栗田 玲： タウタンパク質の X 線小角散乱の測定 [Poster]

● 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2022（東京大学 本郷キャンパス）

谷 茉莉, 栗田 玲： 泡沫滴における液体ピンチオフ条件の解明

● 日本物理学会 2022 年秋季大会（東京工業大学 大岡山キャンパス）

井出 薫, 谷 茉莉, 栗田 玲： lock-exchange 条件における流動場の観察

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲： 泡沫の塗り広げにおける厚みの観察

柳沢 直也, 谷 茉莉, 栗田 玲： 微視的スケールにおける泡沫への浸透ダイナミクス

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲 : directional quenching による相分離パターンのかく乱強度依存性

国際会議

● EUFoam 2022 Conference (Hybrid Meeting, Kraków, Poland / online)

Marie Tani and Rei Kurita : Liquid Pinch-off from a Foamy Droplet in a Hele-Shaw Cell [oral]

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : Dynamics of structural relaxation near A dry-wet transition in a two-dimensional foam [oral]

Masaya Endo, Marie Tani and Rei Kurita : Velocity dependence of spreading behaviors of foam on a substrate [oral]

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

今年度は、スタッフ3名、大学院生8名（博士後期3名 [都市外交人材育成基金による留学生2名を含む] と博士前期5名）、学部生2名の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) カイラル化合物の純良単結晶育成とフェルミ面および超伝導特性の研究

カイラルな結晶構造を持つ化合物中では、その結晶の対称性を反映した電子状態が形成され、カイラル特有の性質を持ったトポロジカル電子物性が現れる。我々の研究グループでは、このトポロジカルな性質を明らかにするため、結晶構造の対称性に対し、電流や磁場の印加方向も考慮した様々な幾何学的な配置に対し、輸送現象や磁気応答がどのような特徴を示すか興味を持って研究をすすめている。これまで、幾つかのカイラル物質に着目し、単結晶育成と電子物性測定を進めてきた。特に TrX_4 (Tr:Rh, Ir, X:Ge, Sn) 系の高純度単結晶育成をすすめてきた。この物質はいずれも同型の結晶構造をとり、空間群 #152 および #154 に対応するカイラルな結晶構造をとる。

α -RhSn₄ および α -IrSn₄ については、Sn フラックス法による単結晶育成を行った。今年度、結晶育成条件の最適化により α -IrSn₄ については、結晶の純良性を表す残留抵抗比が 1250 に達する極めて純良で単一ドメインの単結晶を育成することに成功した。IrGe₄ では、テトラアーク炉を用いたチョクラスキー引き上げ法による単結晶育成を繰り返し、最終的に 3 cm に達する単一ドメイン単結晶の合成に成功した。RhGe₄ については、常圧下での合成ではできず、高压合成法を用いて行った。圧力約 4GPa、温度 1200 °C の条件下で結晶を得ることに成功した。これらの高純度単結晶に対して、メンブレン型メカニカルセンサーを用いた精密な磁気トルク測定を温度 1.5 K、磁場 12T までの範囲で行った。この磁気トルク測定から、伝導電子の顔ともいふべきフェルミ面の状態の情報を反映した量子振動を観測することに成功した。この現象は de Haas-van Alphen(dHvA) 効果と呼ばれ、この量子振動の周期を解析することで、フェルミ面の極値断面積を求めることができる。結晶軸に対して磁場の角度を変化させ、この極値断面積の角度依存性を求めることで、フェルミ面のサイズとトポロジーを明らかにすることに成功した。カイラル構造を持つ金属間化合物のフェルミ面研究の例は少なく、世界的にみても我々の研究成果は貴重な研究例である。本研究によって明らかになったフェルミ面のトポロジーの概形を図 1 に示す。全体のトポロジーは図 1(d) に対応し、それらを分解した形で示しているものが、図 1(a)(b)(c) になる。特に興味深い構造は、図 1(c) に示した 6 本の円柱状フェルミ面が捻れたような構造を有することである。このトポロジーに起因して、フェルミ面の極値断面積の角度依存性は特徴的な対称性を示すことが明らかになったが、このことは、三方晶系 (空間群 #152 および #154) の対称性としてはじめて実験的に確かめられたものである。同じ空間群に属するカイラルの物質には、典型物質として知られるテルル (Te) などがあり、フェルミ面上の電子状態について精力的に研究がすすめられているが、我々の研究グループの成果は、それらの研究に対して新たな視点を与えるものである。今後理論計算との比較や、角度光分解能光電子分光によるバンド構造の研究を進めることで、カイラル構造に由来するバンド構造の分裂やフェルミ面上のスピントクスチャをより明らかにすることができると考えられる。

また IrGe₄ および RhGe₄ については、低温において超伝導状態を示すことを明らかにした。カイラル物質系で超伝導を示す系の報告は、極めて限られており、さらに単結晶が得られているものは少ない。カイラル構造を持つ物質での超伝導状態における対波動関数の対称性の研究や、また超伝導状態を通して、物質系の特徴的な物性応答がどのように影響するのか等、新たな研究課題にむけた取り組みを開始している。

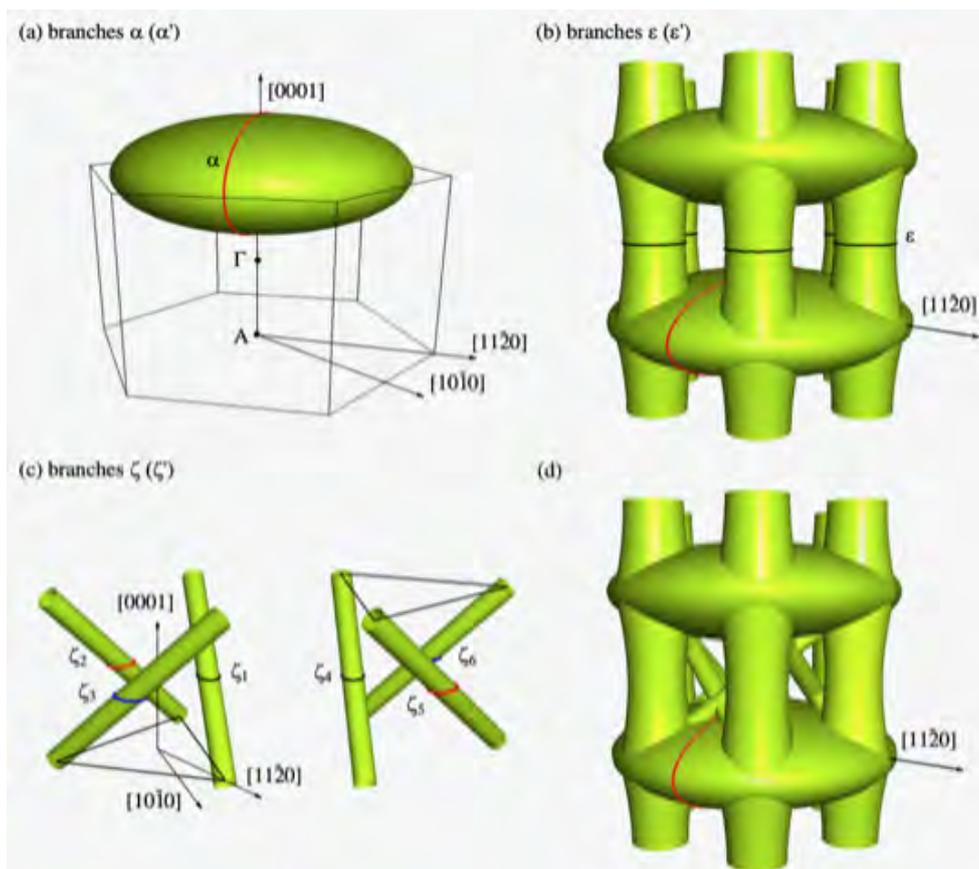


図 1: α -IrSn₄ について実験結果から予想されるフェルミ面の形状 (a) 扁平した楕円体のフェルミ面, (b) c 軸報告に連結したフェルミ面と楕円体フェルミ面, (c) 左右に捻れた配置をとる円柱状のフェルミ面, (d) 多重連結したフェルミ面の全体像].

2) 線形磁気抵抗を示す β -IrSn₄ の電子状態の究明

磁場に対して線形に増大する磁気抵抗効果が、Dirac 点および Weyl 点を持つ幾つかのトポロジカル物質において観測されている。その起源として、Dirac 電子の量子極限の効果 (Abrikosov モデル)、ベリー曲率による電子減速効果、などの理論モデルが提案され、議論されているが、機構解明には至っていない。我々は、トポロジカル物質探索を進める中で、幾つかの正方晶化合物 β -T₂Sn₄ (T: 遷移金属元素) の純良単結晶育成に成功し、9 T 以下の磁場領域において、新たに線形磁気抵抗を示す物質群を見出した。残留抵抗比 RRR は 200 以上に達するものもある。dHvA 振動や SdH 振動の観測にも成功し、フェルミ面解析を進めている。10 T 以上の強磁場領域における磁気抵抗効果を明らかにするために、東京大学物性研究所 附属国際超強磁場科学研究施設との共同研究として、60 T パルス強磁場を利用した実験も開始した。今後、本系における電子状態の特性を明らかにし、線形磁気抵抗効果の起源解明にせまる予定である。 β -IrSn₄ など、この物質系の幾つかの化合物は、1 K 以下の低温で超伝導を示す。断熱消磁冷却法を用いて、これらの物質の超伝導特性を明らかにするための実験も行った。その結果、正方晶結晶構造を反映して、臨界磁場が大きな異方性を持つことを見出した。

3) 単結晶中性子弾性散乱実験による SmAu₃Al₇ が示す重い電子状態と共存した磁気秩序相における磁気構造の探索

我々は、Sm の 4f 電子基底状態が持つ多彩な自由度に注目した物性探索を進め、磁場に鈍感な秩序状態および重い電子状態に代表される Sm 系特有の強相関物性を見出してきた。最近我々は、菱面体晶 (空間群: $R\bar{3}c$) の SmAu₃Al₇ において、重い電子状態が共存する部分無秩序相が発現する可能性を見出し

た。本物質は、 $T_N = 2.8$ K, $T^* = 0.9$ K で逐次相転移を示し、 T_N 以下で Curie 常磁性的な磁化率の上昇が残留している。その Curie 項は常磁性状態の 40% に相当し、部分無秩序相の実現を示唆している。さらに、 T^* 以下で 1.5 J/mol K² もの大きな電子比熱係数を示す。我々は、昨年度の μ SR 実験から、 T_N 以下で遅い磁気緩和を伴う磁気秩序を示すことを見出し、中心磁場が 10 mT 程度で大きな磁場分布を持つ静的内部磁場が存在することを明らかにした。

今回、 T_N 以下での磁気構造を明らかにするため、SENJU(J-PARC), TAS-1(JRR3) において単結晶中性子弾性散乱実験を行った。これらの実験から、 T_N 以下で超格子反射を複数の等価な逆格子点において見出し、秩序ベクトルは六方晶軸表示で (0.30 0 1.33) であると確認した。この秩序ベクトルの値は、格子非整合な秩序の発現を示唆しており、各 Sm サイトで大きさの異なる磁気モーメントが秩序化している。この解析結果は、 μ SR で T_N 以下で観測した内部磁場が幅広い分布を示すことと矛盾しない。また、この超格子反射強度の温度依存性が μ SR で決定した内部磁場の温度依存性とスケールすることから、両者ともに Sm の磁気秩序を観測していることがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

Nazir Ahamed, Takumi Hasegawa, Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: "Large diamagnetism and low-lying optical phonon modes in Pt-Cd gamma-phase", *J. Alloys Compd.* **901**, 163520 (2022)[9 pages]

N. Nakamura, R. Higashiaka, Y. Aoki, H. Sato, and T. D. Matsuda: "Superconducting properties of gage compounds $\text{YbTr}_2\text{Al}_{20}$ with $\text{Tr} = \text{Mo}$ and Ta ", *Solid State Commun.* **363**, 115098 (2023)[5 pages]. DOI: 10.1016/j.ssc.2023.115098

Naoki Nakamura, Ayano Yanuma, Yuma Chiba, Rumi Omura, Ryuji Higashinaka, Hisatomo Harima, Yuji Aoki, Tatsuma D. Matsuda: "Fermi Surface and Superconducting Properties of α - IrSn_4 , α - RhSn_4 , IrGe_4 , and RhGe_4 with Trigonal Chiral Structure" *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 034701 (2023) [15 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.92.034701

Hiromu Tamatsukuri, Takumi Hasegawa, Hajime Sagayama, Masaichiro Mizumaki, Youichi Murakami, Joe Kajitani, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, and Satoshi Tsutsui: "Investigation of the phonon dispersion associated with superlattice reflections in the BiS_2 -based superconductor $\text{LaBiS}_2\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5}$ ", *Phys. Rev. B* **107**, 024303 (2023) [8 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.107.024303

Kazuaki Iwasa, Kazuya Suyama, Seiko Ohira-Kawamura, Kenji Nakajima, Stéphane Raymond, Paul Steffens, Akira Yamada, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Ikuto Kawasaki, Shin-ichi Fujimori, Hiroshi Yamagami, and Makoto Yokoyama: "Weyl-Kondo semimetal behavior in the chiral structure phase of $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ " *Phys. Rev. Materials* **7**, 014201 (2023) [11 pages] DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.7.014201

Ryuji Higashinaka, Hayato Masuda, Yousuke Takahashi, Akira Yamada, Masaichirou Mizumaki, Satoshi Tsutsui, Tatsuma D. Matsuda, Hideyuki Sato, and Yuji Aoki: "Possible Partially Disordered Sm State Coexisting with Heavy Quasiparticles in SmAu_3Al_7 ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 034601 (2023) [8 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.92.034601

Yoshichika Onuki, Ai Nakamura, Dai Aoki, Tatsuma D. Matsuda, Yoshinori Haga, Hisatomo Harima, Tetsuya Takeuchi, and Yoshio Kaneko: "Split Fermi Surface Properties of Noncentrosymmetric Compounds", *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 064712 (2022) [10 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.91.064712

Yoshichika Onuki, Yoshio Kaneko, Dai Aoki, Ai Nakamura, Tatsuma D. Matsuda, Miho Nakashima, Yoshinori Haga, and Tetsuya Takeuchi: "Single Crystal Growth and Magnetic Properties of Noncentrosymmetric Antiferromagnet Mn_3IrSi ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 065002 (2022) [2 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.91.065002

Yoshichika Onuki, Dai Aoki, Ai Nakamura, Tatsuma D. Matsuda, Miho Nakashima, Yoshinori Haga, and Tetsuya Takeuchi: "Single Crystal Growth and Magnetic Properties of α -Mn and β -Mn", [*J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 065001 (2022) [2 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.91.065001

2) 国際会議報告

● 29th International Conference on Low Temperature Physics 2022年8月18日(木)~24日(水) 札幌コンベンションセンター(札幌)

Ryuji Higashinaka, Takuma Iwami, Md Asif Afzal, Tatsuma D Matsuda, and Yuji Aoki : Substitution effects of Zn or Cd for Al in $SmTi_2Al_{20}$

Tetsuro Kubo Hideki Tou, Hisashi Kotegawa, Hisatomo Harima, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Yoshihiko Ihara, Takayuki Goto, Michihiro Hirata, Takahiko Sasaki : Non-Kramers Crystalline-Electric-Field Doublet-Triplet Excitation and Slow Dynamics in $PrNb_2Al_{20}$ Studied by Nuclear Magnetic Resonance

3) 学会講演

● 日本物理学会 2022年秋季大会 2022年9月12日(月)~15日(木) 東工大(大岡山キャンパス)

松田達磨, 清藤真由子, N. Ahmed, 中村直貴, 東中隆二, 山下愛智, 水口佳一, 青木勇二: カゴ状物質 Ir_3Ge_7 の熱物性研究

林元輝, 大川万里男, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 北村未歩, 志賀大亮, 組頭広志, N. L. Saini, 溝川貴司: ARPESによるカイラル結晶 $IrGe_4$ の電子状態

天久裕太, 田中博大, 松田達磨, 中島美帆, 天児寧, 仲村愛, 青木大, 辺土正人, 仲間隆男: $EuZn_2$ の単結晶育成と磁気特性

田中博大, 天久裕太, 仲村愛, Dexin Li, 青木大, 中島美帆, 天児寧, 松田達磨, 上床美成, 辺土正人, 仲間隆男: $EuNiSi_3$ の単結晶育成と多重磁気転移

● 日本物理学会 2023年春季大会 2023年3月22日(水)~25日(土) (オンライン開催)

松田達磨: カイラル構造における輸送特性とフェルミ面の研究 (シンポジウム)

田中なつみ, 嶋田隼輔, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: Gd_2PdSi_3 の Skyrmion 相における Topological Hall 効果の磁場方向依存性

林元輝, 山本陽太郎, 大川万里生, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 小澤健一, 北村未歩, Marek Kopciuszynski, Alexey Barinov, Naurang. L. Saini, 溝川貴司: ARPES によるカイラル結晶 IrGe₄, IrSn₄ の電子状態

東中隆二, 北川紘章, 金子耕士, 伊藤孝, 大原高志, 田端千紘, 鬼柳亮嗣, 萩原雅人, 中尾朗子, 神戸振作, 松田達磨, 青木勇二: SmAu₃Al₇ が示す重い電子状態と共存した部分無秩序相における磁気構造

北川紘章, 東中隆二, 金子耕士, 伊藤孝, 大原高志, 田端千紘, 鬼柳亮嗣, 萩原雅人, 中尾朗子, 神戸振作, 松田達磨, 青木勇二: 単結晶中性子回折による SmAu₃Al₇ が示す部分無秩序相の研究

● 第2回 高知大学強相関電子物性研究会 2022年8月29日(月), 30日(火) 高知大学,

松田達磨: 多*f*電子系における強相関電子状態の研究 (招待講演)

● 第1回 アシンメトリ量子研究会 2022年8月9日(火), 10日(水) 大阪大学(豊中キャンパス),

松田達磨: カイラル構造を持つ物質系の結晶育成と輸送特性研究 (招待講演)

● 2022年 大洗・アルファ合同研究会 2022年9月28日(水), 29日(木) 東北大学金属材料研究所(仙台),

松田達磨: 強相関電子系 Nd 化合物の物性研究 (招待講演)

● ISSP ワークショップ「カイラル物質科学の新展開」 2022年12月22(木)-24日(土) 東大物性研(柏の葉キャンパス),

松田達磨: カイラル構造を持つ金属間化合物の単結晶合成と dHvA 効果測定によるフェルミ面の研究

● TAS-1, TAS-2, JTAS, HRPD ユーザーミーティング 2023年3月9(木) JAEA 情報交流棟(東海村)

東中隆二, 北川紘章, 金子耕士, 伊藤孝, 大原高志, 田端千紘, 鬼柳亮嗣, 萩原雅人, 中尾朗子, 神戸振作, 松田達磨, 青木勇二: SmAu₃Al₇ が示す重い電子状態 と共存した 部分無秩序相 における磁気構造

超伝導物質研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、新奇層状超伝導体および高性能熱電変換材料などの新物質開発を行っている。まさ、それらの新物質における機能性発現機構を探るための物性研究を進めている。特に、層状構造やローンペアを持つ新物質を設計することで、多彩な結晶構造および局所構造の実現を目指している。具体的には、 BiCh_2 系（Chはカルコゲン）層状化合物、銅酸化物系高温超伝導体、ジントル相化合物および高エントロピー合金効果に着目した新しい超伝導体・熱電材料の開発を行っている。また、超伝導体における異常熱膨張や磁気熱スイッチング効果の研究も推進している。

1) BiCh_2 系超伝導体の研究

BiCh_2 系超伝導体は銅酸化物系や鉄系と類似の構造を持つ層状超伝導体であり、その超伝導機構解明が課題である。本研究では、一部の BiCh_2 系化合物で観測されているBiの大振幅振動に着目し、超伝導特性との相関を研究した。対象とした系は RE(O,F)BiS_2 （ $\text{RE} = \text{La, Ce, Pr, Nd}$ ）と La(O,F)Bi(S,Se)_2 であり、それぞれの系で面内化学圧力の上昇による非調和性の増大をグリユナイゼン定数評価によって見出した（Abbas et al., JPSJ 2022; JPSJ 2023）。また、 La(O,F)Bi(S,Se)_2 系でBiの大振幅振動エネルギーを比熱測定から見積もったところ、 T_c とBi振動エネルギーが正の相関を示すことを見出した。また、今年度の研究ではSmを含む新たな BiS_2 系超伝導体 $(\text{Pr,Sm})(\text{O,F})\text{BiS}_2$ の開発も行った。上述のBi振動エネルギーと T_c において類似の相関がみられた。今後、様々な系においてBiの大振幅振動と超伝導特性と関連を研究することで、超伝導機構の理解を目指す。また、2022年度の研究では、 BiCh_2 系の超伝導状態における局在現象に関する研究も行い、磁気抵抗の解析から弱反局在と弱局在のクロスオーバー領域を特定し、元素置換による制御を実現した（Hoshi et al., JPSJ 2023）。

2) HEA型化合物超伝導体の研究

近年、1つの原子サイトを5種以上の異種元素が占有する「高エントロピー合金（HEA）」が構造材料や生体材料の分野で注目を集めている。我々は、従来の単一サイトからなる、いわゆる合金であるHEAから、より複雑な「化合物」にHEAの効果を拡張すべく、「HEA型化合物」の開発を2018年以降行っている。今年度の研究ではまず、銅酸化物高温超伝導体 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ のREサイトをHEA化した単結晶薄膜の作製に成功し、HEA化によって強磁場印加に対して臨界電流の低下が低減されることを見出した（Yamashita et al., JJAP 2022）。また、年度中にPLD装置を導入し、今後さらなる研究を推進する。HEA化した金属テルライドMTeの圧力効果に着目した研究を展開した。PbTeに代表されるMTeは、高圧下でCsCl型への構造相転移を示し、超伝導を示す。しかし、圧力の上昇で T_c は急激に減少する。一方、Mサイトを数元素で固溶した場合、配置エントロピーの増加にしたがい T_c の現象がなだらかになる現象を見出した（Kasem et al., Sci. Rep. 2022）。Mサイトに5元素を固溶した AgInSnPbBiTe_5 においては、20 GPa以上の圧力域でほとんど T_c が変化しない特異な現象を観測した。また、高圧下X線吸収から電子状態は圧力依存を示すことを確認し、本現象の起源が格子振動または電子格子相互作用にあると仮定した。そこで、原子振動シミュレーション（ソフトマター研究室との共同研究）および電子状態計算を行い、MサイトのHEA化でガラス的な振動特性が発現することを見出し、また電子バンドがバンド選択的にぼやけることを確認した（Mizuguchi et al., Mater. Today Phys. 2023）。今後、フォノンと電子状態の実験的観測や超伝導状態のより詳細な研究を通し、HEA型化合物超伝導体に特有の性質を見出したい。また、A15系超伝導体 V_3Ge のHEA化も研究し、各相がHEA組成を保った状態で相分離を起こすCCA(Compositionally complex alloy)と類似の状態を実現した（Nakahira et al., J.

Mater. Sci. 2022). CCA化した V_3X (Xサイトに5元素)は同程度の T_c を有する V_3Ge の上部臨界磁場を大幅に超える性質を示した. 化合物超伝導体のCCA化は新たな高性能超伝導体の開発す指針になりうる. (図1に結果を示す)

3) 異方的熱膨張を示す超伝導体の研究

$CuAl_2$ 型構造(正方晶)を持つ遷移金属ジルコナイド $TrZr_2$ (Tr:遷移金属)は比較的高い T_c を持った超伝導体である. 中性子回折を低温で行い, 格子定数の温度依存性を評価したところ, $TrZr_2$ が異方的な線熱膨張を示すことを見出した. $CoZr_2$ の場合, a 軸は正の熱膨張を示すが, c 軸が巨大な負の熱膨張 $\alpha_{ci}-20 \mu K^{-1}$ を示す(Mizuguchi et al., JPSJ 2022). $TrZr_2$ においては, 格子定数比 c/a を制御することで c 軸線熱膨張係数が負から正へと変化することを見出した(Arima et al., APEX 2023). さらに, $(Co,Ni)Zr_2$ において, Ni量の増加によってコラプス正方晶相へと転移している可能性を見出し, 線熱膨張係数の急激な変化とあわせてバルク超伝導が消失することを見出した(Watanabe et al., Sci. Rep. 2023). このことから, 本系の超伝導が結晶構造変化と密接に相関していることを提案した. 同様の異方的熱膨張は直方晶系の $CoZr_3$ でも観測された(Arima et al., JPSJ 2023). 今後, 様々な遷移金属ジルコナイドで異常熱膨張の探索を行い, 超伝導物性との相関を見出していきたい.(図2に結果を示す)

4) 新規材料や超伝導応用の開発

AgInS₂ 高圧相の単相合成 AgInS₂は様々な結晶構造をとることが知られており, 特に層状構造をとる高圧相は比較的狭いバンドギャップが予想されており, 新奇電子材料の可能性を模索するために単相合成を試みた. 高圧合成条件を最適化することで, R-3m構造のAgInS₂の単相合成に成功した(Sawahara et al., ACS Omega 2023). 得られた試料は半導体であったため, 高圧を印加し, 電気伝導性の向上を狙ったが, 30 GPaの圧力印加では金属的な伝導の発現には至らなかった.

異方的キャリア極性を示す熱電材料の探索 従来の熱電変換では, キャリア極性がp型の材料と, n型の材料を組み合わせモジュールを組み立てる. すなわち, それぞれの材料の熱電特性を最適化したうえで, 機械強度や化学的安定性の異なるp型・n型材料を組み合わせ熱電変換素子を作製する必要がある. これに対し, 結晶中のある方向においてはp型であり, 別の方向にはn型である, という異方性を示す材料を用いた場合, p型・n型の材料を組み合わせることなく, 単一の材料による熱電変換が可能になる. 我々は $NaSn_2As_2$ や $NaSnAs$ (Omprakash et al., Mater. Today Commun. 2022)において配向バルク多結晶を作製し, 異方的キャリア特性が発現することを確認してきた. 2022年度は, 理論的に異方的キャリア特性発現の予測があった $EuCuAs$ および単結晶での報告があった Re_4Si_7 の多結晶合成を行い, ホットプレスによる配向多結晶の合成を試みた. 多結晶試料の合成には成功したが, ホットプレス後の試料は配向度が上昇せず, 異方的キャリア極性の発現には至らなかった. 本結果を $NaSn_2As_2$ や $NaSnAs$ の場合と比較し, ファンデルワールスギャップの存在が, 配向バルク多結晶の作製の鍵であるという結論に至った.

超伝導体の磁気熱スイッチング効果の定量評価 超伝導状態では電子がクーパー対を形成し, 電子熱伝導がゼロに向かうことが一般的に知られている. 超伝導状態は磁場の印加で破壊できるため, 超伝導体が磁気熱スイッチングに有効であることは知られていた. 一方, 熱伝導率の詳細な温度・磁場依存性に関するデータは多くなく, 実際にスイッチング特性を定量評価した例はなかった. そこで, Nbを対象とし, 低温・磁場中での熱伝導率測定を行い, Magneto-thermal-switching ration (MTSR)を見積ることに成功した. 低温ではあるが, 従来の磁気熱スイッチング効率を上回る650% ($T = 2.5 K$)のスイッチ

ング比を得ることができた (Yoshida et al., APEX 2023). 今後は様々な超伝導体の MTSR の評価と、複合材料化による不揮発メモリの開発を推進する。

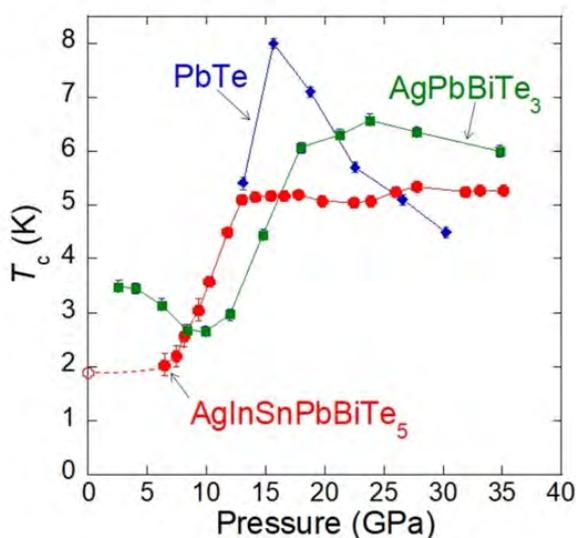


図 1: 金属テルライドの転移温度の圧力依存性。

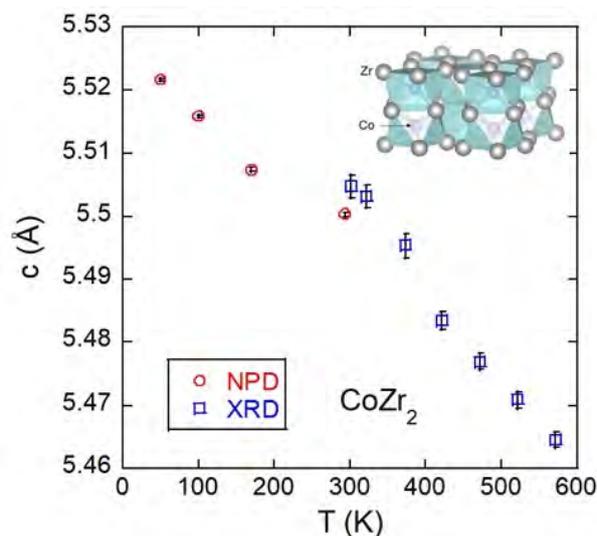


図 2: 遷移金属ジルコナイドにおける異方的熱膨張。

2. 研究業績

1) 論文

N. Nakamura, Y. Goto*, Y. Nakahira, A. Miura, C. Moriyoshi, C. H. Lee, H. Usui, Y. Mizuguchi: “Thermoelectric properties of Zintl arsenide EuCuAs” *J. Electronic Mater.*, **52** (2023) 3121

H. Arima*, Md. R. Kasem, Y. Mizuguchi: “Axis thermal expansion switching in transition-metal zirconides TrZr₂ by tuning the c/a ratio” *Appl. Phys. Express*, **16** (2023) 035503

M. Yoshida, Md. R. Kasem, A. Yamashita, K. Uchida, Y. Mizuguchi*: “Magneto-thermal-switching properties of superconducting Nb” *Appl. Phys. Express*, **16** (2023) 033002

T. Sawahara, R. Matsumoto, Y. Nakahira, H. Usui, N. Kataoka, R. Saitou, T. Wakita, A. Yamashita, Y. Goto, Y. Takano, A. miura, Y. Mizuguchi*: “Synthesis and Characterization of a Trigonal Layered Compound AgInS₂” *ACS Omega*, **8** (2023) 11288

Y. Mizuguchi*, H. Usui, R. Kurita, K. Takae, Md. R. Kasem, R. Matsumoto, K. Yamane, Y. Takano, Y. Nakahira, A. Yamashita, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi: “Glassy atomic vibrations and blurry electronic structures created by local structural disorders in high-entropy metal telluride superconductors” *Mater. Today Phys.*, **32** (2023) 101019

H. Arima, T. Inui, A. Yamashita, A. Miura, H. Itou, C. Moriyoshi, H. Fujihisa, Y. Mizuguchi*: “Uniaxial Negative Thermal Expansion in an Orthorhombic Superconductor CoZr₃” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **92** (2023) 024602

Y. Watanabe, H. Arima, H. Usui, Y. Mizuguchi*: “Sign change in c-axis thermal expansion constant and lattice collapse by Ni substitution in transition-metal zirconide superconductor Co_{1-x}Ni_xZr₂” *Sci. Rep.*, **13** (2023) 1008

- G. M. Pugliese, L. Tortora, G. Tomassucci, Md. R. Kasem, T. Mizokawa, Y. Mizuguchi, N. L. Saini*: “Possible local order in the high entropy TrZr₂ superconductors” *J. Phys. Chem. Solids*, **174** (2023) 111154
- F. I. Abbas, K. Hoshi, Y. Nakahira, M. Yoshida, A. Yamashita, H. Ito, A. Miura, C. Moriyoshi, C. H. Lee, Y. Mizuguchi*: “Estimation of Grüneisen Parameter of Layered Superconductor LaO_{0.5}F_{0.5}BiS_{2-x}Se_x ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$)” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **92** (2023) 014703
- H. Yamaoka*, A. Yamashita, Y. Nakahira, M. Ochi, K. Kuroki, H. Arima, K. Matsubayashi, H. Ishii, N. Hiraoka, Y. Mizuguchi*: “Crystal and electronic structures of BiS₂-based compounds Sr_{0.5}X_{0.5}FBiS₂ (X = rare earth) under pressure: Correlation with the change in the superconductivity from unconventional to conventional” *Phys. Rev. B*, **106** (2022) 205122
- Md. R. Kasem, H. Arima, Y. Ikeda, A. Yamashita, Y. Mizuguchi*: “Superconductivity of high-entropy-alloy-type transition-metal zirconide (Fe, Co, Ni, Cu, Ga) Zr₂” *J. Phys.: Mater.*, **5** (2022) 045001
- Y. Nakahira*, R. Kiyama, A. Yamashita, H. Itou, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Tuning of upper critical field in a vanadium-based A15 superconductor by the compositionally-complex-alloy concept” *J. Mater. Sci.*, **33** (2022) 15990
- J. Kitagawa*, K. Hoshi, Y. Kawasaki, R. Koga, Y. Mizuguchi, T. Nishizaki: “Superconductivity and hardness of the equiatomic high-entropy alloy HfMoNbTiZr” *J. Alloys Compd.*, **924** (2022) 166473
- Md. R. Kasem, R. Ishii, T. Katase, O. Miura, Y. Mizuguchi*: “Tuning of carrier concentration and superconductivity in high-entropy-alloy-type metal telluride (AgSnPbBi)_{(1-x)/4}In_xTe” *J. Alloys Compd.*, **920** (2022) 166013 (2022)
- F. I. Abbas, K. Hoshi, A. Yamashita, Y. Nakahira, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, K. Terashima, R. Matsumoto, Y. Takano, Y. Mizuguchi*: “Lattice Anharmonicity in BiS₂-Based Layered Superconductor RE(O,F)BiS₂ (RE = La, Ce, Pr, Nd)” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **91** (2022) 074706
- A. Yamashita*, K. Hashimoto, S. Suzuki, Y. Nakanishi, Y. Miyata, T. Maeda, Y. Mizuguchi: “Fabrication of high-entropy REBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films by pulsed laser deposition” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61** (2022) 050905
- R. Kiyama, K. Hoshi, Y. Goto, M. Nagao, Y. Mizuguchi*: “The upper critical field in the BiCh₂-based superconductors CeOBiS_{1.7}Se_{0.3} and PrO_{0.5}F_{0.5}BiS_{2-x}Se_x ($x = 0, 0.3$)” *J. Phys. Commun.*, **6** (2022) 055009
- A. Bhattacharyya*, D. T. Adroja, R. Sogabe, Y. Goto, Y. Mizuguchi, A. D. Hillier: “Superconducting gap structure in carrier doped BiCh₂-based layered superconductors: A μ SR study” *J. Phys. Chem. Solids*, **170** (2022) 110898
- Md. R. Kasem, Y. Nakahira, H. Yamaoka, R. Matsumoto, A. Yamashita, H. Ishii, N. Hiraoka, Y. Takano, Y. Goto, Y. Mizuguchi*: “Robustness of superconductivity to external pressure in high-entropy-alloy-type metal telluride AgInSnPbBiTe₅” *Sci. Rep.*, **12** (2022) 7789

M. Omprakash, H. Usui*, K. Yanagi, Y. Mizuguchi, Y. Goto*: “Conserved axis-dependent conduction polarity in NaSnAs polycrystalline bulk sample for transverse thermoelectric application” *Mater. Today Commun.*, **31** (2022) 103558

F. I. Abbas, Y. Nakahira, A. Yamashita, Md. R. Kasem, M. Yoshida, Y. Goto, A. Miura, K. Terashima, R. Matsumoto, Y. Takano, C. Moriyoshi, Y. Mizuguchi*: “Estimation of the Grüneisen Parameter of High-Entropy-Alloy-Type Functional Materials: The Cases of REO_{0.7}F_{0.3}BiS₂ and MTe” *Condens. Matter*, **7** (2022) 34

Y. Nakahira, S. Shimono, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Mizuguchi*: “Synthesis and Characterization of High-Entropy-Alloy-Type Layered Telluride MBi₂Te₄ (M = Ag, In, Sn, Pb, Bi)” *Materials*, **15** (2022) 2614

2) 特許

水口佳一, 有馬寛人, 「熱膨張性を制御した遷移金属ジルコナイド及びその設計方法」, 出願日: 2022年10月19日, 特願 2022-167834

3) 学会講演

国内会議

● 日本物理学会 年次大会 (オンライン, 2023.3.22-25)

水口佳一: “遷移金属ジルコナイドにおける異方的格子熱膨張”

有馬寛人: “元素置換による遷移金属ジルコニド化合物の異方的熱膨張の制御”

● 特別講義 (高知工科大学, 2022.7.12)

山下愛智: “アカデミックキャリア形成セミナー”

● JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (オンライン, 2022.11.24)

山下愛智: “アカデミアで活躍する卒業生による研究発表”

国際会議

● M2S2022 (バンクーバー, 2022.7.17-22)

M. Katsuno: “High-Pressure Synthesis and Superconducting Properties of NaCl-Type In_{1-x}Pb_xTe ($x = 0-0.8$)”

Y. Mizuguchi, M. Kasem, A. Yamashita, Y. Nakahira, C. Wang: “Superconductivity of high-entropy-alloy-type compounds”

A. Yamashita, Y. Mizuguchi: “Possible pairing mechanism switching driven by structural symmetry breaking in BiCh₂-based superconductors”

K. Hoshi: “Extremely High Upper Critical Field for the BiCh₂”-Based Superconductor”

T. Sawahara : “Superconductivity in In-doped $(\text{AgMBi})_{(1-x)/3}\text{In}_x\text{Te}$ ($M = \text{Sn, Pb}$) with electronic band inversion”

● ECT2022 (バルセロナ, 2022.9.14-16)

A. Yamashita : “Thermoelectric properties of high-entropy-type metal chalcogenide compounds”

F. I. Abbas : “Investigation of anharmonicity of lattice vibration using Grüneisen parameter in BiCh_2 -based compounds”

N. Nakamura : “Polycrystalline samples showing axis-dependent conduction polarity and investigation of new materials”

● APS March Meeting 2023 (ラスベガス, 2023.3.5-10)

H. Arima : “Axis thermal expansion switching in transition-metal zirconides superconductors TrZr_2 by tuning the c/a ratio”

● KJMST2022 (Jeju, 2022.11.8-11)

A. Yamashita : “Development of High-Entropy Functional Materials” (招待講演)

● IUMRS-ICYRAM2022 (福岡, 2022.8.3-6)

A. Yamashita, Y. Mizuguchi : “Development of high-entropy functional materials”

● セミナー講演 (ローマ大学 Sapienza University of Rome, 2022.9.22)

A. Yamashita : “Seminar at University of Roma Sapienza Recent Activities ”

● セミナー講演 (ENEA Frascati Research Center, 2022.9.21)

A. Yamashita : “Seminar at ENEA Fusion Institute Recent Activities ”

表界面光物性研究室

1. 研究活動の概要

界面や表面でおこる様々な現象は、物質の性質やデバイスの性能に大きく影響を及ぼす。表面・界面の構造を制御し、新たな物理現象を見出すことを目的として、本研究室は物質創製・測定技術開発の両面で研究活動を進めている。特に、制御された界面での熱・電荷輸送に関わる物理現象や、ナノチューブ構造に由来する量子現象、光物性では特に極端非線形光学現象などの研究テーマを対象に研究を進めている。具体的には、一次元材料である単層カーボンナノチューブ (SWCNT) や遷移金属カルコゲナイドナノチューブ (TMDC-NT)、二次元材料である原子層物質などを対象に、合成・精製技術開発、新規測定技術開発、電気伝導特性・光物性・熱物性の研究を行っている。それら物質の構造、フェルミレベル、界面の接合構造、の制御を通して新たな物性の探索を行っている。最近では、イオン液体を電解質として用い、物質界面に電気二重層を形成させ、キャリア注入を行い、フェルミレベルを自在にシフトさせ、様々な多様な物性を制御する研究を進めている。2022年度は、新型コロナの影響により研究活動が大きく制限される中、以下のような研究を進めた。

1) ファンデルワールス界面における熱・電荷の流れの研究

制御されたファンデルワールス界面における熱流・電荷流の相関解明 近年、柔らかな材料を用いたウェアラブル端末等のデバイス応用が注目されている。柔らかな材料で作られた薄膜や、ファンデルワールス力で接合した界面を有しており、その界面における熱および電荷の流れを正しく理解することは、基礎・応用の両面で重要な課題の一つとなっている。厚み数 nm の薄膜の熱輸送を定量的に評価する手法は非常に限られ、その一つが時間領域サーモリフレクタンス法 (TDTR 法) である。本研究室では、TDTR 計測系を独自に立ち上げ、これまで縦型のデバイスを形成して、SWCNT 薄膜における熱流・電荷流のキャリア量依存性の解明などを明らかにしてきた。また、厚みが 1nm 程の単層の層状化合物からなる原子層材料を対象として、同原子層材料を 4 層積層した格子不整合な界面において、極めて熱伝導が抑制されることを明らかにしてきた。今年度は、そのような格子不整合界面における熱伝導と電気伝導を同時測定する計測技術開発を進めた。これまで薄膜の縦方向の熱伝導率が評価できる TDTR 法を活用し、下部にトランスジューサー用の金電極、積層上部に電流計測用の電極を形成し、熱伝導と電気伝導の同時計測技術の開発を進めた。実際に、原子層を 4 層積層した界面を貫く形での界面熱伝導と電気伝導を評価可能であるという知見を得た。今後、積層試料の改善や系統的に界面構造を変化させることによる熱流・電流の同時評価を進めていく予定である。

2) ナノ物質における新規物性探索と制御

ナノチューブ系の熱電物性研究 熱電変換性能 (ZT 値) は、ゼーベック係数・電気伝導率および熱伝導率に依存する。これまで私達は電子構造を選択した SWCNT 薄膜を用いて、系統的にキャリア注入制御を行い、ゼーベック係数および電気伝導率に依存する熱電出力因子が、ある特定のキャリア量で増大することを見出してきた。熱電変換性能を決定する為には、熱伝導率のキャリア量依存性と対応させる必要がある。そこで、今年度は、一方向に配列させた SWCNT 薄膜を作成し、ナノチューブの配列構造に対して垂直方向の熱伝導率および熱電出力因子のキャリア注入依存性を明らかにする研究を進めた。その結果、半導体型 SWCNT 配列薄膜においては、その配列方向の垂直方向の ZT 値として、室温において 0.07 程のピークを示すことを明らかにした。

ナノチューブ・2次元物質における高次高調波発生とその制御 高強度の中赤外レーザーパルスを照射することにより、10 数次に及ぶ高次高調波が固体から発生することが近年明らかになり、固体系における極端非線形光学という新たな研究分野が近年注目されている。本研究室は、京都大学田中耕一郎研究室と共同で、SWCNT 薄膜における高次高調波発生とその制御の研究を進め、電解質ゲーティングを用いたフェルミレベル制御によって、高次高調波の増大・減少を制御できることを明らかにしてきた。しかし、グラフェンにおいては、キャリア注入制御を行っても全く HHG の強度の変化が見られず、電子構造、化学ポテンシャルの位置と HHG との関係の理解は非常に大きな課題であった。今年度ははじめに理論解析を進め、レーザー強度によって HHG の化学ポテンシャル依存性が大きく変化することを突き止めた。その知見に基づいて、半導体型 SWCNT を対象として、HHG のレーザー強度および化学ポテンシャル依存性を明らかにした。その結果、同じレーザー強度においても、化学ポテンシャルを変化させることにより、バンドエッジである K 点を通り、トンネル過程で価電子帯に移るキャリア量が大きく減少し、HHG が大きく変化することを実験的にも明らかにした。

一次元遷移金属カルコゲナイドナノチューブの合成とその物性解明 遷移金属カルコゲナイドナノチューブ (TMDC-NT) は、非従来型超伝導やバルク光電効果といったカイラル構造に由来する新たな物性が報告され、現在活発に研究がなされている。しかし TMDC-NT は、古くからその合成手法は報告されているが、未だに物性研究が可能な単層の TMDC-NT は合成されていない状況にあり、合成手法の発展はその物性解明において非常に重要な課題となっている。本研究室では、構造と物性との関係を系統的に議論する為、TMDC-NT の合成手法の開発からその物性研究まで取り組んでいる。今年度は比較的直径の小さく (10nm 程) 構造が均一な WS₂-NT の合成手法の開発に成功し、その光学特性を明らかにした。また、これまで開発してきた WS₂-NT を母材として、その外型に MoS₂-NT を形成するヘテロナノチューブの新規合成を進めた。特に、MoS₂ の層状構造・結晶構造をモリブデンや酸化モリブデンの蒸着により変化させることが可能であることを明らかにした。

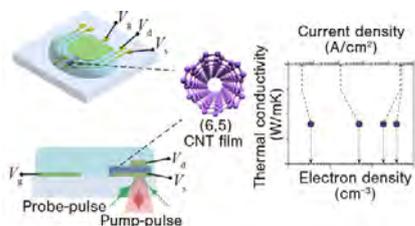


図 1: 縦型デバイスを用いた SWCNT 薄膜における熱伝導・電気伝導のキャリア密度依存性

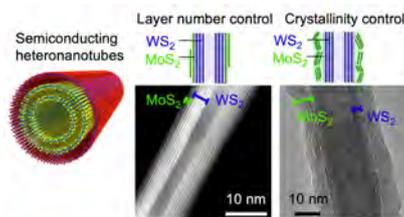


図 2: ヘテロナノチューブの創出

2. 研究業績

1) 論文

J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu: "Continuous Color - Tunable Light-Emitting Devices Based on Compositionally Graded Monolayer Transition Metal Dichalcogenide Alloys", *Adv. Mater.*, **44** (2022) 2203250

S. Furusawa, Y. Nakanishi, Y. Yomogida, Y. Sato, Y. Zheng, T. Tanaka, K. Yanagi, K. Suenaga, S. Maruyama, R. Xiang, Y. Miyata: "Surfactant-Assisted Isolation of Small-Diameter Boron-Nitride Nanotubes for Molding One-Dimensional van der Waals Heterostructures", *ACS Nano*, **10** (2022) 16636-16644

V. Milotti, C. Berkmann, J. Laranjeira, W. Cui, K. Cao, Y. Zhang, U. Kaiser, K. Yanagi, M. Melle - Franco, L. Shi, T. Pichler, P. Ayala: "Unravelling the complete Raman response of graphene nanoribbons discerning the signature of edge passivation", *Small Methods*, **8** (2022) 2200110

H. Ou, T. Yamada, M. Mitamura, Y. Edagawa, T. D. Matsuda, K. Yanagi, C. H. Chen, L. J. Li, T. Takenobu, J. Pu: "Electric-field-induced metal-insulator transition and quantum transport in large-area polycrystalline monolayers", *Phys. Rev. Mater.*, **6** (2022) 064005

M. Omprakash, H. Usui, K. Yanagi, Y. Mizuguchi, Y. Goto: "Conserved axis-dependent conduction polarity in NaSnAs polycrystalline bulk sample for transverse thermoelectric application", *Mater. Today Commun.*, **31** (2022) 103558

K. Ueji, N. Muto, D. Heimfarth, Y. Matsuoka, Y. Ichinose, Y. Yomogida, T. Yagi, J. Zaumseil, K. Yanagi: "Heat and Charge Carrier Flow through Single-Walled Carbon Nanotube Films in Vertical Electrolyte-Gated Transistors: Implications for Thermoelectric Energy Conversion", *ACS Appl. Nano Mater.*, **5** (2022) 6100-6105

Md. A. Rahman, Y. Yomogida, M. Nagano, R. Tanaka, K. Yanagi: "Structures and optical properties of thin tungsten oxide nanowires treated with poly (ethylene glycol)", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61** (2022) SD1018

H. Shimizu, J. Pu, Z. Liu, H. E. Lim, M. Maruyama, Y. Nakanishi, S. Ito, I. Kikuchi, T. Endo, K. Yanagi, Y. Oshima, S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata: "Formation of a Two-Dimensional Electronic System in Laterally Assembled WTe Nanowires", *ACS Appl. Nano Mater.*, **5** (2022) 6277-6284

Y. Yomogida, K. Horiuchi, R. Okada, H. Kawai, Y. Ichinose, H. Nishidome, K. Ueji, N. Komatsu, W. Gao, J. Kono, K. Yanagi: "Hall effect in gated single-wall carbon nanotube films", *Sci. Rep.*, **12** (2022) 101

2) 特許

蓬田陽平, 柳和宏, 田中涼雅: 遷移金属カルコゲナイドナノチューブの製造方法, 特願 2021-025512

3) 学会講演

● 第63回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2022年8月31日-9月2日 (東京都立大学)

Rikuto Abe, Yuuya Hosokawa, Mikito Omoto, Syojiro Asatori, Sota Nakamura, Akane Ihara, Kanna Ikoma, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Formation of tellurium nanowire in enantiomer sorted single walled carbon nanotubes

Hiroyuki Nishidome, Kohei Nagai, Kento Uchida, Yuta Murakami, Kenji Kawahara, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Hiroki Ago, Koichiro Tanaka, and Kazuhiro Yanagi: Influence of laser intensity on high-harmonic generation in semiconducting single-walled carbon nanotubes: Experiment and calculation

Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Yasumitsu Miyata and Kazuhiro Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of CVD grown tungsten oxide nanowires

Shigeki Saito, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi, Hiroyuki Nishidome: Improvement of alignment ratio of single walled carbon nanotube thin film through exfoliation processes

Yuuya Hosokawa, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Circular dichroism of trion in single walled carbon nanotubes

● 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022 年 9 月 20 日-23 日 (東北大学)

上治寛, 蓬田陽平, 八木貴志, Jana Zaumseil, 柳和宏: sp^3 欠陥を有する半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜の面直方向の熱・電気特性

永野真衣, 蓬田陽平, Zheng Liu, Md. Ashiqur Rahman, 上治寛, 八木貴志, 中西勇介, 宮田耕充, 柳和宏: 遷移金属ダイカルコゲナイドヘテロナノチューブの合成

細川祐矢, 上治寛, 蓬田陽平, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブにおけるトリオンの円偏光二色性

● 第 64 回フラーレンナノチューブグラフェン総合シンポジウム 2023 年 3 月 1 日-3 日 (名古屋大学)

Abdul Ahad, Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Mai Nagano, Ihara Akane, Yasumitsu Miyata and Kazuhiro Yanagi: Comparative Study on the CVD Synthesis of Tungsten Oxides Nanowires Using Different Substrates

Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Abdul Ahad, Mai Nagano, Akane Ihara, Hiroyuki Nishidome, Mikito Omoto, Yasumitsu Miyata and Kazuhiro Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS_2 nanotubes by sulfurization of CVD grown tungsten oxide nanowires and their optical properties

Mikito Omoto, Hiroyuki Nishidome, Kento Uchida, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Control of high-harmonic generation in MoS_2 by carrier injection

Akane Ihara, Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of WSe_2 and janus $WSSe$ nanotubes

Hiroyuki Nishidome, Mikito Omoto, Kohei Nagai, Kento Uchida, Yuta Murakami, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Control of high-harmonic generation in single-walled carbon nanotubes from non-perturbative to perturbative regime by tuning the Fermi level

Kazuhiro Yanagi, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Yota Ichinose: Unified understanding on the temperature dependence of the thermoelectric properties of single walled carbon nanotube thin films with controlled carrier injection

Shojiro Asatori, Rikuto Abe, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric properties of aligned single chirality single-walled carbon nanotubes thin film

● 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 2023 年 3 月 15 日-18 日 (上智大学)

大元幹人, 西留比呂幸, 内田健人, 枝淳子, 大久保瞳, 上治寛, 蓬田陽平, 田中耕一郎, 柳和宏: キラルな単層カーボンナノチューブにおける高次高調波発生円二色性

西留比呂幸, 大元幹人, 永井恒平, 内田健人, 村上雄太, 河原憲治, 枝淳子, 大久保瞳, 蓬田陽平, 吾郷浩樹, 田中耕一郎, 柳和宏: 印加電場による高次高調波発生 of トンネリング過程の制御

Akane Ihara, Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: WSe₂ ナノチューブ及びヤヌス WSSe ナノチューブの合成

Kazuhiro Yanagi, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Yota Ichinose: Unified understanding on the temperature dependence of the thermoelectric properties of single walled carbon nanotube thin films with controlled carrier injection

安倍陸斗, 朝鳥祥史郎, 蓬田陽平, 上治寛, 柳和宏: 配向した単一カイラリティ単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電変換特性

● 第9回 ZAIKEN Festa 2022 年9月10日 (早稲田大学)

永野真衣, 蓬田陽平, Zheng Liu, Md. Ashiqur Rahman, 上治寛, 八木貴志, 中西勇介, 宮田耕充, 柳和宏: 結晶性を制御した遷移金属ダイカルコゲナイドヘテロナノチューブの合成

● 学振 R031 ハイブリッド量子ナノ技術委員会 第7回研究会 2022年8月3日 (online)

柳和宏: カーボンナノチューブを用いた熱電変換 (招待講演)

国際会議

● 22st International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT22) 2021年6月19日-24日 (Korea)

Kan Ueji, Nobuhiro Muto, Daniel Heimfarth, Yuya Matsuoka, Yota Ichinose, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi: Thermal Conductivity of Single-walled Carbon Nanotube Films in Vertical Electrolyte-gated Transistors

Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Yasumitsu Miyata and Kazuhiro Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of poly(ethylene glycol) treated thin tungsten oxide nanowires

Hiroyuki Nishidome, Kohei Nagai, Kento Uchida, Yuta Murakami, Kenji Kawahara, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Hiroki Ago, Koichiro Tanaka, and Kazuhiro Yanagi: Influence of Laser-intensity on the Fermi-level dependence of high-harmonic generation from single-walled carbon nanotubes

Mai Nagano, Yohei Yomogida, Zheng Liu, Md. Ashiqur Rahman, Kan Ueji, Takashi Yagi, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of Hetero Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes

● 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) 2022年11月8日-11日 (徳島)

Kan Ueji, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi: Out-of-plane heat and electrical flows in semiconducting single-walled carbon nanotube films with sp³ defects

Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Yasumitsu Miyata and Kazuhiro Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of poly(ethylene glycol) treated thin tungsten oxide nanowires

Shigeki Saito, Kan Ueji, Yohei Yomogida and Kazuhiro Yanagi: Extraction of aligned carbon nanotube layer using exfoliation processes

Yuuya Hosokawa, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Circular dichroism of trion in single walled carbon nanotubes

● The 35th International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPMN 2023) 2023年3月18日–24日 (Austria)

Y. Yomogida, F. L. Sebastian, Y. Hosokawa, N. F. Zorn, S. Wieland, K. Yanagi, J. Zaumseil: Circularly polarized near-infrared light-emitting transistors with enantiomer-sorted single-wall carbon nanotubes

● 241th ECS Meeting 2022年5月29日–6月2日 (Online)

Kazuhiro Yanagi: Strategy to Enhance the Power Factor in Carbon Nanotubes (招待講演)

Kazuhiro Yanagi: Ultra-Low Thermal Conductance across Hetero-Structured Four-Layered Van Der Waals Materials (招待講演)

● 12th A3 symposium 2022年11月7日–9日 (Online)

Kazuhiro Yanagi: Relationships between carrier density and thermal conductivity of single wall carbon nanotube thin films (招待講演)

● International Conference on Organic and Hybrid Thermoelectrics (ICOT2022) 2022年10月24日–25日 (北九州)

Kan Ueji, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi: Out-of-plane heat and electrical flows in semiconducting single-walled carbon nanotube film

ナノ物性研究室

1. 研究活動の概要

数原子幅の厚さを持つシート，ワイヤー，チューブ構造を持つナノ物質では，バルク物質では見られない興味深い性質が現れる．本グループでは，遷移金属カルコゲナイド（TMC）を中心とするナノ構造物質系において，試料作製と物性実験に関する研究を進めている．2022年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである．

1) 原子層および原子層ヘテロ構造の作製と物性解明

原子層物質のヘテロ構造は，異なる原子層の複合化による物性制御や光・電子デバイス応用が期待されている．本グループでは，遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）原子層の化学気相成長や転写法，そして作製したヘテロ構造の光・電子物性について研究を進めてきた．今年度は，TMDCにおける面内および積層ヘテロ構造の作製と電子輸送特性（小倉博士論文，山口，修士論文，戸井田卒業研究），1次元TMDCナノ構造の作製と光・電子物性（橋本修士論文，金修士論文），異種元素をドーピングしたTMDCの熱電物性などについて研究を進めた．特に，TMDCの多層面内接合に関する成長技術や様々なTMDC試料の積層技術が進展した．引き続き試料の高品質化を通じ，TMDCヘテロ系の物性研究を進めていく．

2) ナノワイヤー・ナノチューブの合成と物性解明

遷移金属カルコゲナイドのナノワイヤーやナノチューブは，その特異な結晶構造に由来する物性が注目を集めている．一方で，その良質な試料の作製技術が課題となっている．今年度は，多数のTMC原子細線が凝集した束状試料，またインジウム原子をインターカレーションした試料などの電子輸送特性（清水博士論文，島村卒業研究）や，窒化ホウ素（BN）ナノチューブをテンプレートとしたTMDCナノリボンの合成と構造解析（田中卒業研究）を進めた．インターカレーションに関しては，処理条件の改善により良質な試料の作製に成功し，金属的な電気伝導の測定や偏光依存ラマンスペクトルの実験および理論的な解析を行った．TMDCナノリボンの合成については，様々な幅のナノリボンの作製と構造解析を行った．今後，その単一のナノリボン試料の顕微分光計測を目指した研究を進めていく．

3) 学外共同利用施設による研究，その他

2. 研究業績

1) 論文

S. Zhang, M. Maruyama, S. Okada, M. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Hashimoto, Y. Miyata, R. C.-Vitoria, R. Kitaura: "Observation of the photovoltaic effect in a van der Waals heterostructure", *Nanoscale*, **15** (2023) 5948-5953

R. Natsui, H. Shimizu, Y. Nakanishi, Z. Liu, A. Shimamura, N. T. Hung, Y.-C. Lin, T. Endo, J. Pu, I. Kikuchi, T. Takenobu, S. Okada, K. Suenaga, R. Saito, Y. Miyata: "Vapor-Phase Indium Intercalation in van der Waals Nanofibers of Atomically Thin W₆Te₆ Wires", *ACS Nano*, **17** (2023) 5561-5569

H. Ogura, S. Kawasaki, Z. Liu, T. Endo, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Nakanishi, H. E. Lim, K. Yanagi, T. Irisawa, K. Ueno, S. Okada, K. Nagashio, Y. Miyata: "Multilayer In-Plane Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides for Advanced Electronics", *ACS Nano*, **17** (2023) 6545-6554

- W. H. Chang, S. Hatayama, Y. Saito, N. Okada, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: "Sb₂Te₃/MoS₂ Van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance", *Adv. Electron. Mater.*, **9** (2023) 2201091
- H. Ou, K. Oi, R. Usami, T. Endo, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu: "Ion-gel-based light-emitting devices using transition metal dichalcogenides and hexagonal boron nitride heterostructures", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62** (2023) SC1026
- M. Shimasaki, T. Nishihara, N. Wada, Z. Liu, K. Matsuda, Y. Miyata, Y. Miyauchi: "Anisotropic exciton drift-diffusion in a monolayer WS₂xSe(2-2x) alloy with a gradually changing composition", *Appl. Phys. Express*, **16** (2023) 012010
- H. Mogi, Y. Arashida, R. Kikuchi, R. Mizuno, J. Wakabayashi, N. Wada, Y. Miyata, A. Taninaka, S. Yoshida, O. Takeuchi, H. Shigekawa: "Ultrafast nanoscale exciton dynamics via laser-combined scanning tunneling microscopy in atomically thin materials", *NPJ 2D Mater. Appl.*, **6** (2022) 72
- S. Furusawa, Y. Nakanishi, Y. Yomogida, Y. Sato, Y. Zheng, T. Tanaka, K. Yanagi, K. Suenaga, S. Maruyama, R. Xiang, Y. Miyata: "Surfactant-Assisted Isolation of Small-Diameter Boron-Nitride Nanotubes for Molding One-Dimensional van der Waals Heterostructures", *ACS Nano*, **16** (2022) 16636-16644
- J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu: "Continuous Color-Tunable Light-Emitting Devices Based on Compositionally Graded Monolayer Transition Metal Dichalcogenide Alloys", *Adv. Mater.*, **34** (2022) 2203250
- Y. Nakanishi, M. Nagata, H. Yasui, K. Sato: "Gd-Encapsulated Carbon Nanotubes as Dual-Modal Probes for Magnetic Resonance and Second Near-Infrared Emission", *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **11** (2022) 091002
- R. Canton-Vitoria, A. Z. Alsaleh, G. Rotas, Y. Nakanishi, H. Shinohara, F. D' Souza, N. Tagmatarchis: "Graphene performs the role of an electron donor in covalently interfaced porphyrin-boron azadipyrromethene dyads and manages photoinduced charge-transfer processes", *Nanoscale*, **14** (2022) 15060-15072
- T. Koyama, N. Umewaki, K. Saito, T. Tatsuno, A. Fujisaki, Y. Miyata, H. Kataura, H. Kishida: "Photoluminescence of metallic single-walled carbon nanotubes: Role of interband and intraband transitions", *Phys. Rev. B*, **106** (2022) 045421
- M. Okada, J. Pu, Y.-C. Lin, T. Endo, N. Okada, W.-H. Chang, A. K. Augustin Lu, T. Nakanishi, T. Shimizu, T. Kubo, Y. Miyata, K. Suenaga, T. Takenobu, T. Yamada, T. Irisawa: "Large-Scale 1T ' -Phase Tungsten Disulfide Atomic Layers Grown by Gas-Source Chemical Vapor Deposition", *ACS Nano*, **16** (2022) 13069-13081
- N. Wada, J. Pu, Y. Takaguchi, W. Zhang, Z. Liu, T. Endo, T. Irisawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata: "Efficient and Chiral Electroluminescence from In-Plane Heterostructure of Transition Metal Dichalcogenide Monolayers", *Adv. Func. Mater.*, **32** (2022) 2203602

H. Suzuki, R. Hashimoto, M. Misawa, Y. Liu, M. Kishibuchi, K. Ishimura, K. Tsuruta, Y. Miyata, Y. Hayashi: "Surface Diffusion-Limited Growth of Large and High-Quality Monolayer Transition Metal Dichalcogenides in Confined Space of Microreactor", *ACS Nano*, **16** (2022) 11360-11373

H. Mogi, Z.-h. Wang, I. Kuroda, Y. Takaguchi, Y. Miyata, A. Taninaka, Y. Arashida, S. Yoshida, O. Takeuchi, H. Shigekawa: "Laser-combined multiprobe microscopy and its application to the materials with atomic layer thickness", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61** (2022) SL1011-1-9

A. Yamashita, K. Hashimoto, S. Suzuki, Y. Nakanishi, Y. Miyata, T. Maeda, Y. Mizuguchi: "Fabrication of high-entropy REBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films by pulsed laser deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61** (2022) 050905

M. Shimasaki, T. Nishihara, K. Matsuda, T. Endo, Y. Takaguchi, Z. Liu, Y. Miyata, Y. Miyauchi: "Directional Exciton-Energy Transport in a Lateral Heteromonolayer of WSe₂-MoSe₂", *ACS Nano*, **16** (2022) 8205-8212

H. Ago, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio: "Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation", *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **23** (2022) 275-299

2) 著書

宮田耕充: "遷移金属カルコゲナイド原子層・原子細線の化学気相成長", 「表面と真空」65巻4号 p.196-201 (2022)

3) 学会講演

● 第63回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2022年8月31-9月2日 (東京都立大学)

R. Saito, N. T. Hung, R. Natsui, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Resonant Raman spectra of WTe and InWTe nanowire

M. Okada, J. Pu, Y.-C. Lin, N. Okada, W.-H. Chang, T. Endo, T. Shimizu, T. Kubo, Y. Miyata, K. Suenaga, T. Takenobu, T. Yamada, T. Irisawa: Phase-engineered synthesis of tungsten disulfide atomic layers

J. Pu, N. Wada, Y. Takaguchi, W. Zhang, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, Y. Miyata, T. Takenobu: Efficient and chiral electroluminescence from in-plane heterostructure of transition metal dichalcogenide monolayers

M. Kishibuchi, Z. Liu, Y. Miyata, Y. Hayashi, H. Suzuki: Growth of Monolayer Tungsten Disulfide Nanoribbons on Tungsten Oxide Nanowires and their Electrical Transport Measurements

R. Hashimoto, M. Misawa, K. Tsuruta, Y. Miyata, Y. Hayashi, H. Suzuki: Growth of Large and High-Quality Monolayer WS₂ in Confined Space of Substrate-stacked Microreactor

R. Abe, Y. Hosokawa, M. Omoto, S. Asatori, S. Nakamura, A. Ihara, K. Ikoma, Y. Nakanishi, Y. Miyata, K. Ueji, Y. Yomogida, K. Yanagi: Formation of tellurium nanowire in enantiomer sorted single walled carbon nanotubes

Md. A. Rahman, Y. Yomogida, K. Ueji, M. Nagano, R. Tanaka, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of CVD grown tungsten oxide nanowires

S. Yamaguchi, R. Mizuno, H. Mogi, T. Endo, Y. Nakanishi, S. Yoshida, H. Shigekawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio, Y. Miyata: Anomalous transfer characteristics of MoS₂-based vertical heterostructures

H. Shimizu, J. Pu, Z. Liu, H. E. Lim, M. Maruyama, Y. Nakanishi, S. Ito, I. Kikuchi, T. Endo, K. Yanagi, Y. Oshima, S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata: 2D electronic transport properties of laterally-assembled WTe nanowires

H. Ogura, S. Kawasaki, Z. Liu, T. Endo, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Nakanishi, H. E. Lim, K. Yanagi, T. Irisawa, K. Ueno, S. Okada, K. Nagashio, Y. Miyata: Fabrication and characterization of multilayer in-plane heterostructures based on transition metal dichalcogenides

R. Usami, K. Oi, M. Matsuno, T. Endo, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu: Electric double layer doping in WSe₂/WS₂ van der Waals heterostructure

R. Natsui, Y. Nakanishi, N. T. Hung, H. Shimizu, Z. Liu, Y.-C. Lin, K. Suenaga, R. Saito, Y. Miyata: Improved metal intercalation into crystalline W₆Te₆ bundles

S. Furusawa, Y. Nakanishi, Y. Sato, Y. Yomogida, K. Yanagi, K. Suenaga, Y. Miyata: Structural diversity in single-walled transition metal dichalcogenide nanotubes synthesized via template reaction

Y. Tamogami, T. Endo, K. Hashimoto, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Growth and characterization of long-length MoS₂ nanoribbons

W. Zhang, T. Ogawa, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Miyata: All-dry fabrication of hBN-encapsulated MoS₂/MoSe₂ twisted heterobilayers and their photoluminescence properties

K. Hashimoto, T. Endo, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Effect of fabrication processes on the work function of monolayer MoS₂

● 日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 12–15 日 (東京工業大学)

菊地伊織, 清水宏, Hong En Lim, 遠藤尚彦, 中西勇介, 宮田耕充, 蒲江, 竹延大志: W₆Te₆ ナノワイヤーによるファンデルワールス構造体の電気伝導特性

松野元紀, 高橋統吾, 張紹春, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 北浦良, 蒲江, 竹延大志: 単層 WS₂ 及びその積層構造の異常光起電力効果

● 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022 年 9 月 20–23 日 (東北大学)

橋本龍季, 三澤賢明, 鶴田健二, 宮田耕充, 林靖彦, 鈴木弘朗: 閉じ込め空間による大面積・高品質単層二硫化タングステンの拡散律速成長と光電子デバイス応用

岸淵美咲, 劉崢, 宮田耕充, 林靖彦, 鈴木弘朗: 酸化タングステン上に成長した二硫化タングステンナノリボンの電気特性評価

永野真衣, 蓬田陽平, ムハンマドアシク ラハマン, 上治寛, 八木貴志, 中西勇介, 宮田耕充, 柳和宏: 遷移金属ダイカルコゲナイドヘテロナノチューブの合成

● 2022年度第9回 ZAIKEN Festa 2022年10月6日 (早稲田大学)

永野真衣, 蓬田陽平, Md. Ashiqur Rahman, Zheng Liu, 上治寛, 八木貴志, 中西勇介, 宮田耕充, 柳和宏: 結晶性を制御した遷移金属ダイカルコゲナイドヘテロナノチューブの合成

● ナノ科学シンポジウム 2022 2022年11月18日 (東京大学)

宮田耕充: 一次元遷移金属カルコゲナイドの成長と評価 (招待講演)

● 東北大プラズマフォーラム 第10回東北大プラズマフォーラム 2023年2月21日 (東北大)

中西勇介: Exploration of novel nanomaterials using 'nano-test-tubes'

● 第64回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2023年3月1-3日 (名古屋大学)

J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu: Continuous color-tunable light-emitting devices based on compositionally graded monolayer transition metal dichalcogenide alloys

T. Ogawa, W. Zhang, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Kato, Y. Miyata: Photoluminescence properties of Janus MoSSe monolayers prepared on hBN

K. Oi, J. Pu, H. Ou, R. Usami, T. Endo, Y. Miyata, K. Shinokita, K. Matsuda, T. Takenobu: Fabrication of highly strained monolayer light-emitting devices

K. Zhou, K. Ueji, T. Endo, Y. Miyata, R. Abe, H. Nishidome, S. Nakamura, Y. Yomogida, K. Yanagi: Investigation of the cross-plane electrical conductance in stacked multilayer van der Waals heterostructure with ultralow thermal conductance

H. Ou, J. Pu, E. Takahiko, Y. Miyata, T. Takenobu: Strain modulation of moiré pattern in 2D material heterobilayers

R. Natsui, Y. Nakanishi, Z. Liu, N. T. Hung, Y.-C. Lin, T. Endo, K. Suenaga, R. Saito, Y. Miyata: Polarized Raman spectroscopy of Indium-Intercalated Nanofibers of W6Te6 Atomic Wires

H. Ogura, S. Kawasaki, Z. Liu, T. Endo, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Nakanishi, H. E. Lim, K. Yanagi, T. Irisawa, K. Ueno, S. Okada, K. Nagashio, Y. Miyata: Growth, structures, and transport properties of MoS₂-based multilayer in-plane heterostructures

Y. Makino, W. Zhang, H. Kim, H. Wang, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Kato, Y. Miyata: Fabrication and photoluminescence properties of hBN-encapsulated Janus WSSe/WSe₂ heterobilayers

M. Omoto, H. Nishidome, K. Uchida, T. Endo, Y. Miyata, K. Ueji, Y. Yomogida, K. Tanaka, K. Yanagi: Control of high-harmonic generation in MoS₂ by carrier injection

Md. A. Rahman, Y. Yomogida, M. Nagano, A. Ahad, A. Ihara, H. Nishidome, M. Omoto, K. Ueji, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of CVD grown tungsten oxide nanowires and their optical properties

Y. Tamogami, T. Endo, K. Hashimoto, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Anisotropic thermal etching of CVD-grown monolayer WS₂

S. Toida, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Eda, Y. Miyata: Control of transport properties of WS₂/MoS₂ vertical heterostructures by surface oxidation

Y. Totani, Y. Nakanishi, R. Kuroda, K. Kanahashi, S. Ito, J. Pu, S. Aoyagi, T. Takenobu, Y. Miyata: Effect of Nb doping on electronic structures and thermoelectric properties of layered MoS₂

A. Ahad, Md. A. Rahman, Y. Yomogida, K. Ueji, M. Nagano, A. Ihara, Y. Miyata, K. Yanagi: Comparative Study on the CVD Synthesis of Tungsten Oxides Nanowires Using Different Substrates

● 研究会「1次元, 2次元物質科学の展望と課題」 2023年3月10日(東北大学)

宮田耕充: 一次元遷移金属カルコゲナイド細線の展望と課題(招待講演)

● 2.5次元物質科学(学術変革A)第4回 領域会議 2023年3月13-14日(つくば国際会議場)

宮田耕充: 2.5次元集積構造の化学気相成長と機能開拓

小倉宏斗: Fabrication and characterization of multilayer in-plane heterostructures based on transition metal dichalcogenides

● 第70回応用物理学会春季学術講演会 2023年3月15-18日(上智大学)

蒲江, 欧昊, 山田知之, 和田尚樹, 内藤響, 小倉宏斗, 遠藤尚彦, 劉崢, 入沢寿史, 柳和宏, 中西勇介, 高燕林, 丸山実那, 岡田晋, 篠北啓介, 松田一成, 宮田耕充, 竹延大志: 遷移金属ダイカルコゲナイド単層混晶膜を用いた波長可変発光デバイス

橋本龍季, 三澤賢明, 鶴田健二, 宮田耕充, 林靖彦, 鈴木弘朗: マイクロリアクタ内の閉じ込め空間制御による遷移金属ダイカルコゲナイドのミリスケール化と面内ヘテロ成長(招待講演)

国際会議

● 241st ECS Meeting, 2022年6月2日(オンライン)

Yusuke Nakanishi: Atomically Precise Synthesis of 1D Transition Metal Chalcogenides Using Nano-Test-Tubes

● NT21 2022年6月19-24日(Sungkyunkwan University in Suwon, Republic of Korea)

M. Nagano, Y. Yomogida, Md. A. Rahman, Y. Nakanishi, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of Hetero Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes

● 10th A3 Meeting, 2022年7月6日(オンライン)

Yusuke Nakanishi: Rolling 2D sheets into 1D nanotubes by using nano-test-tubes

● 12th A3 Symposium on Emerging Materials 2022 年 11 月 7–9 日 (早稲田大学)

Y. Miyata: Growth of one-dimensional transition metal chalcogenides (Invited Talk)

● MNC2022 2022 年 11 月 8–11 日 (JR ホテルクレメント徳島)

R. Usami, K. Oi, M. Matsuno, T. Endo, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu: Electric double layer doping in WSe₂/WS₂ van der Waals heterostructure

Md. A. Rahman, Y. Yomogida, K. Ueji, M. Nagano, R. Tanaka, Ya. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of poly(ethylene glycol) treated thin tungsten oxide nanowires

● ICPAC, 2022 年 11 月 24 日 (オンライン)

Yusuke Nakanishi: Atomically precise fabrication of 1D chalcogenides using nano-test-tubes

● 2022 MRS fall meeting 2022 年 11 月 27–12 月 2 日 (Boston, Massachusetts, USA)

H. Suzuki, M. Kishibuchi, S. Ochiai, Y. Liu, R. Hashimoto, Z. Liu, Y. Miyata, Y. Hayashi: Selective Monolayer Growth of Tungsten Disulfide Nanoribbons on Tungsten Oxide Nanowires by Self-limiting Mechanism

● The 11th International Workshop on 2D Materials 2023 年 2 月 17–18 日 (President Hotel, Seoul)

J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu: Continuous color-tunable light-emitting devices based on compositionally graded monolayer transition metal dichalcogenide alloys

編集後記

2022年度を振り返ると、コロナ禍からポストコロナへの過渡期だったと感じる。授業は基本的には対面に戻り、新しい対面授業が定着した。私たち教員も、コロナ禍でオンラインツールを用いた授業スキルを得られたため、以前よりも教育効果の高い授業を行えていると感じた。学生の海外学会参加や留学の機会も増え、海外の共同研究者との数年ぶりの再会を楽しんだ方も多いと思う。2022年度前半は帰国時のPCR検査が義務付けられており、他大の先生方、学生さんたちと一緒に結果を待っていた時のあのドキドキも、今となってはいい思い出である（幸運にも私たちは全員陰性だったからだが...）。年度末にマスク着用の推奨が無くなり、日本もポストコロナに移行したと感じた。私事だが、2023年度に少し長めのローマ大滞在の予定がある。2023年は何も起きずに、無事に滞在できることを祈っている。

(水口佳一 記)

2022年度 年次報告編集委員
角野秀一（2022年度物理学教室主任）
水口佳一
山下愛智