

研究室活動状況 2021 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) 高エネルギーニュートリノにおけるステライルニュートリノ振動 (安田, ワン)

過去に報告されている LSND 実験・MiniBooNE 実験・原子炉ニュートリノ異常・ガリウム異常等の実験結果はニュートリノのフレーバーが変換している現象と考えられる。これらをニュートリノ振動の仮説で説明しようとする、標準的な3世代のニュートリノ混合では説明出来ず、弱い相互作用すらしないステライルニュートリノと呼ばれる粒子を導入しなければならないことが知られている。最近では、ミューニュートリノ ν_μ (反ミューニュートリノ $\bar{\nu}_\mu$) から電子ニュートリノ ν_e (反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$) への変換と解釈される LSND 実験 ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$)・MiniBooNE 実験 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) の結果は、他の $\nu_e \rightarrow \nu_e$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ に対する否定的結果から推論される $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の確率の上限値よりも高い値を必要とするため、ステライルニュートリノ振動の仮説で説明することには無理があると考えられるようになっている。一方、 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ の原子炉ニュートリノ異常に関してはステライルニュートリノ振動の仮説がまだ否定される段階には至っていない。ニュートリノ振動の小さな混合角の兆候をとらえるには、MSW 効果と呼ばれる、物質による混合角の増幅現象を用いるのが有利である。ステライルニュートリノ振動を示唆する実験結果はその質量自乗差が標準的な3世代の枠組みの値よりも大きいため、物質効果による混合角の増幅を起こすためには1TeV以上の高エネルギー領域のニュートリノの観測が必要となる。この研究では、ニュートリノの観測施設であるIceCubeの拡張版を想定して高エネルギー大気ニュートリノ・宇宙ニュートリノのうちの ν_e 成分に着目し、 ν_e がニュートリノ振動に関与すれば、 ν_e のエネルギースペクトルにへこみが観測されるはずであることから ν_e の混合角である θ_{14} に制限が付けられることを指摘した。高エネルギー領域の大気ニュートリノの ν_e のフラックスと宇宙ニュートリノのフラックスは非常に小さいため、現在のIceCubeの10倍以上の体積の観測施設が必要となるが、その感度は短基線原子炉ニュートリノによる制限よりも良くなることが示された。

2) 余剰次元模型におけるゲージ対称性の自発的破れの動力学 (北澤)

空間に3次元より多い次元(コンパクト化された余剰次元)を想定した場合に可能なゲージ対称性の自発的破れの機構がある。それは余剰次元空間内に自明でないゲージ場(ベクトル場)の配位がある場合には、余剰次元空間方向を向くゲージ場(3次元空間においてはスカラー場に見える)の2乗質量が負になる場合があることを利用するものである。この機構を電弱対称性の自発的破れへと応用すべく、そのダイナミクスについて詳細に検討した。その結果、これまでは重要でないと思われてきた自由度が実は非常に重要であることを明らかにした。その自由度とは余剰次元空間内での励起状態で、通常は重い質量を持つ粒子に対応するために、低いエネルギーの正解では無視できると考えられるものであるが、ゲージ対称性の自発的破れの真の真空においては、その質量がゼロになる場合があることを明らかにした。これまで構成された数々の余剰次元模型において、電弱対称性の自発的破れが期待するようには起きないものがあることを明らかにした。

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。

3) 宇宙の再電離化過程と大きなスケールのゆらぎの偏極 (北澤)

宇宙背景放射の長波長のゆらぎの偏極は宇宙の再電離化の時期に生成される。宇宙の再電離化の時期の宇宙膨張は未知の暗黒エネルギーの性質(その自明でない状態方程式)の影響を受ける。そこで、タイプIa型超新星の観測データ(Pantheon sample)によってまだ許されている程度に時間に依存して変化する真空エネルギーを想定し、その効果が宇宙背景放射の長波長のゆらぎの偏極にどのように反映するかど

うかを詳細な数値計算によって明らかにした。その結果、長波長のゆらぎの偏極の強度が強くなることを確認した。また、この偏極の生成は未知の再電離化過程そのものの不定性にも非常に強く依存するので、その不定性の影響を受けにくい観測量についての検討を行った。その結果、BモードおよびEモードと呼ばれる二つの偏極の比を考えることが有効であることを見出した。

2. 研究業績

1) 論文

Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa and Takao Suyama, Gauge Symmetry Restoration by Higgs Condensation in Flux Compactifications on Coset Spaces, *Physical Review D* **105** (2022) 045008.

Noriaki Kitazawa, Polarization of CMB and possible time dependence of dark energy, *Physics of the Dark Universe* **35** (2021) 100937.

Yabin Wang and Osamu Yasuda, Search for sterile neutrinos by shower events at a future neutrino telescope, *PTEP* **2022** (2022) 023B04.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 14 日 – 17 日 (オンライン)

Y. Wang, O. Yasuda : Phenomenology of sterile neutrino oscillations at a future neutrino telescope

● 新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会, 2022 年 3 月 7 日–8 日, 千葉市生涯学習センターホール, オンライン同時開催

O. Yasuda: “C02 Summary”

Y. Wang: “Search for sterile neutrinos by IceCube shower events”

3) 著書・学会誌等

安田修：書評「ニュートリノの物理学」
数理科学 (サイエンス社) 2021 年 11 月号 No.701, p72.

安田修：ニュートリノとマヨラナ粒子
数理科学 (サイエンス社) 2022 年 4 月号 No.706, p14.

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

Research of our Laboratory in the academic year 2021/2022 was devoted to theoretical studies of cosmological inflation in the early Universe, primordial black holes, induced gravitational waves and the dark matter composition. This 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.

We studied the known approximate equivalence (without supersymmetry) between the Starobinsky and Higgs models of inflation in the large-field approximation, which leads to the common inflaton scalar potential. We extended this equivalence to the supergravity theory by using the minimal supergravity framework with a single (inflaton) scalar. In our new supergravity model, the Starobinsky and Higgs pictures of inflation arise in two different gauges of the same theory (S.Ketov).

Our main new research results describe the mechanism of the primordial black holes formation due to tachyonic instabilities of the scalar fields, that leads to a significant amplification of the scalar power spectrum. A contribution of primordial black holes to the observed dark matter in several extensions of the Starobinsky model of inflation in modified gravity was studied in detail. Our models feature a multi-field mechanism that leads to generation of a sharp peak in the power spectrum at small wave lengths, which is responsible for a production of primordial black holes. This mechanism is different from the single-field models and requires a stochastic treatment during the intermediate phase of the inflationary dynamics. Our model has the effective single-field Starobinsky inflation for the wave lengths probed by the Cosmic Microwave Background radiation, and can explain the observed cold dark matter content in the Universe by the formation of primordial black holes (S.Ketov).

Primordial black holes can be viewed as a probe of supergravity theory and as a cosmic window into fundamental physics beyond the Standard Models of cosmology and elementary particles. Our theoretical models can be used for discrimination of phenomenological models of the early Universe cosmology. We estimated the masses of primordial black holes and found their density fraction as part of dark matter. Our supergravity models are in agreement with the inflationary observables, and predict the masses of primordial black holes in the range between 10^{16} g and 10^{20} g. We computed the spectrum of the gravitational waves induced by primordial black holes in our models, and showed that these gravitational waves can be detected by the future gravitational interferometers such as the LISA, DECIGO, TAIJI and Tian Qin projects.

We investigated the parameter space of our models of cosmological inflation and primordial black hole formation in the Starobinsky supergravity. Our models describe the double inflation, whose first stage is driven by Starobinsky inflaton, and whose second stage is driven by another scalar belonging to the supergravity multiplet. The “ultra-slow-roll” regime between the two stages leads a large peak (enhancement) in the power spectrum of scalar perturbations, which results in efficient formation of primordial black holes. Those features are generic in our models, while the primordial black holes can account for a significant part or the whole of dark matter. Some of the earlier proposed models in the same class are in tension with the observed value of the scalar tilt, so that we proposed more general models, and investigated the dependence of the cosmological tilts and the scalar power spectrum

enhancement upon the parameters. The masses of primordial black holes and their density fraction (as part of dark matter) were also calculated. A good agreement with observations requires fine tuning of the parameters. Our models offer the (super)gravitational origin of inflation, primordial black holes and dark matter together, and may be confirmed or falsified by future precision measurements of the Cosmic Microwave Background radiation and the gravitational waves induced by the primordial black holes production (R.Ishikawa, S.Ketov).

2. 研究業績

1) 論文

A. Gundhi, S.V. Ketov and C.F. Steinwachs: "Primordial black hole dark matter in dilaton-extended two-field Starobinsky inflation", *Phys. Rev. D* **103** (2021) No. 8, 083518, 23 pages

S.V. Ketov: "Multi-field versus single-field in supergravity models of inflation and primordial black holes", *Universe* **7** (2021), No. 5, 115, 28 pages

R. Ishikawa and S.V. Ketov: "Exploring the parameter space of modified supergravity for double inflation and primordial black hole formation", *Class. Quant. Grav.*, **39** (2022) No. 1, 015016, 19 pages

V.R. Ivanov, S.V. Ketov, E.O. Pozdeeva and S.Yu. Vernov: "Analytic extensions of Starobinsky model of inflation", *JCAP* **03** (2022) 058, 28 pages

2) 学会講演

国際会議

● 7th International Symposium on Prospects in the Physics of Discrete Symmetries DISCRETE 2020-2021 2021年11月29–12月03日 (Bergen, Norway)

S.V. Ketov: On the large-field equivalence between Starobinsky and Higgs inflation in gravity and supergravity (invited talk)

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。2021年度の研究室構成はスタッフ1名、大学院生3名、卒研3名である。

1) 2粒子運動量相関関数を用いたチャンネル結合 $N\Sigma$ - $\Lambda\Lambda$ 相互作用の研究

ハドロンが多重発生する高エネルギー陽子陽子衝突および陽子原子核衝突実験で、終状態のハドロン対生成量の運動量依存性を調べることで、2粒子運動量相関関数を測定することができる。ハドロン間の終状態相互作用の情報が反映される2粒子相関関数は、ハドロン間相互作用を決定する新たな手法として注目を集めている。特に、直接の散乱実験が難しいストレンジネス $S = -2$ のバリオン対 ($p\Sigma^-$ および $\Lambda\Lambda$) に対して、最近LHCのALICE実験が2粒子相関関数を測定し、バリオン間相互作用の新たな情報が得られると期待されている。しかし $\Lambda\Lambda$ と $p\Sigma^-$ は強い相互作用で互いに遷移できるため、それぞれのチャンネルの独立な解析からは、相互作用の情報を正しく引き出すことができない。

本研究では $N\Sigma$ - $\Lambda\Lambda$ のチャンネル結合を陽に取り扱い、運動量相関関数の計算を行う。バリオン間の強い相互作用は、物理点近傍での格子QCD計算で求められたHAL QCDポテンシャルを用い、ガウス関数型のソース関数を利用する。チャンネル結合効果に加えて、アイソスピン多重項間の閾値のエネルギー差、荷電粒子間のクーロン相互作用などを完全な形で取り込んだバリオン間相関関数を計算する。結果として、ソース関数を適切に選ぶことで、 $p\Sigma^-$ および $\Lambda\Lambda$ 相関関数の実験データの特徴的な振る舞いが定量的に再現されることを示した。理論の予言が実験と一致したことにより、 $N\Sigma$ 相互作用と $\Lambda\Lambda$ 相互作用は共に引力的であるが、束縛状態や準束縛状態を作るほど相互作用は強くはないことが明らかになった。 $N\Sigma$ - $\Lambda\Lambda$ 系にはHダイバリオンと呼ばれる束縛状態があらわれる可能性が議論されていたが、本研究の結果は少なくとも $N\Sigma$ - $\Lambda\Lambda$ の閾値近傍には物理的な(準)束縛状態はあらわれないことを示唆している。

2) 有限レンジ補正を考慮した弱束縛関係式によるエキゾチックハドロンの構造

通常のハドロンはクォーク q を qqq (バリオン) または $q\bar{q}$ (メソン) と組み合わせる構成されるが、近年の実験の進展により、この分類に従わないエキゾチックな内部構造を持つハドロンの候補が見つまっている。特に、ハドロン自身を構成要素とし、ハドロン間相互作用によって形成されるハドロン分子状態と呼ばれる構造が注目を集めている。実際のハドロンの内部構造は様々な成分の重ね合わせで記述されるため、特定のハドロンの構造を議論する際には、複合性と呼ばれる指標 $0 \leq X \leq 1$ でハドロン分子状態の割合を定量化する。 $X \sim 1$ であればハドロン分子状態成分が支配的であり、 $X \sim 0$ であればそれ以外の成分が支配的となる。弱束縛関係式は、閾値近傍にあらわれるハドロンの複合性と、散乱長と束縛エネルギーという観測量の間にモデル非依存な関係を与えるため、重陽子や $\Lambda(1405)$ などのハドロンの内部構造の解析に用いられてきた。しかし有効レンジが相互作用距離に比べて無視できないほど大きい系では、弱束縛関係式をそのまま適用することはできない。

本研究では弱束縛関係式に有限レンジ補正を導入することで、有効レンジが無視できない系にも適用できるように改良する。解けるモデルを用いた数値計算によってレンジ補正の妥当性を検証し、改良した弱束縛関係式が従来のものより広い適用範囲を持つことを示した。さらに実際の系への応用として、重陽子、 $X(3872)$ 、 $N\Omega$ ダイバリオン、 $\Omega\Omega$ ダイバリオンなどのハドロン系だけでなく、原子核系である ${}^3_\Lambda\text{H}$ および原子系である ${}^4\text{He}$ ダイマーに応用し、これらの状態の内部構造では複合的成分が支配的であ

ることを定量的に明らかにした。特に $X(3872)$ と $N\Omega$ ダイバリオンは従来の弱束縛関係式では正しく複合性の推定ができず、レンジ補正で改良した弱束縛関係式が必要であることが示された。

3) 共鳴状態としての Ξ 励起状態の性質の解明

ストレンジネス $S = -2$ のバリオンである Ξ の励起状態は、通常のハドロン反応で生成することが難しいため実験データが乏しく、質量や崩壊幅などの基本的な性質が未解明の状態が多い。特に、 $\Xi(1620)$ と $\Xi(1690)$ と呼ばれる励起状態については、様々な理論計算が行われているものの性質の決定には至っていない。近年高エネルギー反応を利用した Belle 実験により、チャームを含む Ξ_c バリオンの $\pi\pi\Xi$ への弱崩壊が測定され、 $\pi\Xi$ 不変質量分布中に $\Xi(1620)$ と $\Xi(1690)$ のピーク構造が観測された。実験の解析では閾値効果が考慮されていないブライト・ウィグナー分布を用いられたが、 $\Xi(1620)$ と $\Xi(1690)$ のピーク位置はそれぞれ $\bar{K}\Lambda$ と $\bar{K}\Sigma$ の閾値エネルギーに近い。よってブライト・ウィグナー分布で決定された質量と崩壊幅は、閾値効果によって真の値からずれている可能性がある。

本研究では閾値効果を適切に取り扱うため、カイラルユニタリー法を用いてチャンネル結合メソン・バリオン散乱振幅を記述する。カイラルユニタリー法では、 $\Xi(1620)$ および $\Xi(1690)$ は 2 体散乱中の共鳴状態として相互作用から動的に生成される。 $\Xi(1620)$ を扱ったカイラルユニタリー法の先行研究の散乱振幅では、共鳴状態の崩壊幅が広く、実験で観測されたようなピーク構造を示さないが、モデルのパラメーターを適切に調整することで、実験で観測されるようなピーク構造が生まれることが示された。さらに、カイラルユニタリー法で計算した閾値効果を含むスペクトルと、ブライト・ウィグナー分布を比較することで、 $\Xi(1620)$ に対して閾値効果でピークの位置がずれることを明らかにした。

4) クォークとハドロンの自由度を含む結合ポテンシャルの解析

クォーク間の相互作用は、カラーの閉じ込めのために直接観測することができないため、主に第 1 原理計算である格子 QCD による数値計算で研究が行われてきた。クォーク質量が無限に重い極限では、クォーク間ポテンシャルが、短距離のクーロン成分と長距離での線形ポテンシャルで記述されることが知られている。また、軽いクォーク対生成によるメソン対との結合を取り入れると、ポテンシャルエネルギーがメソン対の閾値エネルギーと等しくなる距離で遷移が起こり、長距離のポテンシャルが定数になる。近年有限のクォーク質量でのクォーク間ポテンシャルの計算が可能になり、無限質量と同様にクーロンと線形のポテンシャルが生じることが示されたが、メソン対との結合が有限質量のクォーク間ポテンシャルに与える影響は未解明である。

本研究では、クォーク対とメソン対それぞれのチャンネルの相互作用ポテンシャルを用意し、遷移ポテンシャルを使ってチャンネル結合問題を定式化する。フェッシュバッハ射影を用いてメソン対の自由度をくりこんだクォーク間ポテンシャルを導出することで、有限クォーク質量でのクォーク間ポテンシャルの性質を明らかにする。結果として、遷移ポテンシャルの詳細によらず、メソン対のくりこみの効果によって非局所的でエネルギー依存性をもつクォーク間有効ポテンシャルが生じることが示された。メソン対生成の効果は、ポテンシャルのエネルギー依存性に反映されている。実際に、メソン対生成の閾値より高いエネルギーでは、崩壊の効果を表すポテンシャルの虚部が生じることが明らかになった。さらに、非局所性を微分展開により局所ポテンシャルで近似した場合は、ポテンシャルの虚部が再現されないことも示された。この結果は微分展開などの近似がポテンシャルの持つ物理的な性質を保たないことを示唆している。

2. 研究業績

1) 論文

T. Hyodo, M. Niiyama: "QCD and the Strange Baryon Spectrum", *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **120** (2021) 103868

Y. Kamiya, K. Sasaki, T. Fukui, T. Hyodo, K. Morita, K. Ogata, A. Ohnishi, T. Hatsuda: "Femto-scopic study of coupled-channel $N\Xi$ and $\Lambda\Lambda$ interactions", *Phys. Rev. C*, **105** (2022) 014915

2) 学会講演

● J-PARC ハドロン研究会 2022 2022 年 3 月 23–24 日 (J-PARC, Tokai, オンライン)

衣川友那, 兵藤哲雄: レンジ補正を考慮した弱束縛関係式の応用

西淵拓磨, 兵藤哲雄: 共鳴状態としての Ξ 励起状態の性質の解明

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォークとハドロンの自由度を含む結合ポテンシャルの解析

● 日本物理学会 2022 年年次大会 2022 年 3 月 15–19 日 (オンライン)

神谷有輝, 兵藤哲雄, 大西明: 高エネルギー衝突実験でのチャームメソン系の運動量相関関数

衣川友那, 兵藤哲雄: レンジ補正を考慮した弱束縛関係式の応用

西淵拓磨, 兵藤哲雄: 共鳴状態としての Ξ 励起状態の性質の解明

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォークとハドロンの自由度を含む結合ポテンシャルの解析

● 多彩なビーム実験と多様な理論的手法で迫るハドロン間相互作用 2021 年 11 月 4–5 日 (東北大学電子光理学研究センター)

衣川友那, 兵藤哲雄: 弱束縛関係式のレンジ補正による改良

西淵拓磨, 兵藤哲雄: 共鳴状態としての Ξ 励起状態の性質の解明

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォークとハドロンの自由度を含む結合ポテンシャルの解析

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 14–17 日 (オンライン)

神谷有輝, 兵藤哲雄, 大西明: 高エネルギー衝突実験でのメソンバリオンの相関関数の解析

衣川友那, 兵藤哲雄: 不安定状態の弱束縛関係式のレンジ補正による改良

● 原子核三者若手夏の学校 2021 2021 年 8 月 6–10 日 (オンライン)

兵藤哲雄: ハドロン共鳴状態とその構造 (招待講演)

衣川友那, 兵藤哲雄: 不安定状態の弱束縛関係式のレンジ補正による改良

西淵拓磨, 兵藤哲雄: 共鳴状態としての Ξ 励起状態の性質の解明

寺島伊吹, 兵藤哲雄: クォークとハドロンの自由度を含む結合ポテンシャルの解析

国際会議

● Second International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (2nd J-PARC HEF-ex WS) 2022 年 2 月 16–18 日 (Online)

Tetsuo Hyodo: $\Lambda(1405)$ as a hadronic molecule (Invited talk)

● The International School for Strangeness Nuclear Physics 2021 2021 年 12 月 13–16 日 (RCNP, Osaka Univ.)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Range correction in the weak-binding relation

Takuma Nishibuchi, Tetsuo Hyodo: Nature of excited Ξ baryons as resonances

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

● Double charm tetraquark and other exotics 2021 年 9 月 13–17 日 (Online)

Tetsuo Hyodo: Hadron-hadron interaction from heavy-ion results (Invited Talk)

● EXA online conference 2021 2021 年 9 月 13–17 日 (Online)

Yuki Kamiya, Tetsuo Hyodo, Akira Ohnishi: Theoretical analysis of the K^-p and meson-baryon correlation functions from high-energy collisions

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Range correction in the weak-binding relation for unstable states

● Particles and Nuclei International Conference (PANIC2021) 2021 年 9 月 5–10 日 (Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Range correction in the weak-binding relation for unstable states

● 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (HADRON2021) 2021 年 7 月 26–31 日 (Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Range correction in the weak-binding relation for unstable states

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現象、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研究を進めている。2021年度の研究室構成はスタッフ2名、学部学生3名である。

1) 高エネルギー天体現象と天体の進化

銀河団中心の活動銀河核の研究 銀河団の加熱源として有力と考えられている銀河団中心の活動銀河核 (AGN) について理論研究を行った。AGN が活動するためには、その中心にある超巨大ブラックホールに燃料となるガスが落下する必要がある。従来銀河団に充満する高温ガスがそのまま落下すると考えられていたが、我々は最近観測的に見つかりつつある銀河団中心の冷たいガスが燃料となっている可能性について考察した。具体的には準解析的理論モデルを構築し、その計算の結果以下のようなことがわかった。(1) 冷たいガスは高温ガスの放射冷却によって形成、蓄積され、燃料タンクのような働きをする。(2) 冷たいガスの一部はブラックホール周辺まで落下した後、核周円盤を形成する。核周円盤はブラックホールにガスを供給する。短期的には核周円盤からのガス供給は間欠的となり (図1)、活動銀河核の活動も間欠的になるが、長期的には時間平均したガス供給はほぼ一定となる。つまり核周円盤はガス供給の調整弁の役割を果たす。(3) 上の (1),(2) の効果により、AGN の活動は安定し、結果として銀河団を安定に加熱することがわかった。本研究は呉工業高等専門学校、国立天文台との共同研究である。

高エネルギー宇宙線の起源と超新星残骸 銀河系内に供給されている宇宙線陽子の多くは銀河系の中にある超新星残骸に起源があるとされている。しかし低いエネルギー ($\sim \text{TeV}$) の宇宙線についてその証拠があるものの、高いエネルギー ($\sim \text{PeV}$) の宇宙線については確かではない。そこでそもそも超新星残骸が PeV の宇宙線陽子を加速しているのかどうかを明らかにするために、銀河系内の超新星残骸 G106.3+2.7 のすぐく衛星の X 線データを解析した。その結果 X 線放射は超新星残骸ではなく、電波放射と同様に近傍のパルサーに起源をもつ宇宙線電子が放射していることがわかった (図2)。一方、G106.3+2.7 から放射されているガンマ線は X 線や電波と別の空間分布をしているので、 PeV 宇宙線陽子が放射しているものと考えられる。本研究は東京大学、近畿大学、大阪大学との共同研究である。

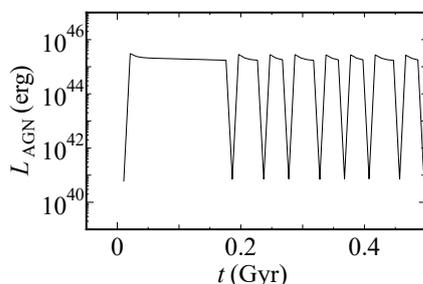


図 1: 変動する活動銀河核 (AGN) の光度

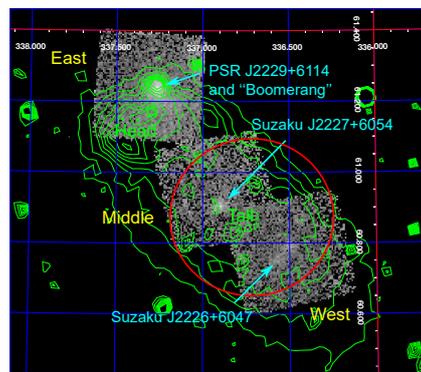


図 2: 超新星残骸 G106.3+2.7 の X 線放射 (グレー) と電波放射 (コントア)

2) 系外惑星

軌道要素の決定 Rossiter-MacLaughlin 効果を用いると、系外惑星のトランジット観測により、系の軌道要素に関する情報が得られる。本研究では、主星の微分回転を考慮することで、剛体回転を仮定した場合に縮退していたパラメータが解けることを指摘し、その定量的な評価を行い、観測可能性に関する議論をおこなった。

2. 研究業績

1) 論文

Yutaka Fujita, Aya Bamba, Kumiko K. Nobukawa, and Hironori Matsumoto: "X-Ray Emission from the PeVatron-candidate Supernova Remnant G106.3+2.7", *The Astrophysical Journal*, **912** (2021) 133

Yutaka Fujita, Nozomu Kawakatu Nozomu, and Hiroshi Nagai: "Massive Molecular Gas as a Fuel Tank for Active Galactic Nuclei Feedback In Central Cluster Galaxies", *The Astrophysical Journal*, **924** (2022) 24

Shin Sasaki, and Yasushi Suto: "Disentangling the stellar inclination of transiting planetary systems: Fully analytic approach to the Rossiter-McLaughlin effect incorporating the stellar differential rotation", *PASJ*, **73** (2021) 1656

2) 学会講演

● 日本天文学会 2021 年秋季年会 2021 年 9 月 13~16 日 (オンライン)

藤田裕, 馬場彩, 信川久実子, 松本浩典: すざくによる PeVatron 候補天体 G106.3+2.7 の観測

● 高エネルギー宇宙物理学研究会 2021 2021 年 11 月 22~24 日 (オンライン)

藤田裕, 川勝望, 永井洋: 冷たいガスを軸とした銀河団中心銀河での AGN feedback

● 第 34 回理論懇シンポジウム 2021 年 12 月 21~24 日 (オンライン)

藤田裕, 川勝望, 永井洋: 冷たいガスを軸とした楕円銀河内のガスの循環と AGN feedback

● 日本天文学会 2022 年春季年会 2022 年 3 月 2~5 日 (オンライン)

藤田裕, 川勝望, 永井洋: 冷たいガスを軸とした楕円銀河内のガスの循環と AGN feedback

国際会議

● Linking the Science of Large Interferometer in the 2030 2021 年 11 月 30 日-12 月 1 日 (オンライン)

Yutaka Fujita: Nonthermal emissions from clusters of galaxies (Invited Talk)

● GALAXY EVOLUTION WORKSHOP 2022 年 2 月 7-10 日 (オンライン)

Yutaka Fujita, Nozomu, Kawakatu, and Hiroshi, Nagai: Massive molecular gas as a fuel tank for Active Galactic Nuclei feedback in Central cluster galaxies

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 超微弱摂動系におけるトンネル効果

不確定性関係が支配する量子力学では、プランクセルスケールより小さい古典構造がその波動関数に反映されることはない。これは量子古典対応を考える上での基本原理として広く受け入れられてきたものである。一方、プランク定数に関する発散級数を前提にするこの原理では指数的に微少な効果を捉まえることはできないため、量子トンネル効果はその適用外にある。古典位相空間の構造のいかなる性質がどこまで指数関数的効果に反映されるか？ 非可積分トンネル効果の基本問題は、それが提起されて30年経ったいまも多くの点で共通の理解が得られていない。ここでは、古典位相空間上に、非線形共鳴、カオス軌道など、系の非可積分性を反映した構造がプランクセルに比べて無視できほど小さい、“超微弱摂動系”を考え、超高精度数値計算を実行することにより、そのトンネル機構を探った。具体的に得られた結果は以下である。1) 実位相空間上に、非可積分性由来の構造が現れない超微弱摂動系であっても、系の固有関数のトンネルテールの深いところに階段状の構造が現れる。2) 階段状構造の出現は、規則領域の回転数とその半径の関数として極値をもつ、もしくはその微分が極値をもつときにより顕著に起こる。3) 階段構造は、注目している固有状態と外力の周期から決まる高励起状態との量子共鳴によって起こる。4) 波束の時間発展を観察すると、階段構造の出現が周期的に起こる。また、その周期は外力の周期によって決まる。以上より、超微弱摂動系の固有関数に観察される階段構造の起源は、量子論的共鳴によって引き起こされるものであり、近可積分系におけるトンネルテールの階段構造の起源とされてきた、古典非線形共鳴機構 (Resonance-assisted tunneling) に因るものではないこともわかる。この結果は、長らく論争の続いた近可積分系における確率増大の機構解明に大きな手がかりを与える可能性がある。

2) 結合エノン写像における2つの反可積分極限と一様双曲性

自由度が3以上のハミルトン系は一般に多自由度ハミルトン系と呼ばれ、研究の発端となった天体力学の問題のみならず、分野を問わず自然現象に広く現れる。多自由度ハミルトン系は、アーノルド拡散といった2自由度ハミルトン系には現れない、特異な現象が現れることなどはよく知られるが、系の位相空間を可視化することが困難であることなどから数値計算を用いた結果も少なく、2自由度以下のハミルトン系の研究と比較して、明らかになっていることは少ない。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がもつ2つの反可積分極限 (理想カオス) 近傍での位相馬蹄条件および一様双曲性条件を調べた。位相馬蹄条件とは、系のダイナミクスに伴う、引き延ばしと折れた畳み機構を数学的に定式化したものであり、一様双曲性とは各軌道の不安定性を特徴付ける性質である。適当は変数変換を導入することにより、Devaney-Niteckiらが用いた2次元エノン写像に対して用いた手法を手がかりに、結合エノン写像の非遊走集合の存在領域を特定した。このことにより、Kogawaが求めた結合エノン写像の一様双曲性に対する十分条件を満たすパラメータ領域が実際に存在することを示すことに成功し、結合エノン写像は二つの反可積分極限近傍にいずれも位相的馬蹄、かつ一様双曲的なパラメータ領域が存在することが厳密に明らかになった。また、結合エノン写像の結合項を一般化した写像に対しても同様の議論が適用できることを示した。2つの位相的に異なる反可積分極限が存在することは、多次元写像にしか起こり得ないことであることから、本研究の結果は多次元写像の理解に対する一つの手がかりを与えることが期待される。

3) 雑音が印加された強いカオス系における escape rate と周期軌道

力学系の長時間振る舞いを特徴付ける方法には様々なものが知られるが、系が定義されている有限空間にホールを開け、そこから抜け出る軌道 (or 写像点) の脱出率 (escape rate) を測ることもその一つの方法である。系が強いカオスを示すとき、軌道は長時間において予測不可能な振る舞いを示し、ランダムな振る舞いをする。このことから、素朴には、その escape rate は、ホール設置位置に依存せず一定の値を取ることが予想される。ところが、Bunimovich らは、空間内に設置されたホールが系の周期軌道を含むとき、得られる escape rate がその周期軌道の不安定性に依存した無視できない補正を受けることを指摘した。このことは、力学系の長時間挙動を特徴づける escape rate が系の局所的性質、すなわち系の短時間挙動から大きな影響を受けることを意味し、たいへん興味深い。実際の物理系は多くの場合、さまざま雑音に晒されることから、以上のような escape rate の新たな側面が雑音印加によっていかなる影響を受けるか? という問題を解明することは、現実の物理現象における escape rate を考える上では避けて通ることができない。ここでは、cat map および perturbed cat map と呼ばれる強いカオス系 (アノソフ写像) に雑音を印加した際の escape rate の応答を調べた。それに先立ちまず、雑音印加のない系の escape rate を与える公式の再導出を行い、それを元に、一様乱数から成る雑音を印加した場合の escape rate の応答を数値的に調べた。その結果、雑音印加に反応しない非反応領域が存在し、その大きさ、および、非反応領域を超えた escape rate の立ち上がり、再び、ホール内にある周期軌道の不安定性の大きさが反映されることが見いだされた。さらに、これらの定性的な振る舞いを再現する観点なモデルを提案し、数値計算で観察された escape rate に関する上記振る舞いの起源を説明することに成功した。

4) 非可積分系のトンネル効果の半古典論と複素安定多様体

非可積分系トンネル効果の複素半古典解析の困難は、無数に潜在する鞍点解から寄与の大きい複素軌道を抽出することにある。これまでの研究から、非可積分系 (とくに離散写像モデル) においては、複素空間の前方 Julia 集合が半古典プロパゲータに寄与する軌道を含み、さらに、周期点から伸びる複素安定多様体が前方 Julia 集合をよく近似することが明らかになっている。これらの事実を基に、近年、我々が提案した散乱写像に対して、その複素安定多様体を求め、半古典プロパゲータに寄与する軌道抽出とその特徴づけを試みた。今年度明らかになったのは、トンネル効果に重要な寄与を与える複素古典軌道は、実カオス領域に単調に漸近するわけではなく、一旦、複素面深くに入り、そののち規則領域近傍の実準安定カオス領域に接近する事実である。このことは、複素領域内のカオスがトンネル効果に本質的な役割を果たす、言い換えれば、実不変集合だけからトンネル効果に何が起こるかを類推することはできず、複素カオスの性質を見なければその本質を捉えることができないことを示唆するもので極めて興味深い。可積分系のトンネル効果との本質的な差をこの観点から掘り下げることが今後の課題である。

5) 多自由度系での新奇なホロノミー

断熱定理は、ゆっくりとした外部パラメータの変化の下での保存量、すなわち断熱不変量の存在を含意する。たとえば、量子系の断熱不変量は定常状態の占有確率である。一方、断熱定理は、断熱不変量をはじめとした諸量のパラメータ空間中での局所的な変化を特徴付ける。この局所の変化を積分することで、大域的な断熱応答が得られるが、とりわけ幾何学的位相 (ベリー位相) が観測可能であり、さらには量子ホール効果の久保公式のようなトポロジカルな量子効果を与えることが良く知られている。一方、我々は新奇な量子ホロノミーの研究を通じて、量子系での断熱不変量もまた非自明な断熱応答を与えることを示し、その具体例と理論的背景を探索してきた。近年では、Lieb-Liniger 模型と呼ばれる一次元ボーズ粒子系での新奇な量子ホロノミーが「量子エネルギーポンプ」として実験的にも実現された。

以上の背景を受け、新奇な量子ホロノミーの量子古典対応を探るため古典的な連成振動（微小振動）をこしばらく調べてきた。この例は、古典作用の“ホロノミー”を伴う興味深いものであるが、本年度はその背景と帰結を探った。その結果として、作用のホロノミーの背後に断熱サイクルによる自由度交換が起きることを見いだした。これは一自由度系では起き得ない多自由度特有の現象であり、同時に、量子系にもすぐさま応用可能である。また、より一般の非線形な古典可積分系に同様の例が存在し得ることを示唆する。

また、古典的な連成振動における基準振動のホロノミーを二次元格子系で探り、断熱サイクルを調節することで基底モードと繋がる高励起モードを選ぶことができる例を見いだした（小森田健二さんの卒業研究）。

2. 研究業績

1) 論文

Domenico Lippolis, Akira Shudo, Kensuke Yoshida, and Hajime Yoshino: Scarring in Classical Chaotic Dynamics, *Phys. Rev. E* **103** (2021) L050202 (6 pages).

Kensuke Yoshida, Hajime Yoshino, Akira Shudo and Domenico Lippolis: Eigenfunctions of the Perron-Frobenius operator and the finite-time Lyapunov exponents in uniformly hyperbolic area-preserving maps, *J. Phys. A: Math. Theor.* **45** (2021) 285701 (30 pages).

Yutaka Okabe and Akira Shudo: Microscopic numerical simulations of epidemic models on networks, *Mathematics*, **9** (2021) 932 (19 pages).

Yutaka Okabe and Akira Shudo: Spread of variants of epidemic disease based on the microscopic numerical simulations on networks: Supplementary Information, *Scientific Reports*, **12** (2022) 523 (9 pages).

2) 学会講演

● 日本物理学会 秋季大会 2021年9月20日-23日（オンライン開催）

幸田遼之介, 首藤啓：非可積分系のトンネル効果の複素半古典論

飯島陸, 花田康高, 首藤啓：近可積分トンネル効果の超高精度計算と可積分近似

大鹿真, 首藤啓：一様双曲系の周期軌道と escape rate

藤岡佳佑, 古川涼太, 首藤啓, Li Jizhou：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

Jizhou Li：Periodic and homoclinic orbit theory in quantum chaos

国際会議

● RIMS workshop “Exact WKB Analysis, Microlocal Analysis, Painlevé Equations and Related Topics”, October 11-15, 2021 (RIMS, Kyoto University) (online)

Akira Shudo: Anomalous tunneling splittings in nonintegrable quantum maps (invited)

3) 著書・学会誌等

首藤啓：カオスと数値計算 『数理科学』 (2021) 5月号 31-38.

岡部豊, 首藤啓：SIR 方程式の厳密解 『数理科学』 (2021) 10月号 74-81.

岡部豊, 首藤啓：複雑ネットワーク上の感染症伝播のシミュレーション 『数理科学』 (2021) 10月号 82-83.

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 深層生成モデルを用いたスピン状態の超解像

Li and Wang が提案した深層生成モデルによるスピン状態生成手法では、対象となる系のハミルニアンが既知であれば、最適化においてそのデータを必要としない。本研究ではこれを拡張し、比較的入手が容易な格子サイズの小さいスピン状態を入力として、より大きな格子サイズのスピン状態を生成できる超解像手法を開発した。これにより、先行研究よりも大きな格子サイズのスピン状態を率的に生成することができるようになった。[森]

2) イジングスピン系および量子力学的粒子系の機械学習解析における入力データの新しい準備法

機械学習の物理系の解析に用いるアプローチについて引き続き検討し、スピン系の相転移現象を機械学習の画像認識を用いて解析する際、画像を用意する方法に工夫をすることで汎化性能を上げられることを発見し、論文に発表した。また、量子力学的粒子系への応用を目指し、世界線を用いたモンテカルロシミュレーションのスナップショットを画像として扱い、相特定に機械学習を用いる方法について検討を進めた。[森]

3) Bose 原子気体超流動の温度推定器の高精度化

一般的に BEC を起こすにはレーザー冷却、磁気光学トラップ、蒸発冷却を用いるが、この方法では、冷却原子は高密度の原子集団を形成する。そのため、光吸収が強すぎ、冷却原子気体の状態を直接観測することは非常に困難である。直接冷却原子気体を観測するかわりに、観測飛行時間 (TOF) 測定法のような間接的な手法が用いられる。有限温度において非凝縮原子が存在する場合、凝縮体と非凝縮体の二成分の相互作用を考える必要がある。そこで、このような冷却ボーズ原子気体における有限温度系での超流動現象を記述するために挙げられるのが、次の Zaremba–Nikuni–Griffin (ZNG) 理論である ZNG 理論を利用してトラップ切断後のシミュレーションデータを元に、それを学習データとした Bose 原子気体超流動の温度推定を行う機械学習モデル (学習器) の作成したのが当研究室の伊藤らであるが、本研究ではその改良とその詳細な分析を行った。これにより、伊藤らでは推定できなかった温度領域の TOF での温度推定の高精度化ができた。[荒畑]

4) 非臨界相での相関関数に対する離散的対称性をもつ普遍的漸近式の構成と統合

様々な二次元格子上に定義された古典模型が非臨界相で示す相関関数の漸近形について調べている。正方格子の C_{4v} 対称性を持つ漸近形には一般的に3パラメタ以上が必要であることを指摘したが同議論を三角格子の C_{6v} 対称性をもつ場合へ拡張した。2つの対称性は共に C_{2v} を正規部分群とするが C_{6v} は C_{4v} に比べ商群の元を1つ多く持つ為、より強い条件が課され、その結果として2パラメタ (振幅と Jacobi の楕円関数の母数に対応) のミニマルな漸近形を得ることができた。更にこれら2つの格子上の相関関数はそれぞれの格子の離散的対称性を反映した代数曲線により特徴付けられるが、それらが双有理同値である為の条件を見出し、その物理的意味を議論した。また得られた普遍的漸近式の妥当性の検証を様々な三角格子上の古典模型に対する大規模数値計算を用いて行っているが、その結果、同式が相関関数の数値データを系の可解性の有無に依らず高精度でフィットしていることが明らかになった。関連する論文を執筆中である。[大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

A. Sakamoto, K. Shiina, and H. Mori: “Image Preparation for Machine-Learning Analysis of Multiple-Size Spin Systems” , J. Phys. Soc. Jpn. 90 (2021), 065001.

K. Shiina, H. Mori, Y. Tomita, H. K. Lee, and Y. Okabe: “Inverse renormalization group based on image super-resolution using deep convolutional networks” , Sci. Rep. 11, (2021) 9617.

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。2021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5名、卒研究生3名であった。以下は、2021年度に行った主な研究の概要である。

1) $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ におけるトリプル Q 四極子-八極子秩序

多極子は電子のスピンと軌道が絡み合った自由度であり、多極子が活性な系は、多極子秩序、超伝導、非フェルミ液体などの興味深い物性の舞台となり注目を集めている。特に、電気多極子の自由度が活性な場合には磁氣的な自由度では禁止される奇数次の結合が可能になり、それに応じた新しい現象が発現する可能性がある。立方晶系の $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ は、結晶場基底状態が非クラマース二重項であり、電気四極子と磁気八極子の自由度を持つ。零磁場における2段転移や、多彩な温度磁場相図、超伝導、非フェルミ液体的な性質を示し、その理論的解明が待たれている。本研究では四極子の異方性と種々の相互作用の拮抗により現れる新奇な秩序状態を解析した。ダイヤモンド構造上の3状態モデルを構築し、平均場近似を用いて解析を行った。その結果、トリプル Q 四極子秩序とトリプル Q 四極子八極子秩序を示す2段転移が存在することを明らかにした。また、温度磁場相図が実験結果を定性的に説明することを見出した。これらの結果は $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の実験結果との比較にとどまらず、多極子のトリプル Q 秩序の発現という観点からも今後の研究の発展を期待させるものである。

2) UNi_4B の秩序変数の提案

UNi_4B は U サイトが三角格子を形成し、 $T_N \simeq 20 \text{ K}$ にて無秩序サイトを含むトリプル Q 秩序を示すと長年考えられてきた。このトリプル Q 秩序はトロイダルモーメント（磁気モーメントの渦）の秩序とみなすことが可能であり、近年、磁性金属における最初の電流磁気効果が観測された物質として注目を集めている。しかしながら、電流磁気効果の電流の方向依存性がトロイダル秩序で期待されるものと一致しないため、その秩序変数について再考する機運が高まっている。本研究では、最近報告された超音波実験の結果が示唆する四極子自由度の発現を理論モデルに取り入れ、 UNi_4B の磁気秩序と電流磁気効果を統一的に説明することを目指した。実験から決まるモデルのパラメータを考慮すると、四極子と八極子の非線形結合が非常に重要な働きをすることが見出された。種々の実験結果を満足する磁気秩序として、トロイダル秩序と全く同一の磁気構造因子をもつ「トライフォース」秩序が広いパラメータ領域で実現することが明らかになった。このトライフォース秩序が実現している場合には、トロイダル秩序と同様に中性子散乱実験の結果および超音波実験等の熱力学量を正しく記述し、かつ電流磁気効果も統一的に説明することができる。

3) ホルミウムイオンに創出する3チャンネル近藤効果

希土類イオンの $4f$ 電子状態は、 LS 結合描像で記述することが多いが、積極的に $j-j$ 結合描像を利用することにより、見通しよくモデルを構築することができる。すなわち、スピン軌道相互作用と結晶場ポテンシャルを対角化して、全角運動量 j とその z 成分で指定される1電子状態の線形結合により、立方晶系 O_h 群の既約表現を1電子の軌道として定義し、その後、クーロン相互作用を考慮すればよい。さ

て、 j - j 結合描像に基づいて重希土類イオンを考えると、 $j = 5/2$ (6 状態) が充満して $j = 7/2$ (8 状態) に電子を詰めていくことになるので、 $\text{Ho}^{3+}(f^{10})$ の場合に、 $j = 7/2$ がちょうど半充満となることがわかる。そこで、 Ho^{3+} の $4f$ 電子と混成する 3 本の伝導電子を含む 3 バンド不純物アンダーソン模型を数値繰り込み群法によって解析したところ、 Γ_5 三重項基底状態に対して、 φ を黄金数比 $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$ とし、 $\log \varphi$ という奇妙な残留エントロピーで特徴づけられる 3 チャンネル近藤効果を見出した。チャンネル数が 3 以上のマルチチャンネル近藤効果が単なる理論的興味だけではなく、現実の物質で見つかる可能性を示唆する珍しい例である。

2. 研究業績

1) 論文

T. Hotta, “Three-Channel Kondo Effect Emerging from Ho Ions” *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 113701 (2021).

T. Ishitobi and K. Hattori, “Triple- q quadrupole-octupole order scenario for $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ” *Phys. Rev. B* **104**, L241110 (2021).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 20 日 (月) – 23 日 (木) (オンライン開催)

石飛尊之, 服部一匡: 多極子間結合に誘起される多重 q 秩序

● 日本物理学会 第 77 回年次大会 2022 年 3 月 15 日 (火) – 19 日 (土) (オンライン開催)

石飛尊之, 服部一匡: 四極子自由度による非共面磁気秩序の安定化機構と URhSn への応用の可能性

服部一匡, 石飛尊之, 常次宏一: 三角格子トリプル q 四極子秩序の古典モンテカルロ解析

● 電流駆動現象が拓く新しい物質科学 2021 年 11 月 26 日 (金) 北海道大学学術交流会館

石飛尊之, 服部一匡: UNi_4B の新奇秩序変数の提案

国際会議

● International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures 2021 年 12 月 22 日 (水) – 23 日 (木) online+onsite(Kobe International Conference Center)

K. Hattori, T. Ishitobi, and H. Tsunetsugu: Nematic triple- q orders in the triangular lattice: Monte Carlo study

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 年春に初のビーム衝突を観測し、現在は加速器の性能の向上を図りながら、データを蓄積している。

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取り組んだ。また、シリカエアロゲルタイルのアライメントも進め、ARICH 検出器を用いた粒子識別性能の向上を図っている。

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を進めた。また、SiPM の信号読み出し用集積回路 (ASIC) の試作を昨年度行い、本年度はその性能評価を進めた。

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 加速器はビーム強度の増強を行い、2027 年から高ルミノシティでの実験 (HL-LHC) を行い、それまでに得られたデータ量の約 10 倍のデータを取得する計画である。

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。大量の検出器モジュールの品質を保つためには、組立て過程において各種の検査を行い、その情報をデータベースに登録する必要がある。本年度は、ITk モジュールの電気信号系以外の各種検査情報をデータベースに入力するグラフィカル・インターフェース QChelper の開発に携わった。

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、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。本年度はキャリブレーションシステムの量産およびインストールに向けた準備を進めた。量産に向けた準備では、量産品の品質試験の手法の開発を行った。インストールに向けた準備では、キャリブレーションシステムと SuperFGD とのインターフェース部の開発を進めた。

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。また、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いる。本年度は引き続き岩手山の観測を進め、2 台の検出器ともに、障害による停止期間なく順調にデータ収集を行っている。また、岩手山の観測データをリアルタイムで表示するソフトウェアの開発を行った。

2. 研究業績

1) 論文

S. X. Li *et al.* (Belle Collab.), “First measurement of the $\Lambda_c^+ \rightarrow p\eta'$ decay” JHEP **03**, 090 (2022)

S. Jia *et al.* (Belle Collab.), “Search for a light Higgs boson in single-photon decays of $\Upsilon(1S)$ using $\Upsilon(2S) \rightarrow \pi^+\pi^-\Upsilon(1S)$ tagging method” Phys. Rev. Lett. **128**, no.8, 081804 (2022)

X. Y. Gao *et al.* (Belle Collab.), “Search for tetraquark states $X_{cc\bar{s}\bar{s}}$ in $D_s^+D_s^+(D_s^{*+}D_s^{*+})$ final states at Belle” Phys. Rev. D **105**, no.3, 032002 (2022)

B. Bhuyan *et al.* (Belle Collab.), “Search for the decay $B_s^0 \rightarrow \eta\eta$ ” Phys. Rev. D **105**, no.1, 012007 (2022)

T. Bloomfield *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the branching fraction and CP asymmetry for $B \rightarrow \bar{D}^0\pi$ decays” Phys. Rev. D **105**, no.7, 072007 (2022)

- Y. Li *et al.* (Belle Collab.), “Measurements of the branching fractions of $\Xi_c^0 \rightarrow \Lambda K_S^0$, $\Xi_c^0 \rightarrow \Sigma^0 K_S^0$, and $\Xi_c^0 \rightarrow \Sigma^+ K^-$ decays at Belle” Phys. Rev. D **105**, no.1, L011102 (2022)
- E. Waheed *et al.* (Belle Collab.), “Study of $\bar{B}^0 \rightarrow D^+ h^-$ ($h = K/\pi$) decays at Belle” Phys. Rev. D **105**, no.1, 012003 (2022)
- C. Hadjivasiliou *et al.* (Belle Collab.), “Search for B^0 meson decays into Λ and missing energy with a hadronic tagging method at Belle” Phys. Rev. D **105**, no.5, L051101 (2022)
- R. van Tonder *et al.* (Belle Collab.), “Measurements of q^2 Moments of Inclusive $B \rightarrow X_c \ell^+ \nu_\ell$ Decays with Hadronic Tagging” Phys. Rev. D **104**, no.11, 112011 (2021)
- H. Atmacan *et al.* (Belle Collab.), “Search for $B^0 \rightarrow \tau^\pm \ell^\mp$ ($\ell = e, \mu$) with a hadronic tagging method at Belle” Phys. Rev. D **104**, no.9, L091105 (2021)
- S. X. Li *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the branching fraction of $\Lambda_c^+ \rightarrow p \omega$ decay at Belle” Phys. Rev. D **104**, no.7, 072008 (2021)
- E. Kovalenko *et al.* (Belle Collab.), “Study of $e^+ e^- \rightarrow \Upsilon(1S, 2S) \eta$ and $e^+ e^- \rightarrow \Upsilon(1S) \eta'$ at $\sqrt{s} = 10.866$ GeV with the Belle detector” Phys. Rev. D **104**, no.11, 112006 (2021)
- L. Cao *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of Differential Branching Fractions of Inclusive $B \rightarrow X_u \ell^+ \nu_\ell$ Decays” Phys. Rev. Lett. **127**, no.26, 261801 (2021)
- J. Yelton *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the masses and widths of the $\Sigma_c(2455)^+$ and $\Sigma_c(2520)^+$ baryons,” Phys. Rev. D **104**, no.5, 052003 (2021)
- B. Wang *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of $\mathcal{B}(B_s \rightarrow D_s X)$ with B_s semileptonic tagging,” Phys. Rev. D **105**, no.1, 012004 (2022)
- N. K. Nisar *et al.* (Belle Collab.), “Search for the Decay $B_s^0 \rightarrow \eta' \eta$,” Phys. Rev. D **104**, no.3, L031101 (2021)
- L. K. Li *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of branching fractions and search for CP violation in $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$, $D^0 \rightarrow K^+ K^- \eta$, and $D^0 \rightarrow \phi \eta$ at Belle,” JHEP **09**, 075 (2021)
- Y. Li *et al.* (Belle Collab.), “Evidence for the decay $\Omega_c^0 \rightarrow \pi^+ \Omega(2012)^- \rightarrow \pi^+ (\bar{K} \Xi)^-$,” Phys. Rev. D **104**, no.5, 052005 (2021)
- R. Mizuk *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the energy dependence of the $e^+ e^- \rightarrow B\bar{B}$, $B\bar{B}^*$ and $B^* \bar{B}^*$ exclusive cross sections,” JHEP **06**, 137 (2021)
- L. Cao *et al.* (Belle Collab.), “Measurements of Partial Branching Fractions of Inclusive $B \rightarrow X_u \ell^+ \nu_\ell$ Decays with Hadronic Tagging,” Phys. Rev. D **104**, no.1, 012008 (2021)
- J. T. McNeil *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of the resonant and nonresonant branching ratios in $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^0 K^+ K^-$,” Phys. Rev. D **103**, no.11, 112002 (2021)
- F. Abudinén *et al.* (Belle-II Collab.), “Precise measurement of the D^0 and D^+ lifetimes at Belle II,” Phys. Rev. Lett. **127**, no.21, 211801 (2021)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single- π^+ production channel containing at least one proton,” *Phys. Rev. D* **103**, no.11, 112009 (2021)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13×10^{21} protons on target,” *Phys. Rev. D* **103**, no.11, 112008 (2021)

K. Abe *et al.* (Hyper-Kamiokande Collab.), “Supernova Model Discrimination with Hyper-Kamiokande,” *Astrophys. J.* **916**, no.1, 15 (2021)

2) 学会講演

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 14～17 日 (オンライン)

本橋完太, 角野秀一, 汲田哲郎, 住吉孝行, 米永匡伸, 鶴藤昌人, 渡辺啓太ほか

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

朴兌秀, 岩城彩希, 角野秀一, 汲田哲郎, 本橋完太, 住吉孝行, 鶴藤昌人, 渡辺啓太, 米永匡伸ほか

Belle II 実験における ARICH 検出器のアライメント I

岩城彩希, 角野秀一, 汲田哲郎, 本橋完太, 朴兌秀, 住吉孝行, 鶴藤昌人, 渡辺啓太, 米永匡伸ほか

Belle II 実験における ARICH 検出器のアライメント II

● 日本物理学会 第 77 回年次大会 2022 年 3 月 15～19 日 (オンライン)

古藤達朗, 在原拓司, 角野秀一ほか

T2K 実験新型前置検出器 SuperFGD における光検出器校正装置の量産に向けた品質検査手法の開発

大島英里香, 汲田哲郎ほか

高輝度 LHC における ATLAS 実験ピクセル検出器量産のための品質試験データ登録用 GUI アプリケーションの開発状況

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

昨年度から反応物理化学研究室（歸家令果教授，松本淳助教，10月には奥村拓馬助教が着任）と毎週合同ミーティングを開いて情報交換を行いつつ，連携大学院教授である理化学研究所の東俊行主任研究員および同じ研究室の久間晋研究員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。しかし，12月の火災の後，多価イオン衝突実験を行っている部屋が使用できなくなっており，実験のアクティビティがほぼ半減してしまった。早期の停電復旧を願いつつ，代替措置の検討も行っている。

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程の研究

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，主に分子負イオンおよびクラスター負イオンについて，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。

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，十分な精度で実感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_7^- や C_8^- の冷却速度を測定する実験を開始した。さらに，炭素とは異なり直鎖構造を取らないシリコンクラスターについても実験を開始した。

1-b) 二原子分子負イオンの再帰蛍光 光子を吸収した分子は電子脱励起によるけい光放出で急速に冷却されるか，内部転換によりその電子的エネルギーを振動エネルギーへと再分配する。また内部転換後に再び電子的エネルギーへと分配する過程も存在するため，多原子分子負イオンにおいて直接電子脱離よりも時間的に遅い遅延電子脱離過程がこれまで報告されている。一方で，二原子分子はその状態数の少なさから電子励起状態と振動励起状態の振電相互作用による内部転換が起こりづらいため，これまで遅延電子脱離過程は起きないと考えられており報告もされていなかった。しかし，最近本研究室の実験により， Si_2^- の $X^2\Sigma_g^+ \rightarrow B^2\Sigma_u^+$ から振電相互作用を経て中性 Si_2 へ遷移した遅延電子脱離過程が存在することが示唆された。この遅延電子脱離過程は Si_2^- において内部転換が起きている可能性を示しており，もし起きていたとすれば再帰蛍光の放出機構の解明へ繋がる。これは多原子分子ではその状態数の多さから，発光に至る内部転換や逆内部転換の電子・振動・回転状態を識別するのは困難であるが，一方で

二原子分子ではそれらの電子状態を識別することが容易なためである。そこで本研究では、再帰蛍光機構の解明を目指して、 Si_2^- の分光実験を開始した。

1-c) 二原子分子負イオンの遅い遅延電子脱離 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。

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。

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。価数を選別した Er イオンビームと Ar および N_2 との衝突における可視紫外領域における発光スペクトルを Czerny-Turner 型分光器によって測定した。低価数の Er は 4f 軌道が開殻であるため膨大な数の微細構造を持ち、同一の電子配置でもエネルギー準位は 30 eV 程度の範囲に分布している。そのため、観測される光学遷移の数は膨大だと予想していたが、3 価イオンからの輝線は数は 340–500 nm の範囲に 6 本しか観測されなかった。極端紫外分光の研究において計算されたエネルギー準位を用いて可視領域における遷移を同定した。

2-b) EUV 分光における標的からの発光断面積測定 多価イオン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、極端紫外分光器の検出効率を推定した。He 様のイオンと He 気体の衝突において He^+ の 1s–2p 遷移 (30.38 nm) が観測されたので、その発光断面積の絶対値を求めた。この過程は標的にある 1 つの電子が多価イオンに捕獲されると同時にもう 1 つの電子が励起されるため Simultaneous electron Capture and target ion eXcitation (SCX) と呼ばれることもある。入射イオンが C^{4+} と N^{5+} の場合については文献値があり、誤差の範囲で一致する結果が得られたが、 O^{6+} については本研究室以外での測定例は見当たらない。特に C^{4+} と N^{5+} に比べて O^{6+} での発光断面積は 1 桁大きく、その励起機構について近似的なポテンシャル交差モデルに基づいて考察を行った。また、価数の異なる多価 Ar イオンについて、ポテンシャル交差モデルによる SCX の可能性について検討した。停電の復旧を待って検討結果の実験的検証を行いたい。

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 CH_4 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。今年度はイオン源から引き出された H^+ ビームの角度広がり測定を行うとともに、簡単なレンズ系で細い平行ビームを得ることができる装置のためのシミュレーションと、実際の装置設計を行った。

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、生成したヘリウム液滴ビームを電子衝撃によってイオン化し、静電場によってサイズ分布を測定する装置を開発した。液滴の速度はノズル温度によって決定されるものであり、サイズに依存せずほぼ一定と見なせるが、その場合、運動エネルギーはサイズに比例するため、静電的な分析器によってサイズ分布が直接測定できると考えられる。実測した結果は、サイズ分布の理論予想と一致し、電子衝撃によるイオン化効率が液滴サイズに依らないことが確認できた。

4) 次世代アストロケミストリー

原始惑星系形成領域は、10 K 程度にある分子雲よりも温度が高く、10–200 K の中間的な温度にある。このような温度領域におけるイオン-分子反応の反応速度定数および複数の生成物が期待できる場合の反応分岐比は、惑星系形成における化学進化を理解するために必要なデータであるが、実験室で測定された例は限られている。このような反応素過程の理解に基づいて、ALMA 望遠鏡によって観測された惑星系形成領域における詳細な分子分布や、はやぶさ 2 によって採取された小惑星リュウグウのサンプル分析結果のような観測事実を、理論計算・シミュレーションも合わせて総合的に理解することを目指す学術変革領域研究 (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-分子反応速度測定を行うためには、これまで用いてきたヘリウム気体では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を用いることにした。予備実験として、液体窒素で冷却した H_2 ガスを満たした移動管に H^+ を入射したところ、三体結合反応によって生成した H_3^+ や H_5^+ が観測されたので、入射イオンである H^+ だけでなく、これらの反応生成物についても移動度を測定した。

2. 研究業績

1) 論文

S. Iida, S. Kuma, M. Kuriyama, T. Furukawa, M. Kusunoki, H. Tanuma, K. Hansen, H. Shiromaru, and T. Azuma: IR-photon quenching of delayed electron detachment from hot pentacene anions, *Phys. Rev. A* **104**, 043114 (2021).

Y. Naoi, M. Iwata, D. Yokota, G. Gaigalas, D. Kato, I. Murakami, H. A. Sakaue, Y. Sekiguchi, M. Tanaka, H. Tanuma, S. Wanajo, and N. Nakamura: Laser induced breakdown spectroscopy of Er II for transition probability measurements, *Appl. Sci.* **12**, 2219 (2022).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 20 日-23 日 (オンライン開催)

田沼肇：地上実験でみる太陽風多価イオンと惑星間物質との衝突 (シンポジウム招待講演)

西村勇輝, 今泉咲希, 田沼肇, 中村信行, 関口雄一郎, 和南城伸也, 坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 田中雅臣, Gediminas Gaigalas：中性子星合体による重元素合成の基礎研究としての多価イオン電荷交換分光 III

● 原子衝突学会第 46 回年会 2021 年 10 月 26 日-28 日 (オンライン開催)

飯田進平, 久間晋, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫： C_2^- の輻射冷却による遅延電子脱離の抑制

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行：イオン化された超流動ヘリウム液滴のサイズ分布測定

● 核融合科学研究所 2021 年合同素過程研究会 2021 年 12 月 22 日-24 日 (オンライン開催)

田沼肇：多価イオン電荷交換分光の基礎と応用 (チュートリアル講演)

西村勇輝, 今泉咲希, 田沼肇：低価数の Er イオンの電荷交換分光

田沼肇, 大橋隼人, 沼舘直樹：重元素多価イオンの電荷交換分光における UTA

● 日本物理学会第 77 回年次大会 2022 年 3 月 15 日-19 日 (オンライン開催)

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行：超流動ヘリウム液滴ビームの静電場軌道制御

横井 彪希, 西村 勇輝, 田沼 肇：多価イオンの電荷交換衝突における EUV 発光断面積

● 日本化学会第 102 春季年会 2022 年 3 月 23 日-26 日 (オンライン開催)

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行：超流動ヘリウム液滴による極低温分子イオンの生成と赤外振動分光

3) 著書・学会誌等

田沼肇：シリーズ「多価イオンの物理とその応用：これまでの進展と今後の展開」第 6 回 多価イオン衝突, 原子衝突学会誌 しょうとつ, **18**, 79-99 (2021).

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

「ひとみ」衛星の精密 X 線分光サイエンスを引き継ぐための XRISM 衛星が進められ、本研究室はマイクロカロリメータを用いた観測装置 Resolve の中心的役割を果たすグループとして参加している。地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X についても、本研究室が中心となり推進しており、MEMS 技術による望遠鏡を搭載予定である。さらに将来の宇宙 X 線観測に向けた装置の高精度・高感度化に向けて、Si 高温塑性鏡やロブスターアイ光学系、X 線偏光計等の新規デバイスの開発も進めた。

1) 「すざく」、XMM-Newton, NuStar による X 線観測研究

すでに打ち上げられた X 線天文衛星のデータを用いた研究を進めている。点源感度が高い米 Chandra 衛星を用いて、SS433 のジェットに付随したホットスポットを発見し、多波長スペクトル解析から高エネルギー電子のスペクトル分布に制限を付けた。また低バックグラウンドで拡散放射に感度が高い「すざく」を用いて、我々自身が発見した木星磁気圏からの広がった X 線放射の研究を進め、欧州 XMM-Newton のデータ解析を進め、さらに 10 keV 以上の硬 X 線に感度の高い米 NuStar 衛星のデータ解析にも着手した。

「すざく」を用いた地球磁気圏における太陽風電荷交換 X 線の理論モデルとの比較研究も進めた。特に明るい 5 つの発光イベントについて、地球外圏の最新の密度モデルおよびその不定性を考慮して、理論モデルが特にカスプ方向に対して最大 1 桁程度、低く見積もる傾向を見いだした。さらに磁気圏形状と視線方向を考慮したモデルを構築し、時間変動を再現することに成功した。

そのほか、「すざく」による彗星のデータ解析を進めて、彗星コマの化学組成の空間分布の違いに起因した電荷交換 X 線の輝線比の違いについて検証を行った。また「すざく」による白色矮星からの X 線放射の研究を進め、SS Cyg と U Gem の観測データを理論モデルと比較することで、静穏時とアウトバースト時の高温プラズマの空間分布の違いについて制限を付けた。

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 年頃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 は、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。2021 年度はフライトモデルの製作と評価を進めて、要求性能を満たすことを確認した後、衛星へと組み込んだ。並行して打ち上げに向けてデータ解析を含めた準備を行った。初期観測データとして都立大が提案した木星および彗星が受理されており、これらのデータを用いて精密分光による高エネルギー宇宙物理を開拓する。関連して、XRISM で期待される成果について、招待レビュー論文も発表した。

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。本計画は都立大が中心となって推進しており、2021 年度は科研費の特別推進研究等に採択され、実現に向けて大きく前進した。そして衛星の詳細設計、推進系の実証モデルの製作と評価、観測装置の実証モデルの製作と評価等の開発をリードした。また並行して磁気流体シミュレーションを用いたモデル化や既存の天文衛星データの解析も進め、シンポジウムも主催した。

4) 新しい放射線計測装置の開発

次世代の宇宙 X 線観測を目指して観測装置の高精度化・高感度化に取り組んだ。MEMS (マイクロマシン) 技術を用いた世界最軽量の微細穴光学系を開発した。Si 基板に微細穴をあけ、側壁を反射鏡として用いる独自の手法であり、今年度は化学機械研磨と長時間アニールを複合することで鏡の平坦性を向

上し、従来の X 線望遠鏡にも引けを取らない角度分解能を達成した。また側壁への金属膜の成膜手法も試し、従来の Ir, Pt に加えて Co も成膜可能となった。関連して学生優秀講演賞を受賞した。

そのほかにも Si 基板の高温塑性変形を用いた全反射鏡を開発し、変形治具のかみ合わせ向上による形状精度の改善に取り組んだ。また MEMS 技術を応用して、ロボスターの眼を模したロボスターアイ光学系もインハウスで試作し、従来の Angel 配置から Schmidt 配置へと設計を変更することで、鏡の配置精度および形状精度の改善を行った。

さらにエネルギー、時間、画像に続く第四の観測パラメータとして期待される X 線偏光を可能にするブラッグ反射型偏光計を実証し、衛星設計まで行った。また将来のダークバリオン探査を目的とした Super DIOS 衛星を目指した TES カロリメータの読み出しを産総研、立教大等と進め、地上実験にも応用して従来手法では困難な X 線輝線の検出を行った。



図 1: JAXA の筑波宇宙センターで衛星搭載前の単色 X 線によるキャリブレーション (Ti, Cu, Fe, Au-La, Cr, Au-Lb) を NASA メンバの遠隔試験のもと、実施中の写真。

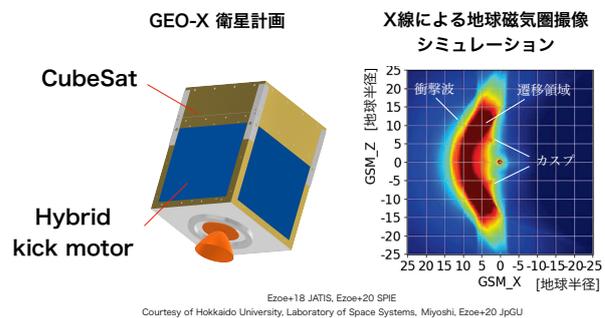


図 2: GEO-X 衛星の外観と地球磁気圏 X 線の想像図。

2. 研究業績

1) 論文

M. Numazawa, et al., “Suzaku observations of Jovian diffuse X-ray emission”, Publ. Astron. Soc. Japan, 2021, 73, 894-911

Y.Ezoe, et al., “High Resolution X-ray Spectroscopy of Astrophysical Plasmas with X-ray Microcalorimeters”, Rev. Modern Plasma Phys., 2021, 5, 4 (招待レビュー論文)

M.Takeo, et al., “Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of SS Cygni in quiescence and outburst”, PASJ, 2021, 73, 1418

M. Takeo, et al., “Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of U Geminorum in quiescence and outburst”, PASJ, 2021, 73, 143

2) 学会講演

● Japan Geophys. Union Japan Geophys. Union 2021 年 5 月 30 日–6 月 6 日 (オンライン)

江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: Status of GEO-X (GEOspace X-ray imager) mission

● 日本天文学会秋季年会 2021 年 9 月 13–15 日 (オンライン)

江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X(GEOspaceX-rayimager) の現状 III

内野友樹, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: 次世代 X 線偏光観測衛星を目指した高温塑性変形 Si 湾曲ブラッグ反射光学系のミッション検討

石崎欣尚, 江副祐一郎, 石川久美, 他: X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 VII

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 14-17 日 (オンライン)

石崎欣尚, 江副祐一郎, 石川久美, 他: X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 VII

● 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会 2021 年 9 月 10-13 日 (オンライン)

福島碧都, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: 原子層堆積法を用いた Co 成膜 Si 光学系の X 線反射評価

作田紗恵, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: MEMS 技術を用いた Schmdit 配置 Lobster eye 光学系の開発

● 第 65 回宇宙科学技術連合講演会 2021 年 11 月 9-12 日 (オンライン)

江副祐一郎, 石川久美, 他: GEO-X 計画とその将来ビジョン - 太陽系 X 線天文学 (招待講演)

● 第 150 回地球電磁気・地球惑星圏学会 2021 年 10 月 31 日-11 月 4 日 (オンライン)

江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状

伊師大貴, 江副祐一郎, 石川久美, 他: 「すざく」と XMM-Newton 衛星による地球周辺電荷交換 X 線の多点同時観測

● 第 22 回宇宙科学シンポジウム 2022 年 1 月 6-7 日 (オンライン)

江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X (GEOspace X-ray imager)

森下弘海, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: MEMS 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発

● 超小型衛星利用シンポジウム 2022 年 1 月 18 日 (X-NIHONBASHI TOWER + オンライン)

江副祐一郎, 石川久美, 他: 地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X

● 研究会「GEO-X 計画と太陽系 X 線天文学に向けて」 2022 年 2 月 16 日 (オンライン)

江副祐一郎: はじめに:GEO-X 計画と本研究会の狙い

石川久美, 江副祐一郎, 沼澤正樹, 他: GEO-X 用 X 線望遠鏡開発

伊師大貴, 江副祐一郎, 石川久美, 他: すざくの成果とモデル比較

Y.Ezoe: Opening

M.Numazawa: Jovian diffuse hard X-ray emission observed with Suzaku

● 日本天文学会春季年会 2022 年 3 月 2-5 日 (オンライン)

石川久美, 江副祐一郎, 沼澤正樹, 他: X 線反射率向上を目指した原子層堆積法による軽元素膜付け

石崎欣尚, 江副祐一郎, 石川久美, 他: X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 VIII

● 日本物理学会 第77回年次大会 2022年3月15-19日 (オンライン)

石崎欣尚, 江副祐一郎, 石川久美, 他: X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 VIII

● 第69回応用物理学会春季学術講演会 2022年3月22-26日 (青山学院大学相模原キャンパス + オンライン)

作田紗恵, 江副祐一郎, 石川久美, 沼澤正樹, 他: MEMS 技術を用いた Schmidt 配置 Lobster eye X線光学系の開発 II

国際会議

● MNC2021 2021年10月26-29日 (オンライン)

A. Fukushima, Y. Ezoe, K. Ishikawa, M. Numazawa, et al.: Smoothing of silicon micropore X-ray optics by thermal annealing

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”物質群の総称であり、3Sという特徴を持つ。3Sとは、Soft・Slow・Seeableの頭文字で、柔らかく・遅く・見やすい、のことである。一般にソフトマターは階層的な構造、すなわち、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こす。また、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、主に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、研究を行っている。

1) 温度勾配下における非平衡現象

界面活性剤・水混合系では、界面活性剤が二分子膜を形成し、その二分子膜がトポロジ的に異なるラメラ相やスポンジ相を形成する。今回は壁に平行に配列したラメラ相を形成し、その状態に温度勾配を印可した。ラメラ相のエネルギーは膜間距離 d と温度 T に関係している。温度勾配を与えることにより、ラメラ相のエネルギーは空間分布をもつことになり、エネルギー輸送が起こる。しかし、ラメラ相の膜間距離 d は幾何学的に決定される量であり、どのようにエネルギーを輸送するのかわからない状態であった。我々は、ラメラ相に存在する膜の折りたたみ欠陥（線欠陥）が重要な働きをしている事を発見した。線欠陥は膜の枚数を可変にする構造であるためだと考えられる。通常は、エネルギー的な不利な構造であるにも関わらず、非平衡下では重要な働きをするという現象は大変興味深い。

2) 粘性差を伴った2成分熱対流

水などの液体を下から熱すると対流が起こる事はよく知られている。熱拡散が粘性に打ち勝つ事でマクロな流れを生じているというメカニズムである。2成分系になると、あまり知られていないが1成分より複雑な挙動を見せる。温度勾配によって、ルドビック・ソレー効果が起こり、濃度輸送が行われる。濃度と密度がカップルしている場合、濃度輸送と密度差の競合が起こることが知られている。我々はこの他に粘性差が重要であることを発見した。ソレー効果が起きない条件にしても、2成分間に粘性差がある場合、過渡的停滞領域の形成が起こることを系統的な実験から見出した。これらは新しい2成分対流であり、非平衡統計力学においても重要な結果になると考えている。

3) 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。我々はさらに、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。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となった。

4) 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。

2. 研究業績

1) 論文

Marie Tani, Rei Kurita : Pinch-off from a foam droplet in a Hele-Shaw cell, *Soft Matter* **18**, 2137 (2022).

Yuto Tamura, Marie Tani, Rei Kurita : Origin of nonlinear force distributions in a composite system, *Sci. Rep.* **12**, 632 (2022).

Yoshimasa Izaki, Rei Kurita, Hajime Tanaka : Hidden linear defects in surfactant onions revealed by coalescence into lamellar layers, *Phys. Rev. Res.* **3**, 043094 (2021)

Atusi Tani and Marie Tani : Classical solvability to the initial boundary value problem for a forced foam drainage equation, *J. Math. Anal. Appl.* **504**, 125573 (2021).

小林 和也, 栗田 玲 : 粉体系および液体系における重力不安定性現象の共通性, *Japanese J. Multiphase Flow* (推薦論文) 35 巻, 1 号 p.118-124 (2021).

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 77 回年次大会 (2022 年) 3 月 15 日 - 19 日 (オンライン開催)

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 泡沫の塗り広げにおける流れの観察

谷 茉莉, 栗田 玲 : 擬 2 次元泡沫滴における液体ピンチオフ

井出 薫, 谷 茉莉, 栗田 玲 : lock-exchange 条件における表面不安定性についての実験研究

篠原 良子, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 2 成分系対流における濃度場の蛍光観察

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 温度伝播速度変化を伴う相分離のパターン形成

栗田 玲, 金澤 拓未, 谷 茉莉 : 界面活性剤系におけるスポンジ・ミセル相分離のダイナミクス

柳沢 直也, 栗田 玲 : 泡沫の dry-wet 転移近傍における逐次的再配置

藤尾 穂香, 谷 茉莉, 栗田 玲 : シリコンオイルコーティングされた砂の破壊挙動

横田 瑠, 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におけるサイズ比依存性

● 第20回 関東ソフトマター研究会（オンライン開催） 11月2日

八島 拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲：有機物結晶化時に発生する気泡と成長速度異常

谷 茉莉, 栗田 玲：引力相互作用を持つ粉粒体混合系のシミュレーション

田村 優斗, 谷 茉莉, 栗田 玲：粉体内部における構造と force chain の関係性

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲：領域増加を伴う相分離シミュレーション

高橋 知未, 谷 茉莉, 栗田 玲：PEG 環境下におけるタウタンパク質の相分離挙動

柳沢 直也, 栗田 玲：泡沫の dry-wet 転移近傍における気泡の再配置緩和ダイナミクス

藤尾 穂香, 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に対する応答の転移

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲：泡沫の塗り広げにおけるパターン変化

横田 瑠, 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におけるサイズ依存性

篠原 良子, 谷 茉莉, 栗田 玲：蛍光法による2成分系対流の不均一濃度場観察

金澤 拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲：界面活性剤系におけるミセル相形成ダイナミクス

井出 薫, 谷 茉莉, 栗田 玲：ヘルショウセル中の液膜流の不安定化

長谷川 莉子, 谷 茉莉, 栗田 玲：ヘルショウセル中における泡沫の毛管現象

● 日本物理学会 2021 年秋季大会（2021 年）9月20日 - 23日（オンライン開催）

八島 拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲：有機物の結晶化における結晶成長速度異常性と不純物効果

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲：蒸着を伴う相分離のパターン形成

柳沢 直也, 栗田 玲：泡沫の dry-wet 転移近傍における気泡の再配置緩和挙動

篠原 良子, 谷 茉莉, 栗田 玲：2成分系対流における不均一濃度場の観察

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲：擬二次元泡沫の塗り広げにおける速度依存性

谷 茉莉, 栗田 玲：引力相互作用を持つ粉粒体混合系のパーコレーション

藤尾 穂香, 横田 瑠, 谷 茉莉, 栗田 玲：シリコンオイルコーティングされた砂における圧縮応力の緩和

田村 優斗, 渡部 誠道, 谷 茉莉, 栗田 玲：光弾性ディスクを用いた粉体の内部構造と force chain の関係

● Young Soft Webinar 第3回セミナー 7月21日（オンライン開催）

柳沢 直也：泡沫の協同的崩壊と液膜の崩壊ダイナミクス

● 東京大学物性研究所短期研究会「ガラスおよび関連する複雑系の最先端研究」5月21日（オンライン開催）

柳沢 直也, 栗田 玲：泡沫の内部構造緩和における気泡のサイズ分散依存性

国際会議

● 11th Liquid Matter Conference 2020/2021 7/19-23 (Virtual Meeting)

Marie Tani and Rei Kurita Liquid pinch-off from a foam droplet confined in a Hele-Shaw cell [poster]

Naoya Yanagisawa, Marie Tani and Rei Kurita The mechanism of collective bubble collapse in a foam [poster]

Ryoko Shinohara, Kazuya U. Kobayashi, Marie Tani and Rei Kurita Observation of inhomogeneous concentration field in a convection of a binary mixture [poster]

Rikuya Ishikawa, Marie Tani and Rei Kurita Pattern formation during phase separation by directional quenching in 3dimensional system [poster]

3) 著書・学会誌等

栗田 玲：相転移ダイナミクスと関連分野の近況，第66回物性若手夏の学校

栗田 玲：泡沫の物理的性質の理解と安定性制御，Cosmetic Stage vol.16, No.2 75-80

栗田 玲：コーティングされた砂を含む複合粉粒体系の力学特性 ～子供用玩具の砂を混ぜると頑強になる？～，月刊コンクリート総合誌「コンクリートテクノ」vol.40, No.6（セメント新聞社）

栗田 玲：コーティングされた砂を含む複合粉粒体系の力学特性 ～子供用玩具の砂を混ぜると頑強になる？～，骨材情報誌「アグリゲイト」（セメント新聞社）

粒子ビーム物性サブグループ

1. 研究活動の概要

Frustrated magnetic systems have been actively studied in decades. Archetypal frustrated systems consist of spins or pseudospins residing on lattices built from triangular and tetrahedral units. For example, antiferromagnetically coupled Ising spins on a tetrahedron are prohibited from possessing a simple ground state configuration, being referred to as geometrical frustration. Geometrically frustrated classical and quantum magnets on two-dimensional (2D) triangle and kagome lattices, and three-dimensional (3D) pyrochlore-lattice systems have been investigated. Among frustrated classical magnets, the spin ice on a pyrochlore lattice is of crucial importance because of its macroscopically degenerate ground state and fractionalized magnetic monopole excitations. Possibilities of quantum spin liquid (QSL) states in frustrated magnets have been actively studied in a number of years. By introducing transverse interactions in a frustrated Ising system, a QSL ground state without conventional magnetic long-range order (LRO) can occur, which provides challenging theoretical problems. Investigations of real (or candidate) QSL magnets are fascinating experimental explorations.

A non-Kramers pyrochlore magnet $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ has attracted much attention for decades as a QSL candidate. For this system any conventional magnetic LRO has never been reported. However, our careful studies using off-stoichiometry controlled samples $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ (TTO) showed that TTO samples in the range $x > x_c \simeq -0.0025$ have a ground state with a conventional LRO with a hidden order parameter. We proposed that this LRO is an electric quadrupole (or multipole) order [H. Takatsu et al. Phys. Rev. Lett. 116, 217201 (2016)], which was predicted for general non-Kramers pyrochlore f -electron magnets. Recently, an ultrasound experiment proved more firmly that a phase transition from the paramagnetic state to a quadrupole ordered (QO) state actually occurs. On the other hand, for TTO samples in the range $x < x_c$ we showed that they have a disordered ground state without any conventional LRO, being the putative QSL ground state of TTO debated in many years.

We have investigated the origin of the magnetic dipole correlations $\langle \sigma_{\mathbf{Q}}^z \sigma_{-\mathbf{Q}}^z \rangle$ characterized by the modulation wave vector $\mathbf{k} \sim (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ (Fig. 1) observed in the frustrated pyrochlore magnet $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$. This magnetic short-range order cannot be accounted for by adding further-neighbor exchange interactions to the nearest-neighbor pseudospin- $\frac{1}{2}$ Hamiltonian for quantum pyrochlore magnets. Using classical Monte Carlo simulation and quantum simulation based on thermally pure quantum (TPQ) states we have shown that the spin correlations with $\mathbf{k} \sim (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ are induced at low temperatures by a three-spin interaction of a form $\sigma_{\mathbf{r}}^{\pm} \sigma_{\mathbf{r}'}^z \sigma_{\mathbf{r}''}^z$, which is a correction to the Hamiltonian due to the low crystal-field excitation [H. Kadowaki et al. Phys. Rev. B 105, 014439 (2022)]. Simulations using TPQ states have shown that the spin correlations coexist with electric quadrupole correlations $\langle \sigma_{\mathbf{Q}}^{\alpha} \sigma_{-\mathbf{Q}}^{\beta} \rangle$ ($\alpha, \beta = x, y$) with $\mathbf{k} \sim \mathbf{0}$. These results suggest that the putative quantum spin liquid state of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ is located close to phase boundaries of the spin-ice, quadrupole-ordered, and magnetic-ordered states in the classical approximation, and that the three-spin interaction brings about a quantum disordered ground state with both spin and quadrupole correlations.

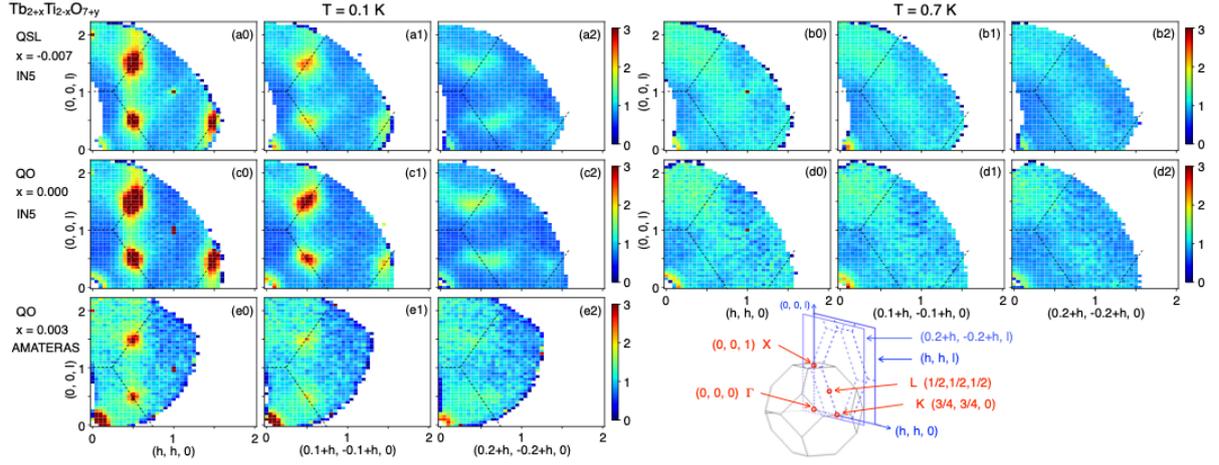


FIG. 1 (a,b) Intensity maps of 3D data $S(\mathbf{Q})$ of the QSL sample with $x = -0.007$, which were measured on IN5 at 0.1 K and 0.7 K, are shown in (a) and (b), respectively. (c,d) Intensity maps of 3D data $S(\mathbf{Q})$ of the QO sample with $x = 0.000$, which were measured on IN5 at 0.1 K and 0.7 K, are shown in (c) and (d), respectively. (e) Intensity maps of 3D data $S(\mathbf{Q})$ of the QO sample with $x = 0.003$, which were measured on AMATERAS at 0.1 K. The 3D data are viewed by 2D slices, which are parallel cross-sections of $\mathbf{Q} = (k + h, -k + h, l)$ with fixed $k = 0, 0.1$, and 0.2 , are shown in (w0), (w1), and (w2) ($w=a-e$), respectively. Dashed lines in the 2D slices (a)–(e) are boundaries of Brillouin zones. The bottom right corner shows the first Brillouin zone of the FCC lattice (thin black lines), and two 2D slice planes with $k = 0$ and 0.2 (blue lines).

2. 研究業績

1) 論文

H. Kadowaki, M. Wakita, B. Fåk, J. Ollivier, S. Ohira-Kawamura: Spin and quadrupole correlations by three-spin interaction in the frustrated pyrochlore magnet $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$, *Phys. Rev. B* **105**, 014439 (2022).

H. Takatsu, K. Goto, T.J. Sato, J.W. Lynn, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, R. Higashinaka, K. Matsuhira, Z. Hiroi, H. Kadowaki: Universal Dynamics of Magnetic Monopoles in Two-Dimensional Kagome Ice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 123705 (2021).

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9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6名）、学部生4名の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) 多層殻状クラスタを結晶構造に持つ電子伝導系の特異物性

γ -phase $\text{Pt}_{0.19}\text{Cd}_{0.81}$ は、2種類の多層殻状クラスタが CsCl 型に周期配列した立方晶結晶構造を持つ。それぞれの多層殻状クラスタは、4つの殻状クラスタ（正四面体、正八面体、または、立方八面体を形成）が入れ子になった構造をしている。昨年度に引き続き、単結晶を用いた物性測定を進め、この特徴的な結晶構造に起因する2つの特異性を明らかにした。

図1(a)に示すように、磁化率には、イオン内殻電子の反磁性では説明できない、伝導電子の軌道運動に起因するものと考えられる巨大な反磁性成分が存在することを見出した。同様な巨大反磁性成分は、Bi, グラファイト, 逆ペロブスカイト A_3BO 系などでも見出されており、フェルミエネルギー近傍に Dirac 点を持つ伝導バンドが関与した、トポロジカルなバンド間遷移効果に起因している可能性がある。

さらに、比熱の温度依存性に観測される Einstein モード的振る舞いから、約 30K の励起エネルギーを持つ超低エネルギー光学フォノンモードが存在することを見出した。フォノン励起の第一原理計算により、この成分が、多層殻状クラスタの特徴的な構造に起因する準局在振動モードであることを明らかにした（広島大学の長谷川巧氏との共同研究）。図1(b, c)に示すように、クラスタ B の最も内側に位置する正四面体を構成する4つの Cd イオンが、2-in 2-out 型の固有振動モードを持っている。多層殻状クラスタが特徴のある重なり方をしていることにより、4つの Cd イオンの周りに放射状の広い空間が形成され、それに沿って Cd イオンがゆっくりと振動するモードであることがわかる。

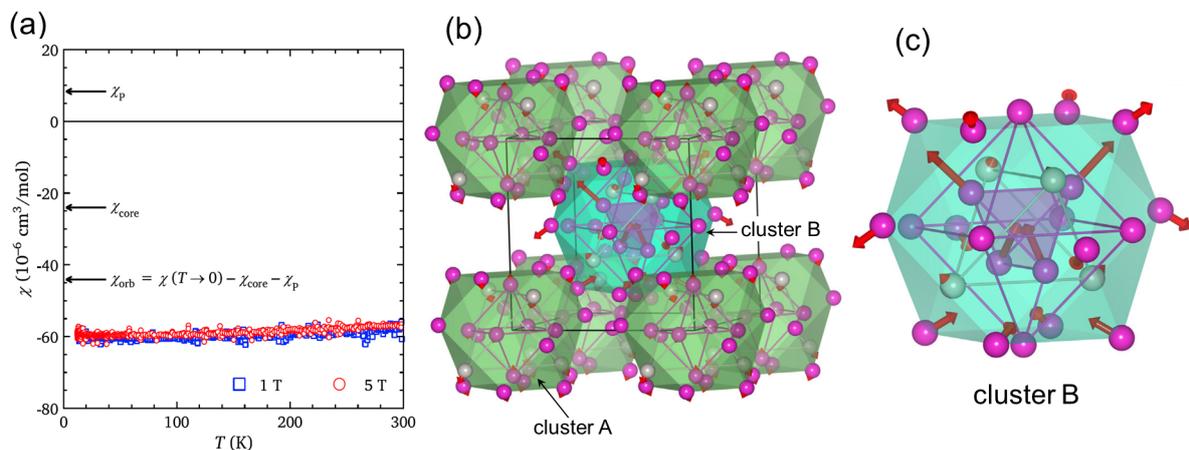


図 1: (a) γ -phase $\text{Pt}_{0.19}\text{Cd}_{0.81}$ 単結晶の磁化率の温度依存。伝導電子の軌道成分 χ_{orb} は、巨大な負の値を示す。(b) 第一原理計算により見出された低エネルギーフォノンモードの原子変位の様子 (Γ 点における 3 重項 T_2 モード)。(c) クラスタ B の最内殻正四面体を構成する 4 つの Cd イオンは、2-in 2-out 型の原子変位パターンを示す。

2) クラスタ構造を持つ Ir_3Ge_7 の熱特性

化学式 Tr_3X_7 (Tr : 遷移金属, X : 14 族及び 15 族元素) で表される物質は大きな物質群を形成している。結晶構造は図 2(a) に示すように、局所的には、2つの Tr 元素を 12 の X 元素で囲むカゴ状構造をとり、このカゴ状構造を基本単位として構成された 2 つの格子が入れ子状に配置した、特徴的な立方晶構造を

とる。また、 Tr と X 原子それぞれに注目すると、図 2(b) に示すようなクラスター構造をとることが知られている。これまで、いくつかの化合物について低温物性などが報告されているが、この特徴的な構造に注目した研究はなされてこなかった。我々の研究グループでは、 Ir_3Ge_7 の単結晶育成を行い、熱特性研究を行った。その結果、前述した γ -phase $Pt_{0.19}Cd_{0.81}$ と同様に、低エネルギーの光学フォノンモードの存在を示唆する比熱の振る舞いを観測することに成功した。単結晶構造解析の結果からは、原子変位パラメータに特別異常な値は観測されないことから、おそらくクラスター構造に由来するフォノンの分散構造の特徴をとらえたものと考えられる。今後、クラスター構造を持つ物質の熱物性、輸送特性研究を行う上で、本結晶系が良い研究対象であることを示す結果と言える。

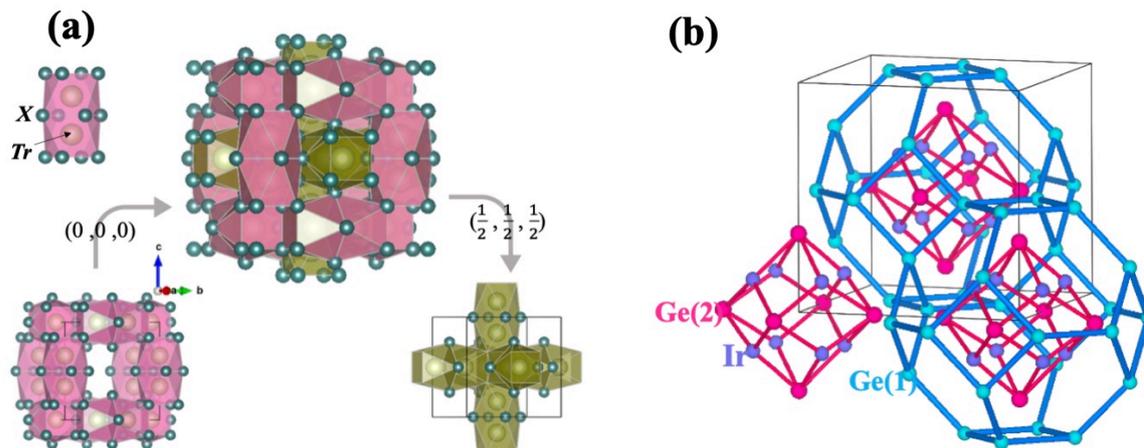


図 2: (a) Tr_3X_7 の結晶構造. (b) Ir_3Ge_7 の結晶構造において各元素をつなげて描いた図.

3) カイラル結晶構造をもつ α - $RhSn_4$ の異方的な電子輸送特性

カイラルな結晶構造を持つ物質中には、トポロジカルに特異な電子状態の形成が理論的に期待されている。強いスピン軌道結合を持つ非磁性の物質系では、縮退のないバンドが線形に交差する Weyl 点が、運動量空間の原点やブリルアン域の境界における時間反転不変運動量に現れ、この近傍の電子が Kramers-Weyl フェルミオンとして振る舞うことが指摘されている。このような電子系における電子輸送現象の特徴を明らかにするために、三方晶 α - $RhSn_4$ の単結晶を育成し、様々な電流・磁場方向で磁気抵抗効果を調べた。

電流と磁場の方向が互いに垂直となる横磁気抵抗配置において、磁場方向に依存して発現する磁場に線形な磁気抵抗と、異常な負の磁気抵抗を観測した。前者は、Abrikosov が理論的に指摘しているように、Weyl 点に起因する現象である可能性がある。後者は、単純な従来型のフェルミ面を持つ金属では説明がつかず、非従来型の伝導機構が働いている可能性がある。

電流と磁場の方向が互いに平行となる縦磁気抵抗配置では、カイラル (ABJ) 異常に起因する可能性がある負の磁気抵抗を観測した。これまでに類似の振る舞いが非カイラル結晶構造を持つ Weyl 半金属などにおいて観測されているが、カイラル結晶構造の物質では本系が初めてである。

4) カイラル結晶構造をもつ TrX_4 ($Tr:Rh, Ir, X:Ge, Sn$) の単結晶育成と de Haas-van Alphen 効果測定

前述した α - $RhSn_4$ と同型のカイラル構造を持つ物質は他にも、 $IrGe_4$, $IrSn_4$ そして $RhGe_4$ と、3つの化合物が存在することが知られている。カイラル構造に由来する特異な輸送特性を解明する上で、これらの化合物を系統的に研究し、電子状態を実験的に明らかにし、輸送異常との関係を明らかにすることを目的として実験を行った。この3つの化合物について、それぞれテトラアーク炉を用いたチョクラルス

キー引き上げ法, Sn-フラックス法, 高压合成法により高純度単結晶育成を行った. IrGe₄ および IrSn₄ については, 残留抵抗比が 100 を超える単一ドメインの高純度単結晶育成することに成功した. RhGe₄ については, 多結晶ながら不純物の混入の少ない試料合成に成功し, 過去に可能性が指摘されていた低温での超伝導状態の発現が本質であることを明らかにした.

α -RhSn₄, IrGe₄ および IrSn₄ については, 極低温強磁場中における磁気トルク測定を行うことで, 伝導電子の顔ともいふべきフェルミ面の状態を反映した量子振動観測に成功した. 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, 振幅を解析することで, フェルミ面の極値断面積や有効質量を直接調べることが可能な実験である. 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が可能である. 昨年度までは, 結晶軸に対してごく一部の角度依存性のみを明らかにしていたが, 今年度は α -RhSn₄ と IrGe₄ について, 結晶の対称軸間の全ての角度依存性をカバーする実験を行った. カイラル構造を持つ物質におけるフェルミ面研究の例は少なく, 特に本系のような三方晶系における金属間化合物において, dHvA 効果測定を全ての角度で実施した例はなく重要な結果といえる. 神戸大学との共同研究により, 第一原理計算との詳細な比較をすすめている段階である. 今後, 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テクスチャを明らかにすることができると考えられる.

5) カイラル化合物の純良単結晶育成と電子輸送特性

カイラルな結晶構造を持つ化合物中では, それを反映した電子の波動関数が形成され, 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, 電流や磁場の引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ており, α -IrSn₄ では, Sn フラックス法により, 結晶の純良性を表す残留抵抗比が 630 に達する純良で単一ドメインの単結晶を育成することに成功してきた. これにより, 奇数個の電子を持つ非補償金属であるにもかかわらず, 磁場 B に対し, $B^{1.4}$ に比例して増大する異常な磁気抵抗現象を見出した. α -IrSn₄ と同一の結晶構造を持つ IrGe₄ では, テトラアーク炉を用いたチョクラル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 3cm に達する単一ドメイン単結晶の合成に成功した. この単結晶用い, 極低温強磁場中における磁気トルク測定を行うことで, 伝導電子の顔ともいふべきフェルミ面の状態を反映した量子振動観測に成功した. 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. そこで, 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物質におけるフェルミ面研究の例は, まだ少なく, 今後, カイラル構造由来の電子物性を明らかにする上で重要な結果といえる. 現段階で, 第一原理計算との詳細な比較はできていないが, 今後, それら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テクスチャを明らかにすることができると考えられる.

IrGe₄ については, 菱面体の結晶構造をとり, 明確なカイラル軸を持つ. このカイラル軸に対し, 電流と磁場を平行にした場合と反平行にした場合では, 系の対称性が破れるが, これによる輸送現象への効果を調べる実験を開始した. その結果, 平行にした場合と反平行にした場合において, 輸送現象に違いが現れる可能性を示す結果が得られてきている. 今後, 試料依存性や異なるカイラルで, 現象の再現性や測定の精度を高める必要があるが, フェルミ面に多数のバンドが関与するような金属において, このような結果が得られた例はほとんどなく, 基礎研究の視点のみならず応用的視点からも重要な成果が

得られ始めていると考えている。

IrX_4 および RhX_4 ($X: \text{Ge}, \text{Sn}$) には、上記のカイラル構造をとる化合物だけでなく、同組成構造異性体となる物質が複数存在している。我々は、カイラル由来の物性の特徴を分離する上で重要と考えられる、カイラル構造でないこれらの構造異性体の電子構造解明にも着手を開始している。いくつかの物質では、通常の金属で見られるような磁気抵抗効果とはことなる振る舞いや、抵抗の温度依存性が観測されることを明らかにした。 $\beta\text{-RhSn}_4$ については、dHvA 効果測定にも成功した。

6) μSR 実験による SmAu_3Al_7 における部分無秩序相内での重い電子状態形成の検証

我々のグループでは、希土類内包カゴ構造を持つ Sm 立方晶化合物の探索を行い、磁場に鈍感な秩序状態や重い電子状態等の特異な電子状態が現れることを報告してきた。我々は、低対称な結晶構造にも範囲を広げ、Sm 化合物の物性探索を進め、最近、Sm イオンを囲む異方的なカゴ状構造を持つ菱面体結晶構造 (空間群: $R\bar{3}c$) の SmAu_3Al_7 が、部分無秩序相内において重い電子状態を示すことを見出した。本物質は、 $T_N = 2.8 \text{ K}$, $T^* = 0.9 \text{ K}$ 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を再度示す。この振舞は T_N 以下で部分無秩序状態が形成され、秩序相内で常磁性相の 33% の磁気モーメントが残留していることを示唆している。さらに、 T^* 以下で 1.5 J/mol K^2 もの大きな電子比熱係数を示す。これらの振舞は、 SmPt_2Si_2 と類似しており、部分無秩序相における重い電子状態形成が期待されるが、まだ実証されていない。今回、上記の特異な強相関電子状態を検証するために、J-PARC MLF S1 において、単結晶を用いてミュオンの初期偏極方向が $[0001]$ 方向となる条件で μSR 測定を行った。その結果、 T_N 以下で、磁気秩序を示すスペクトルの振動及び $t = 0$ での減少を見出し、 T_N での転移が磁気転移であることを初めて明らかにした。ミュオンが感じる局所静磁場は少なくとも 2 つ存在しており、その大きさは 10 mT , 0.1 T であることを見出した。これは、Sm サイト全てが磁気秩序したモデルでは説明できず、部分無秩序相の存在を支持する結果である。また、 T_N 以下で遅い磁気緩和が残留していることを見出した。その緩和率は T_N でピークを持ち、最低温に向けて単調減少を示した。一方、 T^* においては局所磁場、遅い磁気緩和の緩和率共に明確な異常も示さなかった。次年度は、J-PARC, JRR-3 において中性子実験を予定しており、秩序相内での磁気構造解析を目指す予定である。

2. 研究業績

1) 論文

Irfan Khan, Sakura Morishita, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Ernő Kuzmann, Zoltán Homonnay, Sinkó Katalin, Luka Pavić, Shiro Kubuki : "Synthesis, characterization and magnetic properties of $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles prepared by sol-gel method", *J. Magn. Magn. Mat.*, **538** 168264 (2021) [11 pages]. DOI:10.1016/j.jmmm.2021.168264

Ryoya Matsumoto, Naurang L. Saini, Alessio Giampietri, Viktor Kandyba, Alexey Barinov, Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Takashi Mizokawa : "Surface Electronic States and Inclining Surfaces in MoTe_2 Probed by Photoemission Spectromicroscopy", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90** 084704 (2021) [7 Pages]. DOI:10.7566/JPSJ.90.084704

Joe Kajitani, Ryoko Sagayama, Hajime Sagayama, Keisuke Matsuura, Takumi Hasegawa, Reiji Kumai, Youichi Murakami, Masaaki Mita, Takuya Asano, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki : "Transverse-type Lattice Modulation in $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$: Possible Charge Density Wave Formation", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90** 103601 (2021) [5 pages] DOI:10.7566/JPSJ.90.103601

G. M. Pugliese, L. Tortora, E. Paris, Takanori Wakita, K. Terashima, A. Puri, Masanori Nagao, R. Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Y. Aoki, T. Yokoya, Takashi Mizokawa, Naurang L. Saini : "The local structure of the BiS₂ layer in RE(O,F)BiS₂ determined by in-plane polarized x-ray absorption measurements", *Physchem*, **1** 250 (2021) [9 pages]. DOI: 10.3390/physchem1030019

Takashi Tayama, Tatsuma D. Matsuda, Ryuji Higashinaka, and Yuji Aoki : "Magnetization and thermal expansion measurements on the Ising magnet SmPt₂Si₂: Potential coexistence of spin glass and antiferromagnetic states", *Phys. Rev. B*, **104** 174418 (2021) [9 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.104.174418

Satoshi Tsutsui, Ryuji Higashinaka, Raito Nakamura, Kosuke Fujiwara, Jin Nakamura, Yoshio Kobayashi, Takashi U. Ito, Yoshitaka Yoda, Kazuo Kato, Kiyofumi Nitta, Naomi Kawamura, Masaichiro Mizumaki, Tatsuma D. Matsuda and Yuji Aoki : "Sm valence determination of Sm-based Intermetallics using ¹⁴⁹Sm Mössbauer and Sm LIII-edge X-ray absorption spectroscopies", *Hyperfine Interact*, **242** 32 (2021) [10 pages]. DOI: 10.1007/s10751-021-01759-x

Tsubasa Mitobe, Kazuhisa Hoshi, Md. Riad Kasem, Ryosuke Kiyama, Hidetomo Usui, Aichi Yamashita, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Takayoshi Katase, Yosuke Goto and Yoshikazu Mizuguchi : "Superconductivity in In-doped AgSnBiTe₃ with possible band inversion", *Sci. Rep.*, **11** 22885 (2021) [8 pages]. DOI: 10.1038/s41598-021-02341-9

Hiroshi Takatsu, Kazuki Goto, Taku J. Sato, Jeffrey W. Lynn, Kazuyuki Matsubayashi, Yoshiya Uwatoko, Ryuji Higashinaka, Kazuyuki Matsuhira, Zenji Hiroi, Hiroaki Kadowaki : "Universal Dynamics of Magnetic Monopoles in Two-Dimensional Kagome Ice" *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90** 123705 (2021) [4 pages] DOI: 10.7566/JPSJ.90.123705

Nazir Ahmad, Takumi Hasegawa, Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki : "Large diamagnetism and low-lying optical phonon modes in Pt-Cd γ -phase", *J. Alloys Compd.*, **901** 163520 (2022) [8 pages]. DOI:10.1016/j.jallcom.2021.163520

Hao Ou, Tomoyuki Yamada, Masaya Mitamura, Yusuke Edagawa, Tatsuma D. Matsuda, Kazuhiro Yanagi, Chang-Hsiao Chen, Lain-Jong Li, Taishi Takenobu, and Jiang Pu : "Electric-field-induced metal-insulator transition and quantum transport in large-area polycrystalline MoS₂ monolayers", *Phys. Rev. Materials*, accepted 2022 年 3 月.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 20 日 (月)~23 日 (木) (オンライン開催)

矢沼彩乃, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : カイラル結晶 α -RhSn₄ の異方的な電子輸送特性

中村直貴, 大村瑠美, 千葉優馬, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨 : カイラル化合物 IrGe₄ の低温物性測定と超伝導特性

嶋田隼輔, 中村直貴, 矢沼彩乃, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 擬二次元金属 β -IrSn₄ が示す異常な線形磁気抵抗

東中隆二, 岩見匠真, 齊藤光亮, 伊藤孝^A, 中村惇平^B, 髭本亘^A, 神戸振作^A, 幸田章宏^B, 松田達磨, 青木勇二 : Sm 強相関化合物 SmAu₃Al₇ の μ SR 実験による基底状態の探索

Md Asif Afzal, Nazir Ahmed, Ryo Tsubota, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki : Superconductivity in chiral structure Y₃Rh₄Ge₁₃

Yuyang Dong, Yosuke Arai, Kenta Kuroda, Misayuki Ochi^A, Natsumi Tanaka^B, Hiroaki Tanaka, Yuxuan Wan, Kiyohisa Tanaka^C, Shin-ichiro Ideta^C, Takayuki Muro^D, Tatsuma D. Matsuda^B, Takeshi Kondo : Electronic structure of skyrmion-hosting Gd₂PdSi₃ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy

● 日本物理学会 2022 年春季大会 2022 年 3 月 15 日 (火)~19 日 (土) (オンライン開催)

矢沼彩乃, 中村直貴, 大村瑠美, 千葉優馬, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 播磨尚朝 : カイラル構造を持つ TrX_4 (Tr : Rh, Ir, X : Ge, Sn) における輸送特性とフェルミ面の研究

久保徹郎, 藤秀樹, 小手川恒, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 平田倫啓, 佐々木孝彦 : 単結晶 PrNb₂Al₂₀ の NMR 緩和率測定

岩見匠真, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : SmTi₂Al₂₀ の Al サイトへの Zn, Cd 置換効果

小林洋大, KEIKO WIDYANISA, 星翔太, 荒瀬将太郎, 松浦航, 伊賀文俊, 原嘉昭, 金子耕士, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨, 八方直久, 林好一, 大山研司 : 希土類かご状物質での局所原子揺らぎの観測

雀部矩正, 河端拓, 明渡悠, 阿部晃大, 松本孝之, 下笠諒平, 保井晃, 河村直己, 池永英司, 筒井智嗣, 佐藤仁, 松田達磨, 渡辺真仁, 魚住孝幸, 水牧仁一郎, 三村功次郎 : 量子臨界物質 YbRh₂Si₂ の硬 X 線分光理論

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, 剛地順, 上床美也, 辺土正人, 仲間隆男 : EuZn₁₁ とその関連物質の磁気特性

田中博大, 天久裕太, 松田達磨, 中島美帆, 天児寧, 仲村愛, 青木大, 剛地順, 上床美也, 辺土正人, 仲間隆男 : EuCuIn₄ の単結晶育成と磁性

● 「超伝導, トポロジカル物質」ワークショップ NIMS(つくば) 招待講演 2021 年 11 月 25 日 (金)~26 日 (月) 松田達磨 : 招待講演 「カイラル構造を持つ物質系における電子輸送特性異常と dHvA 測定によるフェルミ面研究」

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)・ SbCh_2 系層状化合物、 SnPn 系 (Pn はニクトゲン) 層状化合物、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・熱電材料の開発および物性研究を行っている。

1) BiCh_2 系層状化合物の研究

BiCh_2 系超伝導体 $\text{RE}(\text{O},\text{F})\text{BiCh}_2$ の上部臨界磁場 BiCh_2 系超伝導体は発見当初から高い上部臨界磁場 (B_{c2}) が報告されてきた。本研究では、 Se 部分置換によってバルク超伝導性を向上させた $\text{RE}(\text{O},\text{F})\text{BiCh}_2$ の単結晶を育成し、強磁場を用いた磁気抵抗測定から高い B_{c2} の起源を探った。まず、 $\text{RE} = \text{La}$ の系において、パルス強磁場 (東大物性研共同利用による) を用いた測定から、55 T 程度の磁場中 (ab 面内方向) でも超伝導状態が維持されることがわかった (磁場温度相図を図 1 に示す)。 B_{c2} の温度依存性から、パウリ極限が局所的な空間反転対称性の破れにより高められ、軌道極限が層状構造による擬二次元的な電子状態によって高められていることを提案した (Hoshi et al., Sci. Rep. 2022)。同様に、 $\text{RE} = \text{Pr}$ の系においても高い B_{c2} が観測されたが、 $\text{RE} = \text{Ce}$ の系では面内 B_{c2} が非常に低い結果となった。この起源は Ce の持つ磁性が影響していると現時点では考えている (木山・修論, 論文投稿中)。2021 年度の研究では、新たな元素置換についても検討を行い、 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ の O サイトに Cl を置換できる可能性を見出した (森野・修論)。

グリユナイゼン定数を用いた非調和性の検出 BiCh_2 系層状化合物は BiCh 面内の原子振動が非調和的であることが中性子非弾性散乱からわかっており、非調和性の増大に伴う熱伝導率の低下が高い熱電性能指数を達成する。2021 年度の研究では、物質の非調和性の指標となるグリユナイゼン定数を評価する実験環境を整備し、熱電材料 $\text{LaOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ の評価を行った。本系では Se 置換によって非調和性が増し、低エネルギーフォノンモードがソフト化する。グリユナイゼン定数は Se 置換により増加し、中性子非弾性散乱の結果と一致する振る舞いを示した (Abbas et al., APEX 2021)。このことから BiCh_2 系層状化合物の非調和性評価に対してグリユナイゼン定数が有用であることがわかった。そこで、超伝導と非調和性の相関を探るため、超伝導組成である $\text{RE}(\text{O},\text{F})\text{BiS}_2$ におけるグリユナイゼン定数の RE イオン依存性 (面内化学圧力依存性) を評価した。その結果、面内化学圧力上昇による非調和性の増大が確認され、非調和性が増した組成において超伝導が発現し転移温度が上昇することがわかった (Abbas et al., arXiv:2203.11566)。今後は様々な組成の BiCh_2 系超伝導体における非調和性を評価し、超伝導との相関をより詳細に解明する。

2) 高エントロピー合金型 (HEA 型) 超伝導体の研究

新しい HEA 型超伝導体の開発 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。2021年度の研究では、銅酸化物高温超伝導体 RE_{123} の RE サイトの配置エントピーを変化させたバルク試料の評価および薄膜作製を行った (Yamashita et al., Royal

Soc. Open Sci. 2022; JJAP 2022). その結果, RE サイトの HEA 化が超伝導特性の低下につながらないことを確認した. 今後は, HEA 化によって付与が期待できる粒子線照射耐性の向上を横国大との共同研究にてすすめていく. また, PbBi_2Te_4 の Pb サイトを HEA 化した層状化合物 MBi_2Te_4 (Nakahira et al., Materials 2022) や, A15 型 V_3Ge をハイエントロピー化した V_3X の合成を行った. V_3X の結晶構造を放射光 XRD により分析したところ, HEA 組成を持った 5 領域からなる相分離が生じている材料であることがわかり, 同程度の転移温度を持つ V_3Ge の B_{c2} と比べて明らかに高い B_{c2} を示すことがわかった. HEA 組成を保ちながら局所的な相分離を生じさせた合金は, CCA (Compositionally Complex Alloy) と呼ばれる最近定義された新材料であり, 相分離による特性の向上が期待されている. 本研究で開発した V_3X は初の CCA 化合物超伝導体といえる. 今後, 相分離が無い HEA 型化合物と CCA 型化合物の超伝導特性や熱電性能を研究していく. また, 金属テルライド超伝導体 AgInSnPbBiTe_5 の類似物質の探索を行い, $(\text{Ag},\text{Sn},\text{Bi})\text{Te}$ や $(\text{Ag},\text{Sn},\text{Pb},\text{Bi})\text{Te}$ が半導体であり, バンド計算からトポロジカル結晶絶縁体である可能性を報告した. これらの組成において, In 置換が系を金属化し超伝導を発現させることを見出した (Sci. Rep. 2021; arXiv:2204.00407).

NaCl 型カルコゲナイドの高圧下物性 金属テルライド超伝導体 AgInSnPbBiTe_5 の高圧下物性 (結晶構造・超伝導特性・電子状態) の評価を行った. 配置エントロピーがゼロの NaCl 型 PbTe では, 高圧印加によって直方晶構造, さらに CsCl 型へ構造相転移をするが, 配置エントロピーを高めた AgPbBiTe_3 や AgInSnPbBiTe_5 では直方晶相が抑制され, NaCl 型および CsCl 型が安定化することがわかった. また, 興味深いことに, 配置エントロピーを高めるに従い, CsCl 相での超伝導転移温度の圧力依存性がフラットになることがわかった (図 2). すなわち, HEA 組成では転移温度が圧力に依存せず一定になる. X 線吸収分光により電子状態を観察すると, PbTe と AgInSnPbBiTe_5 の電子状態 (Pb エッジおよび Bi エッジでの分光) の圧力依存性は非常によく似た振る舞いを示すことがわかり, AgInSnPbBiTe_5 の圧力下における転移温度の異常なふるまいが電子状態変化では説明できず, HEA 化により生じた得意な局所構造によるものであると提案した (Kasem et al., arXiv:2112.06461). 同様の圧力印加に鈍感な転移温度変化は合金ベースの HEA で観測されており, 今後の研究で HEA 型超伝導体における圧力下転移温度変化に関する普遍性を研究する.

3) 熱電材料研究

新規熱電材料の開発 高い配置エントロピーを持つ熱電として, $(\text{Ag},\text{Pb},\text{Bi})(\text{S},\text{Se},\text{Te})$ を開発し, 熱電物性を評価した. 2 サイトを合金化することで高い配置エントロピーを実現した. n 型の特性を示す熱電材料が得られ, 723 K において $ZT = 0.54$ が得られた (Yamashita et al., Mater. Res. Lett. 2021). 今後は組成の最適化と, HEA 化が熱電物性に及ぼす影響を解明する. また, Zintl 相 $\text{Eu}_5\text{In}_2\text{As}_6$ の多結晶試料を合成し, 両極性ドーピング可能であることを見出した. 従来の Zintl 相化合物の多くが p 型であるのに比して特徴的な物質であることがわかった (Tomitaka et al., J. Mater. Chem. A 2022).

異方的キャリア極性を示すバルク試料の開発 熱電材料の特性を表す物理量にゼーベック係数がある. 最近, 一部の物質において結晶方位によってゼーベック係数の符号 (キャリア極性) が異なる物質が報告されている. 2021 年度の研究では, 単結晶において異方的キャリア極性が報告されていた NaSn_2As_2 に着目し, 配向多結晶を作成することで, バルク試料においても異方的キャリア極性が発現することを明らかにした (Nakamura et al., APL 2021: editor's pick). また, NaSnAs においても同様の配向多結晶の作製と異方的キャリア特性評価を行った (Omprakash et al., Mater. Today Commun. 2022).

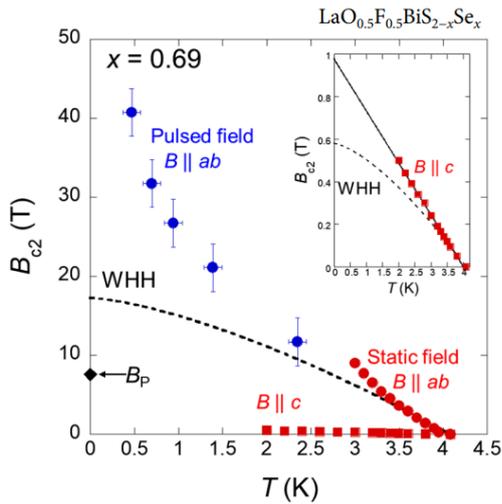


図 1: $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{S}_{1.31}\text{Se}_{0.69}$ の上部臨界磁場に関する図。

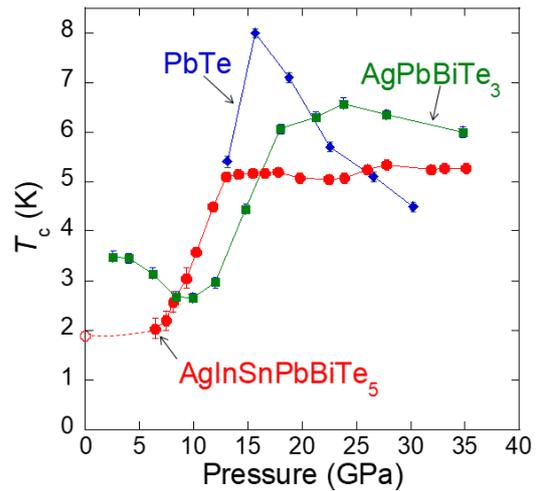


図 2: PbTe , AgPbBiTe_3 , AgInSnPbBiTe_5 の転移温度の圧力依存性に関する図。

2. 研究業績

1) 論文

N. Tomitaka, Y. Goto, K. Morino, K. Hoshi, Y. Nakahira, H. Ito, A. Miura, H. Usui, Y. Mizuguchi: “Bipolar doping and thermoelectric properties of Zintl arsenide $\text{Eu}_5\text{In}_2\text{As}_6$ ” *Journal of Materials Chemistry A*, **9** (2021) 26362

A. Yamashita, Y. Shukunami, Y. Mizuguchi: “Improvement of critical current density of $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ by increase in configurational entropy of mixing” *Royal Society Open Science*, **9** (2021) 211874

Y. Yuan, H. Arima, M. Masaoka, Y. Naito, Y. Hijikata, R. Jha, Y. Mizuguchi, K. Matsubayashi: “Pressure tuning of localization and superconductivity in LaOPbBiS_3 and $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{AgS}_6$ ” *Physical Review B*, **105**, (2022) 064509

K. Hoshi, R. Kurihara, Y. Goto, M. Tokunaga, Y. Mizuguchi: “Extremely high upper critical field in BiCh_2 -based (Ch: S and Se) layered superconductor $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_{2-x}\text{Se}_x$ ($x=0.22$ and 0.69)” *Scientific Reports*, **12**, (2022) 288

S.S. Philip, A. Athauda, Y. Goto, Y. Mizuguchi, D. Louca: “Out-of-Plane Sulfur Distortions in the $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ Superconductor” *Condensed Matter*, **6** (2021) 48

T. Mitobe, K. Hoshi, M. Kasem, R. Kiyama, H. Usui, A. Yamashita, R. Higashinaka, T.D. Matsuda, Y. Aoki, T. Katase, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Superconductivity in In-doped AgSnBiTe_3 with possible band inversion” *Scientific Reports*, **11** (2021) 22885

M.R. Kasem, A. Yamashita, T. Hatano, K. Sakurai, N. Oono-Hori, Y. Goto, O. Miura, Y. Mizuguchi: “Anomalous broadening of specific heat jump at T_c in high-entropy-alloy-type superconductor TrZr_2 ” *Superconductor Science and Technology*, **34** (2021) 125001

- A. Yamashita, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “n-Type thermoelectric metal chalcogenide (Ag,Pb,Bi)(S,Se,Te) designed by multi-site-type high-entropy alloying” *Materials Research Letters*, **9** (2021) 366
- H. Ito, K. Shitara, Y. Wang, K. Fujii, M. Yashima, Y. Goto, C. Moriyoshi, N.C. Rosero - Navarro, A. Miura, K. Tadanaga: “Kinetically Stabilized Cation Arrangement in Li_3YCl_6 Superionic Conductor during Solid - State Reaction” *Advanced Science*, **8** (2021) 2101413
- K. Hoshi, Y. Mizuguchi: “Experimental overview on pairing mechanisms of BiCh_2 -based (Ch: S, Se) layered superconductors” *Journal of Physics: Condensed Matter*, **33** (2021) 473001
- A. Yamashita, T.D. Matsuda, Y. Mizuguchi: “Synthesis of new high-entropy alloy-type $\text{Nb}_3(\text{Al}, \text{Sn}, \text{Ge}, \text{Ga}, \text{Si})$ superconductors” *Journal of Alloys and Compounds*, **868** (2021) 159233
- K. Miyaki, O. Miura, Y. Mizuguchi: “Relationship between anion height and superconducting properties for $\text{Fe}_{1+x}\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ bulk single crystals” *Journal of Physics: Conference Series*, **1975** (2021) 012011
- J. Lee, M. Nagao, Y. Mizuguchi, J. Ruff: “Direct observation of an incommensurate charge density wave in the BiS_2 -based superconductor $\text{NdO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ” *Physical Review B*, **103** (2021) 245120
- F.I. Abbas, A. Yamashita, K. Hoshi, R. Kiyama, M.R. Kasem, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Investigation of lattice anharmonicity in thermoelectric $\text{LaOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ through Grüneisen parameter” *Applied Physics Express*, **14** (2021) 071002
- A. Miura, C.J. Bartel, Y. Goto, Y. Mizuguchi, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Wang, T. Yaguchi, M. Shirai, M. Nagao, N.C. Rosero - Navarro, K. Tadanaga, G. Ceder, W. Sun: “Observing and Modeling the Sequential Pairwise Reactions that Drive Solid-State Ceramic Synthesis” *Advanced Materials*, **33** (2021) 2100312
- S. Liu, R. Matsumoto, R. Jha, A. Yamashita, S.I. Kawaguchi, Y. Goto, Y. Takano, Y. Mizuguchi: “High-pressure effects on superconducting properties and crystal structure of Bi-based layered superconductor $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{Ag}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{S}_6$ ” *Journal of Physics: Condensed Matter*, **33** (2021) 225702
- H. Ito, A. Miura, Y. Goto, Y. Mizuguchi, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, N.C. Rosero - Navarro, K. Tadanaga: “Phase transition, magnetic, and electronic properties of CeOInS_2 ” *Journal of the Ceramic Society of Japan*, **129** (2021) 249
- M. Kasem, A. Yamashita, Y. Goto, T.D. Matsuda, Y. Mizuguchi: “Synthesis of high-entropy-alloy-type superconductors $(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Rh}, \text{Ir})\text{Zr}_2$ with tunable transition temperature” *Journal of Materials Science*, **56** (2021) 9499
- M. Calpa, H. Nakajima, S. Mori, Y. Goto, Y. Mizuguchi, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, N.C. Rosero - Navarro, A. Miura, K. Tadanaga: “Formation Mechanism of $\beta\text{-Li}_3\text{PS}_4$ through Decomposition of Complexes” *Inorganic Chemistry*, **60** (2021) 6964
- K. Shinozaki, Y. Goto, K. Hoshi, R. Kiyama, N. Nakamura, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, H. Usui, Y. Mizuguchi: “Thermoelectric Properties of the As/P-Based Zintl Compounds $\text{EuIn}_2\text{As}_{2-x}\text{P}_x$ ($x = 0\text{-}2$) and SrSn_2As_2 ” *ACS Applied Energy Materials*, **4** (2021) 5155

N. Nakamura, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Axis-dependent carrier polarity in polycrystalline NaSn_2As_2 ”
Applied Physics Letters, **118** (2021) 153903

R. Kiyama, K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Investigation of Superconducting Properties and Possible Nematic Superconductivity in Self - Doped BiCh_2 -Based Superconductor $\text{CeOBiS}_{1.7}\text{Se}_{0.3}$ ”
Physica Status Solidi (RRL)–Rapid Research Letters, **15** (2021) 2000546

S. Hosokawa, N. Happo, K. Hayashi, T. Matsushita, A. Yamashita: “Three-dimensional Atomic Image of FeSe High-temperature Superconductor by X-ray Fluorescence Holography”
e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, **20** (2022) 36

2) 学会講演

国内会議

● 金研 WS (オンライン (金研中性子主催) 2月 15–16 日)

水口 佳一: “局所構造を制御した新超伝導体の開発” (招待講演)

● 強磁場研究会 (オンライン 11月 30日)

水口 佳一: “強磁場を用いた BiS_2 系超伝導体の物性研究” (招待講演)

● 第 77 回日本物理学会年次大会 (オンライン 3月 15–19 日)

水口 佳一: “高エントロピー合金型熱電材料の探索”

山下 愛智: “高エントロピー合金型金属カルコゲナイド系化合物の熱電特性”

中村 尚人: “多結晶 NaSn_2As_2 の異方的なキャリア極性”

Md. Riad Kasem: “High Pressure Effect on High-Entropy-Alloy-Type AgInSnPbBiTe_5 Compound”
(英語講演)

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

● 2021 年日本物理学会秋季大会 (オンライン 9月 20–23 日)

木山諒亮: “ BiCh_2 系超伝導体 $\text{RE}(\text{O},\text{F})\text{Bi}(\text{S},\text{Se})_2$ における磁気抵抗の面内異方性”

山下愛智: “ BiS_2 系超伝導体の高圧相における同位体効果の検証”

水口佳一: “高エントロピー合金型化合物 TrZr_2 の超伝導特性”

中平夕貴: “放射光 X 線回折による酸素四面体の頂点共有ネットワークをもつ強誘電体の構造相転移”

● 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (青学大相模原 C(hybrid) 2022 年 3月 22–26 日)

山下愛智: “PLD 法による高エントロピー $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ 超伝導薄膜の作製”

● 第 38 回強誘電体会議 (オンライン 6月 1日–4日)

中平夕貴：“アルミネートソーダライト型強誘電体 $\text{Ca}_8[\text{AlO}_2]_{12}(\text{SO}_4)_2$ の立方晶構造の特徴”

国際会議

● MRM2021 2021年12月13–16日 (Yokohama)

A. Yamashita: “Enhancement of critical current density of $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ by the increase in configurational entropy of mixing at the RE site”

Y. Goto: “Axis-dependent carrier polarity in polycrystalline NaSn_2As_2 ”

D. Gomita: “Valence State of Samarium in BiS_2 -Based $\text{RE}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}_{0.7}\text{F}_{0.3}\text{BiS}_2$ ”

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

Md. R. Kasem: “Superconducting Properties In High-Entropy-Alloy-Type TrZr_2 Compounds”

Y. Mizuguchi: “Material design concept for superconducting high-entropy-alloy-type compounds”

● 1st Japan-France Virtual Workshop on Thermoelectrics 2021年9月27–30日 (Online)

Y. Goto: “Axis-dependent carrier polarity in polycrystalline NaSn_2As_2 for transverse thermoelectrics”

3) 著書・学会誌等

後藤陽介：“pn 共存型の新しい熱電材料の開発”，グリーンエネルギー 2021年9月号, **2021**

表界面光研究室

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。界面や表面でおこる様々な物理現象を深く理解し、そして制御することができれば、新たな物性を見出すことや、革新的なデバイスの実現につながる。本研究室では、高効率な光電変換・熱電変換などの創エネルギーのサイエンスに貢献することを目標の一つとして、(1) 界面や表面の制御、(2) 光励起によって生じる非平衡キャリアに由来する光物性、に着目して研究している。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。2021年度は、新型コロナや火災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

縦型電気二重層デバイスを用いた同一方向の熱伝導率と電気伝導率の相関解明 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。柔らかな材料は、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が基礎・応用の両面で重要な課題となっている。単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、柔らかな材料の一つである。これまで薄膜の縦方向の熱伝導率が評価できる時間領域サーモリフレクタンس (TDTR) 法と、薄膜の横方向の電気伝導率が評価できる電気二重層デバイスを組み合わせた独自の測定手法を開発し、SWCNT 薄膜における熱伝導と電気伝導の相関を明らかにしてきた。しかし、そこでは熱伝導と電気伝導の測定方向が異なっており、その妥当性の議論が困難な状況であった。今年度は、ハイデルベルク大学 Jana Zaumseil 研究室と共同で、縦方向の電気伝導率が評価できる縦型電気二重層デバイスを用いて、同一方向における熱伝導率と電気伝導率の評価を試みた。その結果、電気伝導率を数桁変化させても熱伝導率が変化しないユニークなふるまいを実証でき、SWCNT 薄膜を用いた熱電デバイス等に有用な知見を得た。

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性能解明と熱電素子作製 熱電変換の出力を示すパワーファクターは、電気伝導率とゼーベック係数と正の相関があり、ゼーベック係数を維持しつつ高い電気伝導率を実現することが熱電素子高性能化の重要な課題となる。SWCNT 薄膜では、その1次元的な電子構造に由来して高いゼーベック係数が期待されるが、ナノチューブ間の接合に由来して電気伝導率が低下することが問題となっていた。今年度は、ライス大学河野淳一郎研究室と共同で、二層ナノチューブが高密度にパックしたナノチューブ系を用いることで、高いゼーベック係数を維持したまま良好な接合を実現できる、つまり電気伝導率を向上できることを明らかにした。本研究室では、ナノチューブ系の熱電特性の評価と電気化学的な手法を用いて系統的にフェルミレベルをシフトさせた場合での熱電特性の解明を行った。

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立ち上がってきた。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。今年度は、その研究を、金属カーボンナノチューブ、グラフェン、2次元 TMDC 等の異なる物質に展開し、どのようなふるまいの違いが得られるかに注目した研究を進めてきた。その結果、グラフェンと金属 SWCNT 薄膜において高次高調波の増大・減少のふるまいが異なる現象を見出し、グラフェンにおいては高次高調波のふるまいがキャリア注入量にほとんど依存しないことを明らかにした。また、金属 SWCNT における高次高調波のふるまいがレーザー強度に強く依存し、高強度のレーザーにおいて、高次高調波のフェルミレベル依存性（増大・減少のふるまい）が消失する現象を見出した。現在は、その理論的背景の理解を進めている。

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 では、古くからその合成手法の成功は報告されているが、その物性は殆ど明らかにされていない。その背景は、未だに物性研究が可能な単層の TMDC-NT は合成されておらず、構造と物性との関係を系統的に議論した研究例は皆無の状況に由来する。直径の小さく構造が均一な TMDC-NT の合成手法を確立し、その物性を明らかにすることを目標に、研究を進めている。今年度は、これまで開発してきた WS₂-NT の合成法に前駆体の構造制御を加え、さらなる小径 WS₂-NT を得る新規合成法の開発を行った。さらに、TMDC-NT を基材として異なる TMDC-NT を同軸成長させるヘテロナノチューブの新規合成を進めた。

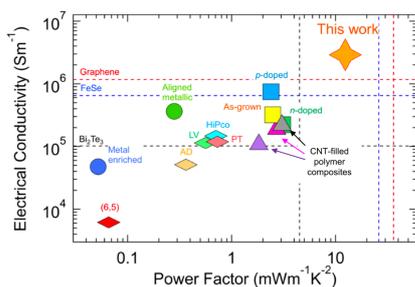


図 1: カーボンナノチューブ系の優れた熱電性能

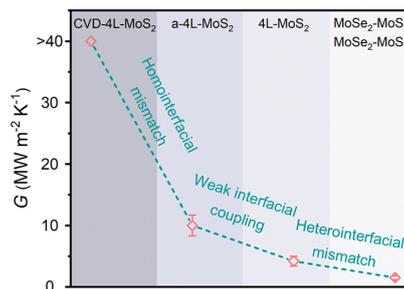


図 2: 接合構造の異なる層状物質の熱伝導

2. 研究業績

1) 論文

H. Ogura, M. Kaneda, Y. Nakanishi, Y. Nonoguchi, J. Pu, M. Ohfuchi, T. Irisawa, H. E. Lim, T. Endo, K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Miyata: "Air-stable and efficient electron doping of monolayer MoS₂ by salt-crown ether treatment", *Nanoscale*, **13** (2021) 8784-8789

Y. Yomogida, M. Nagano, H. Hamasaki, K. Hirahara, Y. Miyata, K. Yanagi: "Synthesis of relatively small-diameter tungsten ditelluride nanowires from solution-grown tungsten oxide nanowires", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60** (2021) SCCD02

Y. Ichinose, M. Matsubara, Y. Yomogida, A. Yoshida, K. Ueji, K. Kanahashi, J. Pu, T. Takenobu, T. Yamamoto, K. Yanagi: "One-dimensionality of thermoelectric properties of semiconducting nanomaterials", *Phys. Rev. Mater.*, **5** (2021) 025404

S. Kusaba, Y. Katagiri, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Yanagi, N. Naka, K. Tanaka: "Broadband sum frequency generation spectroscopy of dark exciton states in hBN-encapsulated monolayer WSe₂", *Opt. Express*, **29** (2021) 24629-24645

N. Komatsu, Y. Ichinose, O. S. Dewey, L. W. Taylor, M. A. Trafford, Y. Yomogida, G. Wehmeyer, M. Pasquali, K. Yanagi, J. Kono: "Macroscopic weavable fibers of carbon nanotubes with giant thermoelectric power factor", *Nat. Commun.*, **12** (2021) 4931

M. A. Rahman, Y. Yomogida, M. Nagano, R. Tanaka, Y. Miyata, K. Yanagi: "Improved synthesis of WS₂ nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60** (2021) 100902

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi: "Control of Thermal Conductance across Vertically Stacked Two-Dimensional van der Waals Materials via Interfacial Engineering", *ACS Nano*, **15** (2021) 15902-15909

W. Gao, D. Adinehloo, X. Li, A. Mojibpour, Y. Yomogida, A Hirano, T. Tanaka, H. Kataura, M. Zheng, V. Perebeinos, J. Kono: "Band structure dependent electronic localization in macroscopic films of single-chirality single-wall carbon nanotubes", *Carbon*, **183** (2021) 774-779

2) 学会講演

● 第 61 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 2021 年 9 月 1-3 日 (オンライン)

Y. Ichinose, A. Yoshida, M. Matsubara, S. Saito, K. Ueji, Y. Yomogida, T. Yamamoto, K. Yanagi: Temperature Dependence of the Thermoelectric Conductivity L12 in Semiconducting SWCNTs with Controlled Chemical Potential

N. Muto, K. Ueji, Y. Matsuoka, Y. Ichinose, Y. Yomogida, T. Yagi, J. Zaumseil, K. Yanagi: Heat and charge-carrier flows in single-walled carbon nanotube film during a vertical electrolyte-gating

M. A. Rahman, Y. Yomogida, M. Nagano, R. Tanaka, Y. Miyata, K. Yanagi: Improved synthesis of WS₂ nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature

Yuuya Hosokawa, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Circular dichroism spectra of Helicity-sorted Single-wall Carbon Nanotubes with Controlled Chemical Potential

Hiroyuki Nishidome, Kohei Nagai, Kento Uchida, Kenji Kawahara, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Hiroki Ago, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Comparison between high harmonic generation in metallic single-walled carbon nanotubes and graphene

Yohei Yomogida, Kanako Horiuchi, Ryotaro Okada, Hideki Kawai, Yota Ichinose, Hiroyuki Nishidome, Kan Ueji, Natsumi Komatsu, Weilu Gao, Junichiro Kono, Kazuhiro Yanagi: Hall effect in gated single-wall carbon nanotube films

Kan Ueji, Nobuhiro Muto, Yuya Matsuoka, Yota Ichinose, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi: Intuitive Correlations between Heat and Charge-Carrier Flows in Vertical Devices Using Single-Walled Carbon Nanotube Films

Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Takahiko Endo, Hong En Lim, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida, *Kazuhiro Yanagi: Enhancement of the Thermal Conductance on Artificially Stacked MoS₂ by Intercalation

● 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会 2021 年 9 月 10~13 日 (オンライン)

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, H. E. Lim, T. Endo, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi: Unconventional, Controllable Tuning of Thermal Conductance Across Vertically Layered van der Waals Materials via Ionic Intercalation

柳和宏: カーボンナノチューブの一次元性と熱電物性 (招待講演)

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 14~17 日 (オンライン)

西留比呂幸, 永井恒平, 内田健人, 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: 金属型単層カーボンナノチューブとグラフェンにおける高次高調波発生のフェルミレベル依存性

草場哲, 片桐佳来, 渡邊賢司, 谷口尚, 柳和宏, 中暢子, 田中耕一郎: 単層 WSe₂ における 2p 励起子共鳴和周波ピークの線幅の起源

高橋伸弥, 草場哲, 渡邊賢司, 谷口尚, 柳和宏, 田中耕一郎: 非線形分光を用いた hBN 封止単層 MoSe₂ 励起子構造の解明

蓬田陽平, 堀内加奈子, 岡田遼太郎, 河合英輝, 一ノ瀬遙太, 西留比呂幸, 上治寛, N. Komatsu, W. Gao, J. Kono, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブ薄膜におけるホール効果

蓬田陽平: 高純度単一構造カーボンナノチューブの自動分離 (招待講演)

● 第 62 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 3 月 2-4 日 (オンライン)

Yota Ichinose, Manaho Matsubara, Akari Yoshida, Shigeki Saito, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Takahiro Yamamoto, Kazuhiro Yanagi: Unconventional Temperature Dependence of Thermoelectric Properties on Semiconducting SWCNT Films

Shota Yamaguchi, Ryosuke Mizuno, Hiroyuki Mogi, Hong En Lim, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Kazuhiro Yanagi, Kosuke Nagashio, Shoji Yoshida, Hidemi Shigekawa, Yasumitsu Miyata: Electronic structure and transport properties of multilayer Nb-doped MoS₂

Mai Nagano, Yohei Yomogida, Md. Ashiqur Rahman, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of Hetero Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes

Hiroyuki Nishidome, Kohei Nagai, Kento Uchida, Yuta Murakami, Kenji Kawahara, Takahiko Endo, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Yasumitsu Miyata, Hiroki Ago, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Influence of Laser-intensity on the Fermi-level dependence of high-harmonic generation in nanocarbon materials

Seiya Kawasaki, Hiroto Ogura, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Kazuhiro Yanagi, Toshifumi Irisawa, Kosuke Nagashio, Yasumitsu Miyata: Electronic transport properties of multilayer MoS₂-based PN diodes

Shinpei Furusawa, Yohei Yomogida, Yuta Sato, Kazuhiro Yanagi, Kazu Suenaga, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata: Vapor-phase synthesis of single-walled MX₂ nanotubes templated on surfactant-dispersed boron-nitride nanotubes

Hiroto Ogura, Seiya Kawasaki, Zheng Liu, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Kazuhiro Yanagi, Toshifumi Irisawa, Keiji Ueno, Kosuke Nagashio, Yasumitsu Miyata: Fabrication and electronic transport properties of multilayer Nb_xMo_{1-x}S₂/MoS₂ in-plane heterostructures

● 日本物理学会 第 77 回年次大会 2022 年 3 月 15–19 日 (オンライン)

高橋伸弥, 草場哲, 渡邊賢司, 谷口尚, 柳和宏, 田中耕一郎: 和周波分光による hBN 封止単層 MoSe₂ 励起子緩和過程の解明

● 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 2022 年 3 月 22–26 日 (オンライン・青山学院大学)

M. A. Rahman, Yohei Yomogida, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of relatively small-diameter WS₂ nanotubes by sulfurization of poly(ethylene glycol) treated thin tungsten oxide nanowires

上治寛, 武藤暢宏, 松岡勇也, 一ノ瀬遥太, 蓬田陽平, 八木貴志, J. Zaumseil, 柳和宏: 縦型電解質デバイスと時間領域サーモフレクタンス法の融合による熱・電荷流相関の解明

蓬田陽平, 柳和宏: 遷移金属カルコゲナイドナノチューブの合成・精製とその応用 (招待講演)

● 第 5 回フォノンエンジニアリング研究会 2021 年 7 月 2–3 日 (オンライン)

上治寛: 垂直型デバイスによる単層カーボンナノチューブ薄膜の熱と電荷輸送

柳和宏: ファンデルワールス界面系の熱電特性の制御 (招待講演)

国際会議

● 21st International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) 2021 年 7 月 6–11 日 (Online)

Kan Ueji, Yota Ichinose, Yuya Matsuoka, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Junichiro Kono, Kazuhiro Yanagi: Time-domain thermoreflectance study on the figure of merit for aligned semi-conducting single walled carbon nanotube film with tuned Fermi-level

Yota Ichinose, Manaho Matsubara, Yohei Yomogida, Akari Yoshida, Kan Ueji, Kaito Kanahashi, Jiang Pu, Taishi Takenobu, Takahiro Yamamoto, Kazuhiro Yanagi: One-dimensionality of Thermoelectric Properties of Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes

Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Takashi Endo, Hong En Lim, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Tuning Heat Flow Across Two-dimensional Stacked van der Waals Materials via Interfacial Engineering

Hiroyuki Nishidome, Kohei Nagai, Kent Uchida, Kenji Kawahara, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Hiroki Ago, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Comparison of gate-tuned high-harmonic generation between metallic single-walled carbon nanotubes and graphen

● 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) 2021年11月26–29日 (Online)

Kan Ueji, Nobuhiro Muto, Yuya Matsuoka, Yota Ichinose, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi: Time-domain thermoreflectance study on the correlation between heat and charge carrier flows via vertical electrolyte-gating device

Hiroto Ogura, Masahiko Kaneda, Yusuke Nakanishi, Yoshiyuki Nonoguchi, Jiang Pu, Mari Ohfuchi, Toshifumi Irisawa, Hong En Lim, Takahiko Endo, Kazuhiro Yanagi, Taishi Takenobu 3 and Yasumitsu Miyata: ir-stable, efficient n-type doping of MoS₂ by salt rown ether treatment

M. A. Rahman, Y. Yomogida, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi: Improved synthesis of WS₂ nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature

Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Takahiko Endo, Hong En Lim, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Influence of Intercalation on the Thermal Conductance on Artificially Stacked MoS₂

● APS March Meeting 2022 2022年3月14–18日 (Online)

Kazuhiro Yanagi, Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Takahiko Endo, Hong E Lim, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida: Control of Thermal Conductance across Vertically Stacked Two-Dimensional van der Waals Materials via Interfacial Engineering

Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi, Kanako Horiuchi, Junichiro Kono, Natsumi Komatsu, Weilu Gao, Kan Ueji, Yota Ichinose, Hiroyuki Nishidome: Hall effect in ionic liquid-gated single-wall carbon nanotube films

● Workshop on Thermal and Charge Transport across Flexible Nano-Interfaces (TCTFN2021) 2021年12月11日 (Online)

K. Yanagi: Thermal conductance across artificially stacked four layered transition metal dichalcogenides

● 239th ECS Meeting 2021年5月30日–6月3日 (Online)

Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric Performance of Fermi-Level Tuned and Aligned Single Walled Carbon Nanotubes (招待講演)

● 11th A3 symposium 2021年12月14日–12月16日 (Online)

Kazuhiro Yanagi: One-dimensional characteristics in thermoelectric properties of single walled carbon nanotubes (招待講演)

● 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2021) 2021年12月16日–21日 (Online)

Kazuhiro Yanagi: One-Dimensional Character in Thermoelectric properties of Fermi-level Tuned Single-Walled Carbon Nanotubes (招待講演)

3) 特許

柳和宏, 等: 原子層材料における熱輸送の電界印加による制御方法, 特願 2021-109863

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。2021 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特異な物性の発現や光・電子デバイス応用が期待されている。本グループでは、二硫化モリブデンなどの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 ヘテロ構造の作製と励起子光物性 (内藤修士論文, 牧野卒業研究) や電子輸送特性 (鈴木修士論文, 川崎卒業研究), TMDC ナノリボンの気相成長と発光特性 (金田修士論文) などについて研究を進めた。特に、TMDC のドライ転写技術やナノリボン構造・PN 接合の成長技術が進展し、バンド間トンネル伝導や異方的な励起子発光などが観測された。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に対する異種原子のインターカレーション (夏井卒業研究) や、窒化ホウ素 (BN) ナノチューブをテンプレートとした TMDC ナノチューブの合成と構造解析 (古澤卒業研究) を進めた。インターカレーションに関しては、様々な処理条件を検討し、電子顕微鏡観察やラマンスペクトルを利用した評価を行った。TMDC ナノチューブの合成については、孤立した BN ナノチューブを容易に架橋する手法を開発し、様々な組成・直径の TMDC ナノチューブの作製に成功した。今後、その結晶構造の解析や電子状態や電子輸送特性に関する研究を進めていく。

2. 研究業績

1) 論文

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.*, (2022) in press

S. Gupta, R. Ohshima, Y. Ando, T. Endo, Y. Miyata, M. Shiraishi: "Electrical transport properties of atomically thin WSe₂ using perpendicular magnetic anisotropy metal contacts", *Appl. Phys. Lett.*, **120** (2022) 013102

H. E. Lim, Z. Liu, J. Kim, J. Pu, H. Shimizu, T. Endo, Y. Nakanishi, T. Takenobu, Y. Miyata: "Nanowire-to-Nanoribbon Conversion in Transition-Metal Chalcogenides: Implications for One-Dimensional Electronics and Optoelectronics", *ACS Appl. Nano Mater.*, **5** (2022) 1775-1782

Y. Murai, S. Zhang, T. Hotta, Z. Liu, T. Endo, H. Shimizu, Y. Miyata, T. Irisawa, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, H. Mogi, T. Sato, S. Yoshida, H. Shigekawa, T. Taniguchi, K. Watanabe, R. Canton-Vitoria, R. Kitaura: "A Versatile Post-Doping Towards Two-Dimensional Semiconductors", *ACS Nano*, **15** (2021) 19225-19232

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi: "Control of Thermal Conductance across Vertically Stacked Two-Dimensional van der Waals Materials via Interfacial Engineering", *ACS Nano*, **15** (2021) 15902-15909

J. Pu, W. Zhang, H. Matsuoka, Y. Kobayashi, Y. Takaguchi, Y. Miyata, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu: "Room-Temperature Chiral Light-Emitting Diode Based on Strained Monolayer Semiconductors", *Adv. Mater.*, **33** (2021) 2100601-1-9

H. Ou, H. Matsuoka, J. Tempia, T. Yamada, T. Takahashi, K. Oi, Y. Takaguchi, T. Endo, Y. Miyata, C.-H. Chen, L.-J. Li, J. Pu, T. Takenobu: "Spatial Control of Dynamic p-i-n Junctions in Transition Metal Dichalcogenide Light-Emitting Devices", *ACS Nano*, **15** (2021) 12911-12921

H. Ogura, M. Kaneda, Y. Nakanishi, Y. Nonoguchi, J. Pu, M. Ohfuchi, T. Irisawa, H. E. Lim, T. Endo, K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Miyata: "Air-stable and efficient electron doping of monolayer MoS₂ by salt-crown ether treatment", *Nanoscale*, **13** (2021) 8784-8789

2) 著書

中西勇介: "ナノ試験管を用いた未踏・新奇な原子細線の創製 一次元ナノ空間を用いた遷移金属カルコゲン化合物の精密合成", 「化学と工業」 vol.74 No.7 p.534-535 (2021)

中西勇介: "注目の論文：二次元シートを巻物状に巻く", 月刊「化学」2022年1月号

3) 学会講演

● 第82回応用物理学会秋季学術講演会 2021年9月10-13日, 21-23日 (オンライン)

宮田耕充: 二次元物質の成長と集積化 (招待講演)

鈴木壮磨, 小椋友寛, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 山下兼一, 蒲江, 竹延大志: 遷移金属ダイカルコゲナイドを用いた微小共振器発光デバイス

茂木裕幸, 水野良祐, 和田尚樹, 宮田耕充, 嵐田雄介, 谷中淳, 吉田昭二, 武内修, 重川秀実: 時間分解多探針STMを用いた単層WS₂/WSe₂面内ヘテロ接合の局所励起子ダイナミクス評価 (招待講演)

小倉宏斗, 金田賢彦, 中西勇介, 野々口斐之, 蒲江, 大淵真理, 入沢寿史, 林宏恩, 遠藤尚彦, 柳和宏, 竹延大志, 宮田耕充: クラウンエーテル錯体による単層MoS₂への高安定な電子ドーピング

鈴木駿太, 小倉宏斗, 中西勇介, 林宏恩, 遠藤尚彦, 上野啓司, 野々口斐, 宮田耕充: Ag-TFSI処理によるWSe₂へのホールドーピング

Masafumi Shimasaki, Takahiko Endo, Taishi Nishihara, Kazunari Matsuda, Yasumitsu Miyata, Yuhei Miyauchi: Optical properties of lateral heteromonolayer WSe₂-MoSe₂

Hiroshi Shimizu, Jiang Pu, Zheng Liu, Hong En Lim, Yusuke Nakanishi, Takahiko Endo, Kazuhiro Yanagi, Taishi Takenobu, Yasumitsu Miyata: High mobility and 2D electron gas in aggregates of 1D transition metal chalcogenide atomic wires

Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Hong En Lim, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Unconventional, Controllable Tuning of Thermal Conductance Across Vertically Layered van der Waals Materials via Ionic Intercalation

高橋統吾, 蒲江, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 竹延大志: 単層 WS₂ における異常光起電力効果

島田航, 遠藤尚彦, 平井健二, 猪瀬朋子, 宮田耕充, 雲林院宏: WSe₂ シートの分子修飾と電子状態の解析

内藤響, 中西勇介, Lim Hong En, 遠藤尚彦, 渡辺賢司, 谷口尚, 宮田耕充: ドライ転写によるツイスト型多層 MoS₂ の作製

佐藤智拓, 伊藤圭汰, 茂木裕幸, 嵐田雄介, 吉田昭二, 武内修, 宮田耕充, 重川秀実: 大面積 TMDC 単層の作製と表面構造の STM 解析

● 第 61 回 フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2021 年 9 月 1-3 日 (オンライン)

Togo Takahashi, Jiang Pu, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Taishi Takenobu: Anomalous Photo-voltaic Effect in Strained Monolayer WS₂

Rei Usami, Ryotaro Fukui, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Souma Suzuki, Togo Takahashi, Ryo Kitaura, Jiang Pu, Taishi Takenobu: The strain effect of optical properties on hetetostructure

Soma Suzuki, Tomohiro Ogura, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Kenichi Yamashita, Jiang Pu, Taishi Takenobu: lectrolyte-based transition metal dichalcogenide light-emitting devices with micro-cavity

Iori Kikuchi, Hiroshi Shimizu, Lim Hong En, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata, Jiang Pu, Taishi Takenobu: Electrical Transport Properties of W₆Te₆ Nanowire Network Films

Kazuki Hashimoto, Hong En Lim, Yusuke Nakanishi, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata: Kelvin probe force microscopy study of MoS₂/MoSe₂ in-plane heterostructures

Mikio Kobayashi, Keisuke Shinokita, Naoki Wada, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Kazunari Matsuda: Optical properties of transition metal dichalcogenides with microspherical optical cavity

Hiroshi Shimizu, Zheng Liu, Hong En Lim, Yusuke Nakanishi, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata: Indium intercalation in bundles of WTe atomic wires

Hong En Lim, Zheng Liu, Jiang Pu, Hiroshi Shimizu, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Taishi Takenobu, Yasumitsu Miyata: Wire-to-Ribbon Conversion in Transition Metal Chalcogenides

Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi: Improved synthesis of WS₂ nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature

Hiroto Ogura, Yoshiyuki Nonoguchi, Shaochun Zhang, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Ryo Kitaura, Kosuke Nagashio, Yasumitsu Miyata: N-type polar transition of p-type MoS₂ by chemical doping

Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Takahiko Endo, Hong En Lim, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Enhancement of the Thermal Conductance on Artificially Stacked MoS₂ by Intercalation

● 日本物理学会 2021 年秋季大会 2021 年 9 月 20-23 日 (オンライン)

高橋統吾, 安藤千里, 斎藤光史, 宮田耕充, 中西勇介, 蒲江, 竹延大志: 三次元構造を有する大面積 NbSe₂ 薄膜の超伝導特性

福井遼太郎, 宇佐美怜, 鈴木壮磨, 高橋統吾, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 北浦良, 蒲江, 竹延大志: 歪み印加した WS₂/WSe₂ ファンデルワールスヘテロ構造の光学特性

● 日本分析化学会第 70 年会 2021 年 9 月 22-24 日 (オンライン)

坂本ひより, 遠藤尚彦, 今枝佳祐, 宮田耕充, 上野貢生: Au/WSe₂ 結合系ナノ構造の発光特性

● 第 75 回 CVD 研究会 2021 年 10 月 4 日 (オンライン)

宮田耕充: 遷移金属カルコゲナイド原子層の化学気相成長 (招待講演)

● IKOCS2021, 2021 年 12 月 12 日 (オンライン)

中西勇介: カタチから入るナノサイエンス (招待講演)

● ハイエントロピー機能性材料研究会 2022 年 3 月 2 日 (北大)

中西勇介: ナノ空間を用いた物質探索

● 第 62 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 3 月 2-4 日 (オンライン)

Shota Yamaguchi, Ryosuke Mizuno, Hiroyuki Mogi, Hong En Lim, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Kazuhiro Yanagi, Kosuke Nagashio, Shoji Yoshida, Hidemi Shigekawa, Yasumitsu Miyata: Electronic structure and transport properties of multilayer Nb-doped MoS₂

Ryoki Hashimoto, Yasuhiko Hayashi, Yasumitsu Miyata, Hiroo Suzuki: Size enhancement of monolayer WS₂ with sandwiched growth substrates

Seiya Kawasaki, Hiroto Ogura, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Kazuhiro Yanagi, Toshifumi Irisawa, Kosuke Nagashio, Yasumitsu Miyata: Electronic transport properties of multilayer MoS₂-based PN diodes

Shinpei Furusawa, Yohei Yomogida, Yuta Sato, Kazuhiro Yanagi, Kazu Suenaga, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata: Vapor-phase synthesis of single-walled MX₂ nanotubes templated on surfactant-dispersed boron-nitride nanotubes

Ryusuke Natsui, Hiroshi Shimizu, Zheng Liu, Iori Kikuchi, Jiang Pu, Taishi Takenobu, Hong En Lim, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata: Intercalation of group-XIII metals in crystalline bundles of WTe atomic wires

Hiroo Suzuki, Misaki Kishibuchi, Soya Ochiai, Zheng Liu, Yasumitsu Miyata, Yasuhiko Hayashi: Selective monolayer growth of WS₂ nanoribbons on W_xO_y nanowires

Masahiko Kaneda, Hong En Lim, Kazuki Hashimoto, Yusuke Nakanishi, Takahiko Endo, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Yasumitsu Miyata: Growth and anisotropic optical responses of MoS₂ nanoribbons

Hiroto Ogura, Seiya Kawasaki, Zheng Liu, Takahiko Endo, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Kazuhiro Yanagi, Toshifumi Irisawa, Keiji Ueno, Kosuke Nagashio, Yasumitsu Miyata: Fabrication and electronic transport properties of multilayer Nb_xMo_{1-x}S₂/MoS₂ in-plane heterostructures

Hao Ou, Jiang Pu, Tomoyuki Yamada, Naoki Wada, Hibiki Naito, Zheng Liu, Yasumitsu Miyata, Taishi Takenobu: Color-tunable light-emitting devices based on compositionally graded monolayer transition metal dichalcogenide alloys

● 日本物理学会第 77 回年次大会 2022 年 3 月 15-19 日 (岡山大学)

永井恒平, 内田健人, 草場哲, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 田中耕一郎: 単層 WSe₂ の高次高調波発生におけるインコヒーレントキャリアの影響

● 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 2022 年 3 月 22-26 日 (青山学院大学, オンライン)

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)

小倉宏斗, 川崎盛矢, 劉崢, 遠藤尚彦, 中西勇介, 林宏恩, 入沢寿史, 長汐晃輔, 宮田耕充: 多層 Nb_xMo_{1-x}S₂/MoS₂ 面内ヘテロ構造の作製と電子輸送特性

国際会議

● NT21 2021 年 6 月 6-11 日 (オンライン)

R. Hashimoto, L. Yijun, M. Kishibuchi, Y. Miyata, Y. Hayashi, H. Suzuki: Large crystal growth of MoS₂ by Vapor-solid-liquid method with stacked growth substrates

H. Suzuki, M. Kishibuchi, L. Zheng, Y. Miyata, Y. Hayashi: One-dimensional WS₂ growth from metal-salt by chemical vapor deposition

Y. Nakanishi, N. Kanda, M. Nagata, Z. Liu, H. Shinohara: Atomically Precise fabrication of 1D Transition Metal Chalcogenides Inside Nanotubes

● RPGR2021 2021 年 10 月 10-14 日 (オンライン)

Jiang Pu, Naoki Wada, Wenjin Zhang, Yuhei Takaguchi, Kazunari Matsuda, Yuhei Miyauchi, Yasumitsu Miyata, Taishi Takenobu: Chiral electroluminescence in monolayer lateral heterojunctions

Hiroto Ogura, Masahiko Kaneda, Yusuke Nakanishi, Yoshiyuki Nonoguchi, Jiang Pu, Mari Ohfuchi, Toshifumi Irisawa, Hong En Lim, Takahiko Endo, Kazuhiro Yanagi, Taishi Takenobu, Yasumitsu Miyata: Air-stable n-type doping of monolayer MoS₂ by crown-ether complexes

Hong En Lim, Yusuke Nakanishi, Zheng Liu, Jiang Pu, Mina Maruyama, Takahiko Endo, Chisato Ando, Hiroshi Shimizu, Kazuhiro Yanagi, Susumu Okada, Taishi Takenobu, Yasumitsu Miyata: Wafer-Scale Growth of 1D Transition Metal Telluride Atomic Wires

Hiroshi Shimizu, Jiang Pu, Zheng Liu, Hong En Lim, Yusuke Nakanishi, Takahiko Endo, Kazuhiro Yanagi, Taishi Takenobu, Yasumitsu Miyata: High mobility and 2D electron gas in aggregates of van der Waals WTe atomic wires

● The 5th Graphene Flagship EU-Japan Workshop on Graphene and related 2D Material 2021 年 10 月 25 日 (オンライン)

Yasumitsu Miyata: Creation of a 2D electronic system with 1D wired materials (Invited Talk)

● MNC2021 2021 年 10 月 26–29 日 (オンライン)

Hiroto Ogura, Masahiko Kaneda, Yusuke Nakanishi, Yoshiyuki Nonoguchi, Jiang Pu, Mari Ohfuchi, Toshifumi Irisawa, Hong En Lim, Takahiko Endo, Kazuhiro Yanagi, Taishi Takenobu, Yasumitsu Miyata: Air-stable, efficient n-type doping of MoS₂ by salt-crown ether treatment

Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi: Improved synthesis of WS₂ nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature

Wenyu Yuan, Kan Ueji, Takashi Yagi, Takahiko Endo, Hong En Lim, Yasumitsu Miyata, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Influence of Intercalation on the Thermal Conductance on Artificially Stacked MoS₂

● the 11th A3 Symposium on Emerging Materials 2021 年 12 月 14-16 日 (オンライン)

Yasumitsu Miyata: Growth and transport properties of transition metal chalcogenide atomic wires (Invited Talk)

編集後記

2021年度の年次報告の編集作業をしている間も、2月末から始まってしまったウクライナでの悲惨な状況が終結する兆候は全く見られず、多くの人が亡くなっていることに心を痛めている。ウクライナやロシアの研究者の何人かとも親しくしてもらっていた身としては、自身にできることのなさを痛感する日々である。都立大はといえば、コロナ以上に12月の8号館の火災は物理学科・専攻にもかなりの影響があり、特に実験系の研究室の研究活動の制限は許容範囲を完全に超えているように思う。21年度の卒研究生やM2の学生の方には発表会直前にこのようなゴタゴタがあり、教員の一人として大変申し訳なく思う。休日にPCが発火した場合でも今回と同じようなことになりかねないので、身近なところから気を引き締めないといけない。上手く回っている組織でも脆弱な部分を100%なくすことができないが、それを補う善意によるセーフティネットが幾重にもあることによって何とかなることもあるように思う。昨今の大学および大学教員のおかれた状況も影響したのか、それらも機能しなくなっているのかもしれない。

サイエンスに関しては、日本の研究の質・量だけが主要国の中で下がってきていることはこの10年ほど指摘され続けている。10兆円ファンドや、日本科学振興協会（JAAS）の設立など、何とかしようという話は出てきているが、選択と集中に対する行政と研究者の認識の違いは大きいようである。特に、研究費獲得に魂を抜かれたのか、捏造されたマヨラナ粒子の論文が完全にゴミ箱行きになったことは記憶に新しい。最近、その他にも色々と問題のある話が耳に入ってくるようになった印象がある。そこまで真っ黒でないにしても、結論ありきでお花畑シナリオ通りに解釈したがる人はどうにかならないものか。もう色々お腹一杯で嫌になることにも慣れてしまっただけは世も末である。

この春、3年間勤めた他大学の非常勤講師をやめたおかげで少し時間に余裕ができた気がしないわけでもないが、4月はいつも報告書や申請書、書類の審査等、結局研究する時間は皆無である。その一端を担っているのがこの年次報告の編集作業なわけなのだが、必要な業務に文句は言うまい。そのような心持ちでやっていると、案の定、連絡のし忘れでご迷惑をお掛けした方には平伏するしかなく、また、すでに連絡があった通り、これまでの年次報告のテンプレートファイルと本文の説明書きに不一致があることもご指摘頂いており、大変申し訳ない思いである。次年度からは更新され無矛盾のものになる予定なので、これ以上の不備がないことを祈るのみである。

(服部一匡 記)

2021年度 年次報告編集委員
青木勇二 (2021年度物理学教室主任)
服部一匡
石川久美