

研究室活動状況 2020 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

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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. 上の 1) 2) と重複するものもある. 国際会議での講演は, まとめて後に置かれている)
- 4) 科学研究費等報告書 (代表者が本教室の教員である課題のみ記載されている.) 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.) 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.)

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)

昨年度に引き続き、高エネルギー領域 ($10\text{TeV} \lesssim E \lesssim 1\text{PeV}$) でのニュートリノ振動の研究を行った。LSND 実験や原子炉ニュートリノ異常から示唆されているステライルニュートリノのシナリオを仮定し、質量二乗差が LSND 実験の値かそれ以上の値の領域の場合には、混合角が小さくても物質効果によりエネルギースペクトルに比較的大きなゆがみが見られることが知られている。一方、高エネルギー領域では、ニュートリノ-核子の断面積が大きくなり、ニュートリノのフラックスが減少する効果を考慮する必要がある。この研究では (3+1)-スキームと呼ばれるステライルニュートリノのシナリオにこれらの効果を取り入れてニュートリノ振動の確率を議論した。解析的な振動確率の表式は複雑になるが、物質効果による混合角の増大現象は吸収の効果とは独立となり、通常のアクティブニュートリノについては全体的に振動確率全体が減衰する振る舞いを示すことがわかった。アクティブニュートリノとステライルニュートリノの混合角がある場合、超高エネルギー領域 ($E \gtrsim 1\text{PeV}$) でアクティブニュートリノが地球を貫通する確率は、ステライルニュートリノとの混合のために、通常の場合に比べて指数関数的に大きくなる。したがって地球を貫通する超高エネルギーアクティブニュートリノの検出が原理的にはステライルニュートリノの兆候となるが、その事象数は将来の大型検出器でも観測できないほど小さいことがわかった。

2) 弦模型における互いに公転する D ブレーンの間に働く力 (北澤)

10 次元時空で定義される超弦理論の重要な構成要素として、 p 次元空間を占める物体である Dp ブレーンというものがある。2つの Dp ブレーンを平行かつ互いに静止した状態におくと、超対称性のために互いの間に力が働かない (力のポテンシャルはゼロになる)。これらが互いに平行にすれ違う運動をすると、超対称性が破れて、互いを引き止めるような力が働く。互いに引き止める力が十分に強い場合には、2つの Dp ブレーンによる束縛状態が成立する可能性がある。この可能性について、昨年度、特に $p = 3$ の場合について詳細に調べたが、束縛状態はできないことがわかった (ただし、複数のまとまった $D3$ ブレーンのかたまり同士が束縛状態を作る可能性は残されている)。今年度は、全ての可能な p の値について、互いに公転運動している時に働く力のポテンシャルを計算した。その結果、この Dp ブレーンの組についても、束縛状態ができないことがわかった。束縛状態の成立を期待した理由は、それによってゲージ対称性の自発的破れが起こると期待されるからであったが、その可能性はないことがわかった。しかし、このような力の情報は、まだ詳細に研究されていない Dp ブレーンの動力学の理解に寄与するものである。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯暁氏、須山孝夫氏および太田光氏との共同研究である。

3) 暗黒エネルギーの時間依存性と大きなスケールのゆらぎの偏極 (北澤)

ハッブル定数問題とは、標準的な距離の測定法によるタイプ Ia 型超新星の観測から導いたハッブル定数と、宇宙背景放射やバリオン音響振動というより宇宙の初期の現象の観測から宇宙標準模型を仮定して導いたハッブル定数の値が大きく異なる (4σ 以上) という問題である。この問題は宇宙標準模型 (我々の知っている物質と相互作用、冷たい暗黒物質、として適当な大きさの宇宙項で構成される) が正しくないことを示唆しているかもしれないと受け取られている。宇宙標準模型を超えるもののひとつとして、最近の宇宙の加速的膨張を担う暗黒エネルギーは宇宙項ではなく、時間に依存して変化する真空エネルギーである可能性がある。そこで、タイプ Ia 型超新星の観測データ (Pantheon sample) から時間に依存して変化する真空エネルギーの推定を行った。そしてその場合には宇宙背景放射の超波長成分の偏極へ

の予言が変更されるが、それが将来の高精度の観測（LiteBIRD など）で識別可能であるかどうかを調べた。その結果, cosmic variance によるエラーが大きすぎて, 宇宙標準模型の予言との違いを識別することは難しいことがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa, Hikaru Ohta and Takao Suyama, More on Effective Potentials for Revolving D-Branes, *JHEP* **2008** (2020) 137.

Osamu Yasuda, Neutrino Oscillations at low energy long baseline experiments in the presence of nonstandard interactions and parameter degeneracy, *PTEP* **2020** (2020) 063B03.

Monojit Ghosh and Osamu Yasuda, Testing NSI suggested by the solar neutrino tension in T2HKK and DUNE, *Mod.Phys.Lett. A* **35** (2020) 2050142.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2019 年秋季大会 2020 年 9 月 14 日 – 17 日 (オンライン)

安田修：非標準相互作用がある場合の低エネルギー長基線実験のニュートリノ振動とパラメーター縮退

国際会議

● The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2020), 22 June – 2 July 2020, online conference

O. Yasuda: Neutrino oscillations at low energy LBL experiments in the presence of NSI and parameter degeneracy (Poster)

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

The research activity of our Laboratory in the academic year 2020/2021 was mainly conducted in a single new direction combining theoretical studies of primordial black holes, dark matter and induced gravitational waves. The conducted research over the reported year was based on our earlier research achievements over the last five years in the theoretical model building of cosmological inflation based on supergravity theory.

1)

The main purpose of our research is a better understanding of cosmological inflation, Dark Matter and origin of the Large Scale Structure of the Universe, based on fundamental physics. The core of our research is based on the idea of Primordial Black Holes as seeds of the Large Scale Structure (and part of Dark Matter) after Starobinsky inflation in the early Universe. The key scientific problem is a theoretical description of primordial black hole formation and induced gravitational waves sourced by primordial fluctuations after inflation, in supergravity theory. Primordial black holes are also viewed as a probe of supergravity theory itself, and as a cosmic window into fundamental physics beyond the Standard Models of cosmology and elementary particles. The gravitational waves induced by primordial black holes may be observed by advanced LIGO-Virgo-KAGRA and LISA experiments in the future, and may be used for observational tests of primordial black holes and supergravity itself. Our theoretical models can be used for discrimination of phenomenological models of the early Universe cosmology, towards their ultra-violet completion in quantum gravity (superstring theory).

2)

We applied the modified supergravity approach to describe a formation of primordial black holes after Starobinsky inflation. Our approach naturally leads to the effective two-(scalar)-field attractor-type double inflation, whose first stage is driven by Starobinsky's scalaron and whose second stage is driven by another scalar field that belongs to the same supergravity multiplet. The scalar potential and the kinetic terms were derived, the vacua were studied, and the inflationary dynamics of those two scalars was investigated. We numerically computed the power spectra and found the ultra-slow-roll regime leading to a required enhancement (peak) in the scalar power spectrum. This was shown to lead to the efficient formation of primordial black holes. We estimated the masses of primordial black holes and found their density fraction as part of Dark Matter. Our modified supergravity models are in full agreement with inflationary observables and predict the masses of primordial black holes in the range between 10^{16} g and 10^{20} g. Modified supergravity theory provides the natural top-down approach for explaining and unifying Starobinsky inflation and the Dark Matter consisting of primordial black holes.

3)

We also explored the gravitational waves phenomenology of a simple class of our supergravity models that can explain and unify inflation and primordial black holes as Dark Matter. The primordial black holes formation in our supergravity models is efficient, is compatible with all observational

constraints, and predicts a stochastic background of gravitational waves. We computed the spectrum of gravitational waves (presumably) induced by those primordial black holes and showed that signals of those gravitational waves can be detected within the sensitivity curves of the future space-based gravitational interferometers such as LISA, DECIGO, TAIJI and TianQin projects, thus demonstrating the potentially high predictive power of supergravity in physics of gravitational waves, and their compatibility.

2. 研究業績

1) 論文

Y. Aldabergenov, A. Addazi, S.V. Ketov, Primordial black holes from modified supergravity, Eur. Phys. J. C 80 (2020), No. 10, 30 pages (査察済)

Y.Aldabergenov, A. Addazi, S.V. Ketov, Testing primordial black holes as dark matter in supergravity from gravitational waves, Phys. Lett. B 814 (2021), 136069, 6 pages (査察済)

2) 国際会議

● S .V. Ketov, Inflation, Primordial Black Holes, and Induced Gravitational Waves from Modified Supergravity, 1st Electronic Conference on Universe (online), 2021年2月, invited talk; in the electronic proceedings, <https://sciforum.net/paper/view/conference/9268>.

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、ハドロンを研究対象に、自然界の力のうちの1つ「強い相互作用」の織り成す物理現象について研究をしている。強い相互作用の基礎理論である量子色力学は、低エネルギー領域でカラーの閉じ込めが起き、基本自由度のクォーク・グルーオンは観測されず、300種以上のハドロンが多彩な動力学を示している。現代のハドロン物理では、世界中の実験施設から多くの新しいデータが供給され、従来の単純なクォーク模型による描像が破綻し、マルチクォークやハドロン分子など、新奇な構造を持ったハドロン状態が存在する可能性が盛んに議論されている。一方で、現在見つかったハドロンのうち、強い相互作用に対して安定な粒子はごく少数の基底状態のみに限られ、エキゾチック構造を持つと期待されるほとんどの粒子は、多ハドロン状態への崩壊に対して不安定な共鳴状態である。この点は現在でもしばしば軽視されているが、現実のハドロンの構造を理解するには散乱、共鳴など動力的な側面を考慮してハドロン構造を研究することが不可欠である。本研究室ではエキゾチックハドロンを散乱過程の共鳴状態として捉え、その構造の研究を通じて強い相互作用の非摂動的動力学を解明する。

s クォークは軽い u, d クォークと重い c, b クォークの中間の質量を持っており、 s クォークを含むハドロンは独特の役割をはたしている。近年では新規な手法を用いた精密実験とハドロン共鳴を体系的に記述する理論の整備によって、 s クォークを含むバリオン分光学に関し大きな進展があった。その結果、ストレンジバリオンの基本的な性質、固有状態の質量と崩壊幅に対応する極の位置、スピン・パリティ、崩壊分岐比などが精度良く決定された。これを受けて Particle Data Group のリストには $\Lambda(1380)$ や $\Omega(2012)$ などの新粒子が新たに記載されることとなり、多くの注目を集めている。このような分光学の進展に刺激され、ストレンジバリオンが単純な3クォーク状態を超えたエキゾチックな内部構造を持つ可能性の議論が活発化している。この現状をまとめた総説論文として、QCDの対称性と散乱理論と共鳴状態の基礎、およびハドロンのエキゾチックな内部構造の議論を解説した。特に、ストレンジバリオンの不安定粒子である性質、つまりハドロン散乱中の共鳴状態としての性質に焦点を当て、理論的な性質を解説した。いくつかのバリオン共鳴、 $\Lambda(1405)$, $\Lambda(1670)$, $\Xi(1620)$, $\Xi(1690)$, $\Omega(2012)$ について理論と実験の現状をまとめた。

エキゾチックハドロン候補についての研究はハドロン物理において重要なものである。ハドロンのエキゾチック構造にはクォークの励起状態やマルチクォーク状態、ハドロン分子状態などがあると考えられている。我々は、エキゾチックハドロンがハドロン分子状態をとるかどうかの判定法として、閾値近くのハドロンの複合性 X を決定できる弱束縛関係式 $a_0 = R\{2X/(1+X) + \mathcal{O}(R_{\text{typ}}/R)\}$ に注目した。ここで、 a_0 は散乱長、 R は固有状態の半径、 R_{typ} は相互作用の典型長さスケールである。弱束縛関係式をハドロンに応用した場合、複合性 X はハドロン分子状態の重みと解釈でき、これが1に近いほどハドロン分子状態をとる確率が大きくなる。また、ハドロン弱束縛関係式の誤差項は R_{typ} によって見積もられるので、ゼロレンジ極限 $R_{\text{typ}} \rightarrow 0$ において誤差項は0になると考えられる。しかし、パラメータを fine tuning したゼロレンジ極限において、弱束縛関係式 (1) が成り立たない模型があることがわかった。例として、非相対論的な場の理論の有効レンジ模型があげられる。そこで、我々はゼロレンジ極限でも弱束縛関係式が成り立つよう、 R_{typ} を再定義する形で誤差項を $R_{\text{typ}} = \max\{R_{\text{int}}, R_{\text{eff}}\}$, $R_{\text{eff}} = \max\{|r_e|, \dots\}$ と修正する。ここで、 R_{int} は今まで R_{typ} で定義されていた相互作用の典型長さスケール、 r_e は有効レンジである。また、 R_{eff} は有効レンジ展開に現れる散乱長 a_0 以外の長さスケールのうち、一番大きいものとして定義される。誤差項を修正した弱束縛関係式を具体的な模型に当てはめ、その妥当性を評価した。

2. 研究業績

1) 論文

P.A. Zyla, *et al.*, (Particle Data Group): "Review of Particle Physics", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2020** (2020) 083C01

兵藤哲雄: "共鳴状態の複合性で特徴づけるハドロン分子状態", 日本物理学会誌, **75** (2020) 478

2) 学会講演

● 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」スクール 2021 年 3 月 22~24 日 (オンライン)

兵藤哲雄: ハドロン分子状態の物理 (招待講演)

衣川友那, 兵藤哲雄: Weak-binding relation in the zero range limit

● 日本物理学会 第 76 回年次大会 2016 年 3 月 12~15 日 (オンライン)

衣川友那, 兵藤哲雄: ゼロレンジ極限での弱束縛関係式の改良

● 様々なフレーバー領域で探るクォーク・ハドロン多体系の分光と構造 2020 年 11 月 4~5 日 (東北大学電子光理学研究センター/オンライン)

兵藤哲雄: $\Lambda(1405)$ as a hadronic molecule (招待講演)

● 第 3 回・4 回クラスター階層領域研究会 2020 年 5 月 18,28 日 (オンライン)

兵藤哲雄: Size and structure of near-threshold states (招待講演)

国際会議

● THEIA-REIMEI Webseminar 2021 年 3 月 17 日 (Online)

Tetsuo Hyodo: $\Lambda(1405)$ and the antikaon-nucleon potential (Invited Talk)

● YITP international workshop on Hadron in Nucleus 2021 年 3 月 8~10 日 (YITP/Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Weak-binding relation in the zero range limit

● "Fundamental physics at the strangeness frontier at DAFNE" Workshop 2021 年 2 月 25~26 日 (INFN-LNF, Italy/Online)

Tetsuo Hyodo: $\Lambda(1405)$ and the antikaon-nucleon potential (Invited Talk)

● Workshop on "Physics of heavy-quark and exotic hadrons 2021" 2021 年 2 月 15~17 日 (J-PARC, Tokai/Online)

Tetsuo Hyodo: QCD and the strange hadron spectrum (Invited Talk)

● International school for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2020), 2020 年 12 月 2~5 日 (J-PARC, Tokai/Online)

Tomona Kinugawa, Tetsuo Hyodo: Weak-binding relation in the zero range limit

● 2020 KPS Fall meeting, 2020 年 11 月 5 日 (Online)

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

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。2020年度の研究室構成はスタッフ2名、大学院生2名である。

1) 高エネルギー天体現象と天体の進化

乱流と AGN による銀河団コアの非定常加熱 多くの銀河団コアのガスの冷却時間は宇宙年齢よりも短いにもかかわらず温度があまり下がっておらず、何らかの加熱源によりエネルギーが供給されているものと考えられている。一番有力な加熱源は銀河団中心に存在する活動銀河核 (AGN) であるが、周囲のガスに安定にエネルギーを受け渡すメカニズムがわかっていない。一方、以前より銀河団ガスに乱流があれば、渦を介して AGN が生成したエネルギーをコアのガスに伝えるだけではなく、熱浴であるコアの外部からもコアに熱が供給される可能性が指摘されていた。

しかし 2016 年のひとみ衛星の観測によると、少なくともペルセウス座銀河団についてはコアのガスの乱流速度はあまり大きくなく、定常的に必要なエネルギーを運搬できないことが指摘されている。そこで本研究ではコアが定常であるという仮定をせずに、ひとみで観測された程度の乱流が存在する銀河団コア中の AGN の振る舞いについて数値シミュレーションで調べた。乱流は AGN 起源ではなく、銀河団が成長する過程で発生するものと考えた。この計算の結果、AGN が間欠的にバーストすることがわかった。大部分の期間は AGN の活動は弱く、乱流がコアの外部から内部に向かって熱を運ぶことでコアを準定常状態を保つ。しかし放射冷却が乱流による加熱をやや上回るので、次第に冷却に伴う AGN へのガス流入量が増加し、最終的に AGN はバーストする。このとき AGN から大量のエネルギーが放出されるが、乱流が存在するためコア全体まんべんなく広がることができ、極端な熱的不安定は発生せずにコアは再び準定常状態に戻る。この AGN 加熱は放射冷却と定常的に釣り合う必要はないので fine-tuning は必要としない。もしこのモデルが正しければ、2021 年度打ち上げの XRISM 衛星により、ほぼすべての銀河団コアにペルセウス座銀河団と同程度の乱流が観測されるであろう。

中性鉄輝線、電離率、ガンマ線を使った宇宙線の分子雲への浸透の解明 低エネルギー ($\sim \text{MeV}$) 宇宙線は分子雲を部分電離し、分子雲中で起きている星・惑星形成に強い影響を与える一方、宇宙線加速過程の初期段階を反映している。しかしガンマ線観測、地球での直接観測ができないため、その分布やスペクトルがよくわかっていない。そこで X 線中性鉄輝線という近年注目されている新しい観測手段と、電波によるガスの電離率の観測、さらにはガンマ線の観測を組み合わせることで、低～高エネルギーの宇宙線の分子雲への浸透過程を調べることができることを示した。具体的には移流拡散方程式を用いて各エネルギーの宇宙線がどのくらい分子雲に浸透できるかを見積もり、分子雲が中性鉄輝線、電離率、ガンマ線でどのように観測されるかを予想した。これら3つの観測量は対応する宇宙線のエネルギーに違いがあり、そのため3つの観測量の空間分布からエネルギーごとの宇宙線の浸透度合いがわかる。分子雲の浸透には「拡散型」「free streaming 型」の2つのケースを考えた。これは宇宙線の浸透を妨げる分子雲中の磁場のゆらぎが宇宙線の浸透に伴い増幅されるか、分子雲中の中性ガス粒子により磁場のゆらぎが減衰するか、どちらの効果が優勢かよくわからないからである。モデル計算の結果、「拡散型」のときは中性鉄輝線は電離率が高い分子雲周辺領域で、「free streaming 型」のときはガンマ線強度が高い分子雲の中心部で観測されるべきであることがわかった。この結果を中性鉄輝線、電離率、ガンマ線の観測がある3つの超新星残骸付近の分子雲の観測と比較したが、観測の不定性もあり、現時点では「拡

散型」か「free streaming 型」か区別はできなかった。将来的には XRISM 衛星を使って区別することを目指す。

2) 高エネルギー天体の観測的研究

ALMA による静穏期のガンマ線連星 PSR B1259-63/LS 2883 の観測 PSR B1259-63/LS 2883 はパルサーが大質量星の周囲を公転する連星で、ガンマ線を放射する。ガンマ線はパルサーが近星点付近で大質量星の星周円盤と相互作用することで放射されと考えられている。我々は 2017 年に、チリの ALMA 電波望遠鏡によりミリ波/サブミリ波帯でこの連星を初めて検出した。この観測時にはパルサーは近星点通過直後で、ALMA バンド 3 ($\lambda = 3$ mm) の放射はパルサーと星周円盤の相互作用によるシンクロトロン放射、バンド 7 ($\lambda = 0.9$ mm) の放射は星周円盤からの放射と解釈できた。

本年度は 2019 年の ALMA の観測データを解析した。この観測時にはパルサーは遠星点付近にあり、星周円盤と相互作用はしていないと考えられる。この観測でもバンド 3, 7 の両方で放射を検出したが、前回の近星点付近の観測と比べると暗くなっていた。低周波数での他の電波観測と比較したところ、バンド 3 の放射はパルサーのパルス成分と考えると説明できることがわかった。また、このことはパルサーと星周円盤の相互作用によるシンクロトロン放射はこの観測時には十分暗くなっていたことを示す。バンド 7 の放射強度の低下は星周円盤の縮小による可能性がある。パルサーと星周円盤の相互作用により星周円盤が破壊される可能性は理論的に指摘されているが、今回の観測は相互作用の影響がなくなっているはずの遠星点付近で行われたので、星周円盤がパルサーと無関係に縮小した可能性がある。この自律的な星周円盤の変動は、連星の活動性がパルサーの近星点通過ごとに異なる理由かもしれない。イメージについても解析したが、点源と考えて矛盾しないことがわかった。そのため X 線で観測されている連星からの物質放出は、本観測では確認できなかった。

3) 銀河団の研究

銀河団及び中心銀河の形状 銀河団、及びその中心銀河の形状は、構造形成を考える上で貴重な情報をもたらしてくれると考えられている。39 の銀河団とその中心銀河について、重力レンズ効果の観測結果などを用いて、それぞれの形状を楕円で近似した。楕円率と、銀河団と中心銀河の間の軸の揃い具合を求め、我々のシミュレーションを用いた研究結果と比較した。その結果を用いて、ダークマターや銀河団の物理過程に関する制限を考察した。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Fujita, K. K. Nobukawa, H. Sano: "Intrusion MeV-TeV of Cosmic-Rays into Molecular Clouds Studied by Ionization, the Neutral Iron Line, and Gamma-Rays", *Astrophys. J.*, **908** (2021) 136

Y. Fujita, H. Nagai, T. Akahori, A. Kawachi, A. T. Okazaki: "ALMA Observations of PSR B1259-63/LS 2883 in an Inactive Period: Variable Circumstellar Disk?", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **72** (2020) L9

Y. Fujita, R. Cen, I. Zhuravleva: "Non-steady heating of cool cores of galaxy clusters by ubiquitous turbulence and AGN", *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, **494** (2020) 5507-5519

T. Okabe, M. Oguri, S. Peirani, Y. Suto, Y. Dubois, C. Pichon, T. Kitayama, S. Sasaki, T. Nishimichi: "Shapes and alignments of dark matter haloes and their brightest cluster galaxies in 39 strong lensing clusters", *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, **496** (2020) 2591-2604

2) 学会講演

● 低エネルギー宇宙線 Workshop 2021 2021 年 3 月 24～25 日（オンライン）

藤田裕, 信川久実子, 佐野栄俊: 電離率, 中性鉄輝線, ガンマ線を使った宇宙線の分子雲への浸透の解明 (招待講演)

● 日本天文学会 2021 年春季年会 2021 年 2 月 16～19 日（オンライン）

藤田裕, 信川久実子, 佐野栄俊: 電離率, 中性鉄輝線, ガンマ線を使った宇宙線の分子雲への浸透の解明

藤田裕: XRISM による超新星残骸, 銀河団の観測 (招待講演)

● 第 33 回理論懇シンポジウム 2020 年 12 月 23～25 日（オンライン）

藤田裕, 信川久実子, 佐野栄俊: 電離率, 中性鉄輝線, ガンマ線を使った宇宙線の分子雲への浸透の解明

● 高エネルギー宇宙物理学研究会 2020 2020 年 12 月 14～17 日（オンライン）

藤田裕, 信川久実子, 佐野栄俊: 電離率, 中性鉄輝線, ガンマ線を使った宇宙線の分子雲への浸透の解明

● 日本天文学会 2020 年秋季年会 2020 年 9 月 8～10 日（オンライン）

藤田裕, 永井洋, 赤堀卓也, 河内明子, 岡崎敦男: ALMA による静穏期のガンマ線連星 PSR B1259-63/LS 2883 の観測

国際会議

● Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspective 2020 年 12 月 7-10 日（オンライン）

Y. Fujita, K. K. Nobukawa, H. Sano: Intrusion of Cosmic-Rays into Molecular Clouds Studied by Ionization, the Neutral Iron Line, and Gamma-Rays

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 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ている。今年度は、すでに開発済みの複素安定多様体を計算する数値コードを用いることより、トンネル効果に寄与の大きい複素安定多様体の特性を探った。半古典プロパゲータに寄与する複素軌道は、その軌道に沿った作用の虚部が小さい必要があるが、軌道の初期位置のもつ虚部の大きさの小さい軌道が小さい作用虚部を与える傾向があることが明らかになったが、さらに、それらの軌道は複素安定多様体の沿って単調に実面に接近するわけではなく、一旦、複素空間の深い領域を経由したのち、実面に接近する振る舞いを示すことがわかった。このことは、複素領域のカオスがトンネル効果に効いている可能性を示唆するもので、今後のさらなる解析が望まれる。

2) 近可積分系におけるトンネルテールの高精度計算

系が非可積分になるとトンネル確率の異常増大が見られる。場合によっては数桁から数十桁に及ぶこともあり、実験的な検証も待たれるところでもあるが、一方で、その異常増大の起源は未だ十分な理解がなされているわけではない。ここでは、可積分系にわずかな摂動が入った近可積分系のトンネルテールを任意精度計算を実行することにより詳細に調べた。対象とした系は可積分系に極めて微弱な摂動を加えたもので、古典位相空間内には、非線形共鳴による、いわゆる安定島構造がほとんど現れないため、いわゆる Resonance-assisted tunneling(RAT) 機構を排除した設定になっている。それにも関わらず、トンネルテールには階段状の構造が時間と共に次々に出現し、可積分系のトンネルテールには現れ得ない、トンネル領域で波の干渉が発生することがわかった。ジュリア集合を背景にした多数の複素軌道間の干渉によるものと思われるが、その作業仮説の検証を現在はじめつつある。

3) ローレンツガスにおけるガラス形成系的スローダイナミクス

過冷却状態にある液体がガラスになる際、僅かな温度変化や密度変化で粘性が急増する。ガラス系が示す粘性の急増現象の背景には過冷却液体を構成する分子のスローダイナミクスがある。ここでは、一体のローレンツガスの動力学を詳細に調べることにより、ガラスが示すスローダイナミクスのうち、系の多体性を起源とする振る舞いの特定を試み、以下の結果を得た。(a) ケージ効果によって粒子の拡散を表す平均二乗変位に見られるプラトーは一体問題でも再現可能である。(b) 自己中間散乱関数などにみられる α 緩和に関しては、2次元の一体ローレンツガスにおいては伸張指数関数の指数が1になり、多体ガラスの振る舞いを再現することはないが、運動領域が複数種類現れる3次元一体ローレンツガスにおいては指数が1より小さい伸張指数関数が現れ、多体ガラスの振る舞いを再現可能である。(c) いわゆる fragile 液体に見られる。温度変化、密度変化に対する粘性の急増は、Vogel-Fulcher 則によって特徴付けられることが知られているが、一体ローレンツガスにおいても、質点が運動する空間の次元を大きくすることにより、過渡領域として Vogel-Fulcher 則が現れることを発見した。また、力学系理論に基づくその具体的表式を導出した。

4) 強いカオス系における escape rate

一様双曲系など強いカオスを示す系の位相空間に微少脱出口を開け軌道の脱出率を測ると、強いカオス性によりその脱出率は脱出口の面積の大きさに比例したものになる。それに対して、近年、系の短い周期軌道の存在がその脱出率に有意な補正を与えることが簡単な toy model を用いて示された。ここでは、より一般の強いカオス系においても同様の性質をもち、toy model に対して導出された脱出率に対する公式が成立するか検討を行った。用いた系は、トーラス上の群同型（通称、アーノルドの猫写像）に摂動を加えたもので、摂動強度が大きい範囲で一様双曲性が成り立つ系であるが、より一般的な系での脱出率の公式は、toy model に対して数学者によって導出されたものを修正する必要があることがわかり、また、修正された公式のもとでは、系の短い周期軌道が脱出率に有意な影響を与えていることが明らかになった。さらに、系にランダムな摂動が加わった場合に脱出率に対する考察も行った。

5) 新規な量子ホロノミーの量子古典対応に向けて

これまで量子系で調べられてきた新奇な量子ホロノミーについて、その古典対応物を模索している。新奇な量子ホロノミーとは、定常状態にある量子系が断熱サイクルによって最初のものとは異なる定常状態に移行することである。近年、新奇な量子ホロノミーの具体例が数多く見いだされ、その数理的な背景として既存の幾何学的位相の枠組みの拡張が得られた。一方で、新奇な量子ホロノミーの多くは単純な量子古典対応を許さない。このため、以前は新奇な量子ホロノミーの古典対応物を論じることが可能か否かすら不明瞭であった。これまで、古典的な連成振動について基準振動のアンホロノミーが存在することが数値解析から示されていた。本年度は、この現象を理論的に解析した。線形系という特殊な状況のため、古典系のアンホロノミーを量子系でのアンホロノミーとして論じることが可能となった。また、断熱接続の概念を広く再考察することで、断熱保存量である古典作用が保存しつつもそのアンホロノミーが発現する機構が明らかになった。この結果から、新奇な量子ホロノミーの新しい例がただちに得られる。これは、量子場での例を含むものであり興味深い。一方、この議論では線型な古典系を扱うことが技術的に極めて重要であった。非線形な古典系での例を示すことは重要な課題として残されている。

2. 研究業績

1) 論文

Naoaki Shimada and Akira Shudo: Numerical verification of the exact WKB formula for the generalized Landau-Zener-Stueckelberg problem, *Phys. Rev. A*, **12** (2020) 022213 (25 pages).

Yutaka Okabe and Akira Shudo: A Mathematical Model of Epidemics—A Tutorial for Students, *Mathematics*, **8** (2020) 1174 (16 pages).

Atushi Tanaka, Takaaki Nakamura and Taksu Cheon: Generating a nonequilibrium stationary state from a ground-state condensate through an almost adiabatic cycle, *Phys. Rev. A*, **102** (2020) 013308.

2) 学会講演

● 日本物理学会 秋季大会 2020 年 9 月 8 日-11 日（オンライン開催）

中原祥博，首藤啓：ガラス形成液体におけるスローダイナミクスの力学系的アプローチ

● 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12 日-15 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半古典論と複素安定多様体 III

中原祥博, 首藤啓: ガラス形成液体におけるスローダイナミクスの力学系的アプローチ II

田中篤司, 今田寛明: バネ質点系での断熱サイクルによる作用交換

国内研究会

● Mathematical Science of Complex Systems: Physics, Chemistry, Biology, Information and Chaos, March 27-28, 2021 (Nara Women's Univ.) (オンライン開催)

Akira Shudo: Existence of infinitely many stability islands in a piecewise linear map (invited)

● KEK 連携コロキウム 2021 年 3 月 29 日-31 日 (オンライン開催)

首藤啓: 非可積分系のトンネル効果と複素力学系 (招待講演)

3) 著書等

首藤 啓: レベルダイナミクスと非可積分系のトンネル効果 『数理科学』 (2020) 5 月号 54-59.

岡部 豊, 首藤 啓: 感染症伝搬の数理モデル 『数理科学』 (2020) 10 月号 74-81.

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 半教師あり学習を用いたシュレディンガー方程式 Solver の開発

ハミルトニアンが非摂動項と摂動項をもつ系に対して、そのシュレディンガー方程式を効率的に解く手法を開発した。非摂動項の解が理論的もしくは数値的に解ける系に注目し、摂動による波動関数と固有エネルギーの残差を機械学習により予測した。調和振動子のポテンシャルを非摂動項とした系に対して本手法を適用することで、その有効性を確かめた。[森]

2) 深層生成モデルを用いたスピン状態の超解像

Li と Wang の深層生成モデルによるスピン状態の生成法では、対象となる系のハミルト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。この手法を拡張し、スピン状態の超解像を実現した。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ことから、先行研究に比べ、より大きな格子サイズのスピン状態を効率的に生成することが可能となった。[森]

3) イジングスピン系の機械学習解析における入力データの新しい準備法

イジングスピン系の相転移現象をニューラルネットワークの技法を使って解析する際、入力データとして用意するスピン配列画像を従来のように1スピン=1ピクセルと表現せずに、1スピンを丸や四角などの有限の大きさの形で表現することで、異なるサイズのスピン配列を同じ大きさの画像に表すことを提案した。これにより、異なるサイズのスピン配列を同じ入力ユニット数のニューラルネットワークで解析でき、計算時間の高速化が図れることを示した。[森]

4) 有限温度におけるスピン軌道相互作用がある Bose 原子気体のダイポール振動の Landau 減衰率

近年、ラマン散乱過程を用いることにより、極低温原子気体においてスピン軌道相互作用 (SOC) を持つ系の作成に成功した。SOC をもつ冷却原子系の実験は数多いが、一番初歩的であるダイポール振動のダイナミクスを追った実験が再注目されつつある。Landau 減衰は凝縮体（超流動）の集団振動が非凝縮体との結合を介し減衰する現象であるが、Bose 原子気体超流動のダイポール振動における励起状態と Landau 減衰の減衰率について SOC の効果について明らかにした。[荒畑]

5) オフクリティカルな系の相関関数に対する離散的対称性をもつ普遍式の構成

二次元格子上に定義された古典模型がオフクリティカルな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} 対称性を持つ場合の Fujimoto-Otsuka による解析を三角格子の C_{6v} 対称性に拡張した場合の相関関数の漸近形の表式を導いた。非常に一般的な条件の下で相関関数のミニマルな表式（厳密解との比較から高温相に対応）は振幅およびモジュラーパラメタの二つの未知数しか含めないことを結論した。これは正方格子の場合の三つの未知数を含む普遍式と異なっており、 C_{4v} に比べ C_{6v} 対称性が要求する条件が強い為、正方格子の場合に許されていた変形パラメタが存在しないことが明らかとなった。得られた普遍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た。その結果、同表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。関連する論文を準備中である。[大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

Masafumi Fujimoto and Hiromi Otsuka: “Asymptotic correlation functions in the Q-state Potts model: A universal form for point group C_{4v} ”, Phys. Rev. E **102**, 032141 (2020).

Y. Tomita, K. Shiina, Y. Okabe, and H. K. Lee: “Machine learning study using improved correlation configuration and application to quantum Monte Carlo simulation”, Phys. Rev. E **102**, 021302(R) (2020).

2) 和書

森弘之（翻訳）：「デモクリトスと量子計算」森北出版（2020年9月）

3) 学会講演

●日本物理学会 2020 年秋季大会, 2019 年 9 月 8 日-11 日 オンライン開催

椎名拳太, Lee Hwee Kuan, 森弘之: Flow-based model による古典スピン系の解析

藤本雅文, 大塚博巳: 三角・蜂の巢格子ポッツ模型における Inversion 関係式

●日本物理学会 第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12 日-15 日 オンライン開催

伊藤義士, 吉見一慶, 二国徹郎, 荒畑恵美子: シミュレーションデータを教師とした機械学習による Bose 原子気体超流動の温度推定

椎名拳太, Lee Hwee Kuan, 森弘之: Flow-based model を用いたスピン状態の超解像

坂本晟学, 森弘之: 機械学習による 2 次元古典スピン系相転移現象の数値解析 国内研究会

●ISSP ワークショップ「物性科学におけるデータ科学の今と未来」2021 年 2 月 22 日, 24 日 オンライン開催

伊藤義士, 吉見一慶, 二国徹郎, 荒畑恵美子: シミュレーションデータを教師とした機械学習による Bose 原子気体超流動の温度推定

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。2020年度の研究室構成は、常勤教員2名、連携客員教授1名、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、2020年度に行った主な研究の概要である。

1) 面心立方格子におけるトリプル Q 四極子秩序

結晶を冷却すると多くの場合、さまざまな秩序相が現れる。これらの相転移を担っているのは、結晶を構成する原子、電子、もしくはそれらの複合体であったりする。真空中の電子は基本的に電荷と磁気双極子モーメント（スピン）の自由度しか持たないが、固体結晶中では軌道自由度、より一般に多極子自由度をもつ。これらは、物質の性質を決める重要な要素として長年にわたり研究がなされてきた。本研究では、面心立方格子上における Γ_3 四極子秩序について、従来知られていなかった図のようなトリプル Q 秩序が異方的な四極子間相互作用を適切に扱うことで広い範囲で実現することを理論的に示した。本研究で解析された面心立方構造をもつ Pr 系物質としては、 PrMgNi_4 などがみついている。非クラマース二重項の秩序についての理論的研究は最近始まったばかりであり、実験研究者にとっては基本的な知見が少ないことが問題になっていたが、本研究による基礎的な理論を出発点として利用することで、今後の実験的研究により四極子秩序の詳細が明らかにされることが期待される。

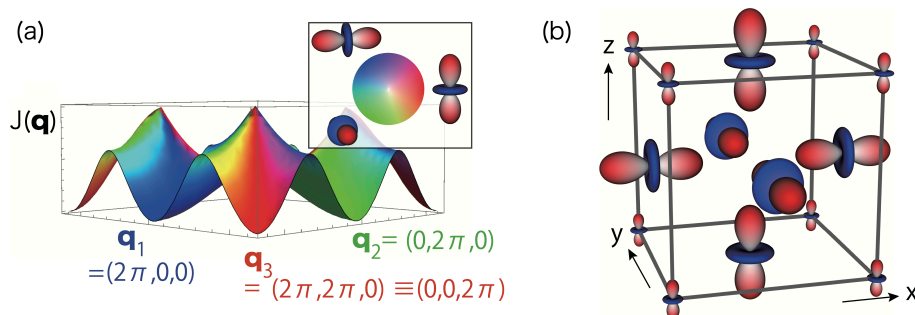


図 1: (a) 波数空間 $\mathbf{q}$ における交換相互作用とその固有状態の軌道。 (b) 面心立方格子上でのトリプル Q 四極子秩序の例。

2) 2 チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の間に現れる量子臨界点

Γ_7 と Γ_8 の3本の伝導電子バンドと混成する7軌道不純物アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、2チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の間の量子臨界点の出現について考察した。ここで考えるモデルは、局在 f 電子項、伝導電子項、混成項から構成されるが、このうち、局在 f 電子項は、クーロン相互作用項、スピン・軌道結合項、結晶場ポテンシャル項から成る。伝導電子項は、 Γ_7 と Γ_8 の3本の伝導電子バンドから成り、バンド幅の半分をエネルギー単位とする。局在 f 電子と伝導電子の混成は、同じ対称性をもつ軌道間でのみ生じるとし、混成の強さは Γ_7 と Γ_8 で等しいと仮定した。

局所 f 電子数 $n = 2$ の Pr^{3+} イオンの場合、局所基底状態は Γ_1 一重項、 Γ_3 二重項、 Γ_5 三重項の3種類であるが、適当な大きさの伝導電子との混成を考えると、 Γ_3 二重項の領域において、 $0.5 \log 2$ の残留エントロピーで特徴づけられる、四極子自由度由来の非磁性の2チャンネル近藤状態が現れる。一方、 Γ_1 の領域とその近傍では結晶場一重項状態が、 Γ_5 の領域とその近傍では近藤一重項状態が現れ、これら

はともにフェルミ液体状態である。まず、結晶場パラメータを変えることにより、 Γ_1 の結晶場一重項状態から Γ_5 の近藤一重項状態に基底状態を変化させるとき、先行研究でよく知られているように、その狭間に $0.5 \log 2$ の残留エントロピーで特徴づけられる量子臨界点が現れることを確認した。次に、 Γ_3 の領域から Γ_1 の領域に、あるいは Γ_3 の領域から Γ_5 の領域に局所基底状態を変化させると、いずれの場合も、 $\phi = (\sqrt{5} + 1)/2$ として、 $\log \phi$ という残留エントロピーをもつ量子臨界点が現れることを見出した。同様の結果は、結晶場パラメータを固定して混成の大きさを変えたときにも得られた。さらに、 $n = 3$ の Nd^{3+} イオンの場合、 Γ_6 二重項の局所基底状態の領域に現れる磁気的な 2 チャンネル近藤状態の近傍でも、 $\log \phi$ の残留エントロピーをもつ状態を見出した。以上のことから、2 チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の間に、 $\log \phi$ の残留エントロピーで特徴づけられる量子臨界点が現れると考えられる。

3) BiS_2 系層状超伝導体における一軸性圧力効果

BiS_2 系層状超伝導体の母物質の一つである LaOBiS_2 は、 BiS_2 伝導層と LaO ブロック層が交互に積み重なってできた半導体であるが、O を F に置換することで BiS_2 層に電子がドーピングされ、超伝導が発現する。このような層状構造は、高い超伝導転移温度 T_c が発見されている銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体に共通に見られる特徴であり、 BiS_2 系層状超伝導体のさらなる T_c の上昇に興味を持たれているが、 BiS_2 系層状超伝導体の超伝導発現機構についてはまだ完全には解明されておらず、スピン揺らぎ機構とフォノン機構の間で議論が続いている。

この系の超伝導機構解明の糸口として、 BiS_2 面内の四回対称性を壊すような一軸性圧力の T_c に対する効果を考察した。ここでは、圧力によって Bi の $6p_x$ と $6p_y$ 軌道の縮退が解けると考え、スピン揺らぎ機構の場合は 2 次元 2 軌道ハバードモデルに基づいて、フォノン機構の場合はブリーディングフォノンによる引力相互作用を考慮した 2 軌道モデルに基づいて、超伝導ギャップ方程式を数値的に解き、2 つの機構に対してそれぞれ、軌道分裂効果による T_c への影響を考察した。その結果、スピン揺らぎ機構の場合、圧力印加の方向による違いはあるものの、軌道分裂が生じると T_c が上昇することを見出した。一方、フォノン機構の場合では、引力相互作用の違いにもよるが、軌道分裂によって T_c が減少する、あるいは、わずかに上昇することを明らかにし、フェルミ面構造、状態密度、有効相互作用の変化などに基づいて、これらの結果を解釈した。本研究で想定した一軸圧を実際に BiS_2 系層状超伝導体に印加するのは難しいと思われるが、結晶構造の変化による T_c の違いや超伝導発現機構の変化を軌道分裂効果によって理解できる可能性があり、 BiS_2 系層状超伝導体の今後の研究に貢献することが期待される。

2. 研究業績

1) 論文

T. Hotta, “Quantum Critical Point between Two-Channel Kondo and Fermi-Liquid Phases”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 114706 (2020).

谷口貴紀, 服部一匡, 橘高俊一郎, 瀧川仁, “ $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ における強四極子秩序変数の磁場によるスイッチング”, 固体物理 **55**, 245 (2020).

H. Tsunetsugu, T. Ishitobi, and K. Hattori, “Quadrupolar Orders on the fcc Lattice”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 043701 (2021).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 年 9 月 8 日 (火) – 11 日 (金) (オンライン開催)

堀田貴嗣：2 チャンネル近藤状態、結晶場一重項状態及び近藤一重項状態の間の量子臨界点

堀川亮, 堀田貴嗣: BiS₂ 系層状超伝導体の超伝導転移温度に対する軌道分裂の効果

● 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12 日 (金) – 15 日 (月) (オンライン開催)

石飛尊之, 服部一匡: 非磁性 cubic 項に誘起される新奇多極子秩序相

● 京都大学基礎物理学研究所研究会 「高温超伝導・非従来型超伝導研究の最前線:多様性と普遍性」 2020 年 10 月 26 日 (月) – 28 日 (水) 湯川記念館パナソニック国際交流ホール + オンライン

服部一匡: 一次元異方的近藤格子模型における超伝導相関

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や二重ベータ崩壊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。蓄積されたビームデータを用いて、ARICH 検出器のアライメントをすすめており、本年度は、光検出器 HAPD のアライメントを進めた。また、光検出器 HAPD に対するシリカエアロゲルの相対的な位置のずれも粒子識別性能に影響する。そのため、ビームデータを用いたシリカエアロゲ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 検出器の運用と並行して、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、昨年度、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) の開発も並行して進めている。本年度は ASIC の最初の試作を行い、その性能評価を進めた。

2) 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。本年度は、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を進め、量産に向けた最終的なデザインを決定した。

3) 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。本年度は昨年度に引き続いて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、福島第一原発の建屋内に設置して原子炉を観測するために開発した小型の検出器について、高い環境放射線の元でも安定にデータ収集が出来るようにソフトウェアの改良を行い、原子炉の観測の要請があった場合に迅速に対応できるよう準備を進めた。

4) 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) を行う計画である。

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いるが、実験中の温度変化によって、素材の膨張率の違いにより、電気接点が剥がれることが懸念されている。2020 年度は、接点が剥がれにくい構造にするための素材や接着剤塗布パターンの改良について、有限要素法を用いたシミュレーションによって検討を行った。

2. 研究業績

1) 論文

S. X. Li *et al.* (Belle Collab.), “Measurements of the branching fractions of $\Lambda_c^+ \rightarrow p\eta$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^0$ decays at Belle,” *Phys. Rev. D* **103**, no.7, 072004 (2021)

S. Mohanty *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of branching fraction and search for CP violation in $B \rightarrow \phi\phi K$,” *Phys. Rev. D* **103**, no.5, 052013 (2021)

S. H. Park *et al.* (Belle Collab.), “Search for the dark photon in $B^0 \rightarrow A'A'$, $A' \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$, and $\pi^+\pi^-$ decays at Belle,” *JHEP* **04**, 191 (2021)

K. H. Kang *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of time-dependent CP violation parameters in $B^0 \rightarrow K_0^S K_0^S K_0^S$ decays at Belle,” *Phys. Rev. D* **103**, no.3, 032003 (2021)

D. Sahoo *et al.* (Belle Collab.), “Search for lepton-number- and baryon-number-violating tau decays at Belle,” *Phys. Rev. D* **102**, 111101 (2020)

- J. Yelton *et al.* (Belle Collab.), “Study of electromagnetic decays of orbitally excited Ξ_c baryons,” Phys. Rev. D **102**, no.7, 071103 (2020)
- Y. Li *et al.* (Belle Collab.), “Search for a doubly-charged DDK bound state in $\Upsilon(1S, 2S)$ inclusive decays and via direct production in e^+e^- collisions at $\sqrt{s} = 10.520, 10.580, \text{ and } 10.867$ GeV,” Phys. Rev. D **102**, no.11, 112001 (2020)
- J. Y. Lee *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of branching fractions of $\Lambda_c^+ \rightarrow \eta\Lambda\pi^+, \eta\Sigma^0\pi^+, \Lambda(1670)\pi^+$, and $\eta\Sigma(1385)^+$,” Phys. Rev. D **103**, no.5, 052005 (2021)
- Y. Teramoto *et al.* (Belle Collab.), “Evidence for $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ Produced in Single-Tag Two-Photon Interactions,” Phys. Rev. Lett. **126**, no.12, 122001 (2021)
- Y. Ku *et al.* (Belle Collab.), “Search for B^0 decays to invisible final states ($+\gamma$) at Belle,” Phys. Rev. D **102**, no.1, 012003 (2020)
- S. Jia *et al.* (Belle Collab.), “Evidence for a vector charmoniumlike state in $e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_{s2}^*(2573)^- + c.c.$,” Phys. Rev. D **101**, no.9, 091101 (2020)
- F. Abudinén *et al.* (Belle-II Collab.), “Search for Axion-Like Particles produced in e^+e^- collisions at Belle II,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.16, 161806 (2020)
- M. Yonenaga, I. Adachi, L. Burmistrov, F. Le Diberder, T. Iijima, S. Iwata, S. Kakimoto, H. Kakuno, G. Karyan and H. Kawai, *et al.* “Performance evaluation of the aerogel RICH counter for the Belle II spectrometer using early beam collision data,” PTEP **2020**, no.9, 093H01 (2020)
- K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.13×10^{21} protons on target,” Phys. Rev. D **103**, no.1, L011101 (2021)
- K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Measurements of $\bar{\nu}_\mu$ and $\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$ charged-current cross-sections without detected pions nor protons on water and hydrocarbon at mean antineutrino energy of 0.86 GeV,” PTEP **2021**, no.4, 043C01 (2021)
- K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K,” Phys. Rev. D **101**, no.11, 112004 (2020)
- H. Fujii, K. Hara, S. Hashimoto, K. Hayashi, H. Kakuno, H. Kodama, G. Meiki, M. Mizokami, S. Mizokami and K. Nagamine, *et al.* “Investigation of the Status of Unit 2 Nuclear Reactor of the Fukushima Daiichi by the Cosmic Muon Radiography,” PTEP **2021**, no.2, 023C01 (2021)

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12～15 日（オンライン）

T2K 実験の改良型前置検出器における多チャンネル光検出器のための導光板を用いたリアルタイム校正装置の開発

在原拓司, 角野秀一, 他 T2K Collaboration

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

昨年度まで 30 年以上の長きに渡って共同研究を行ってきた化学専攻・反応物理化学研究室内の城丸春夫教授が 2020 年 3 月に定年退職されたが、引き続き非常勤講師として都立大に籍を置いていることもあり、アドバイザー的な立場での協力を仰いでいる。後任として着任された歸家令果教授は、レーザーと電子線を組み合わせた分子標的の散乱実験を専門としており、直ちに直接的な共同研究には踏み出せないものの、原子・分子レベルでの議論ができることから定期的なミーティングを行って、情報共有から始めることになった。一方で、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とは強固な共同研究体制を維持しつつ、研究室の独自性を保った研究とのバランスを取りながら、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。新型コロナウイルス感染症によるパンデミックの影響で、研究活動に強い制約が課され成果を出すことが難しかった上に、国際会議が軒並み延期となり、学会発表の機会が大幅に失われたが、ウイルスの正しい恐れ方を知ることによって、徐々に研究活動を以前のレベルに戻そうとしている。来年度の飛躍には期待ができる。

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) 炭素クラスター負イオン：

本研究室では、レーザーアブレーション法によって生成した高温の直鎖状炭素クラスター負イオンの冷却過程について、系統的な研究を行ってきた。電子親和力より高い内部エネルギーを持った負イオンは電子脱離を起こし、また、振動状態の遷移に伴う赤外線放出によって冷却される振動輻射冷却は広い内部エネルギー領域において主要な冷却機構である。近年、これに加えて、電子基底状態の高振動励起状態から逆内部転換によって電子励起状態に遷移し、そこから蛍光を放出することで冷却が高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_8^- の冷却速度を測定する実験を開始した。

(2) 炭素クラスター正イオン：

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正イオンの冷却過程についても系統的な研究を行っている。正イオンは負イオンと異なり電子脱離過程により中性化しないため、静電型イオン蓄積リングでは、解離により生成された中性フラグメントを検出する。本研究では、 $C_n^+(n=3-21)$ の炭素クラスター正イオンの中性粒子強度の減衰曲線を系統的に測定し、その冷却過程の反応速度定数が 4 ステップごとに極大値となることが明らかとなった。

(3) 多環芳香族炭化水素負イオン：

星間空間からの赤外放射スペクトルには多くの未同定ラインが存在する。その特徴が多環芳香族炭化水

素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) の振動スペクトルと一致しているため、有力な候補と考えられている。孤立した PAH の性質に関する情報の一つとして、PAH 負イオンの冷却過程の観測を行った。具体的にはペンタセン ($C_{22}H_{14}$) の微結晶粉末にアブレーション用レーザーを照射することで負イオンを生成させて周回蓄積し、自動電子脱離によって生成した中性粒子強度の時間変化およびレーザー照射による中性粒子収量を測定した。昨年度から始めたペンタセン実験はすでにデータを取り終え解析したところ、その冷却過程が従来と異なっていることが明らかになった。量子化学計算を用いてペンタセン負イオンの電離脱離や輻射冷却の反応速度定数を計算し、中性粒子強度の減衰曲線を理論計算した。得られた結果は実験結果をよく再現しており、ペンタセン負イオンの冷却過程明らかにした。

(4) 二原子分子負イオンの遅延電子脱離過程：

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カップリング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い。昨年度から、 Si_2^- の実験を TMU E-ring を用いて開始し始めた。周回蓄積された Si_2^- にレーザー光を照射し、光電子脱離により中性化した Si_2 をリングの半周ごとに置かれた 2 つの検出器を用いて検出した。イオン蓄積リングにより等核二原子分子である Si_2^- の速い電子脱離と遅延電子脱離を時間的に分離し、10 μs オーダーの遅延電子脱離過程の観測に成功した。さらに波長可変 OPO レーザーを用いて励起波長を掃引することで Si_2^- の振動・回転励起スペクトルを測定した。 Si_2^- は基底状態である $X^2\Sigma_g^+$ 状態のわずかに 200 cm^{-1} 上に $A^2\Pi_u$ 状態が存在しており、この $A^2\Pi_u$ 状態から中性基底状態の $^3\Sigma_g^-$ へは許容遷移である。このため、励起直後に観測された即発信号は $A^2\Pi_u \rightarrow ^3\Sigma_g^-$ の遷移による速い電子脱離過程である。一方で、半周後に観測された遅延信号は $X^2\Sigma_g^+ \rightarrow B^2\Sigma_u^+$ 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である。この結果から、中間状態として $A^2\Pi_u$ が関与する Si_2^- の遅延電子脱離過程の機構を明らかにした。

(5) 二原子分子負イオンの振動緩和過程：

C_2^- や Si_2^- には、電子基底状態 X のすぐ上に電子励起状態 A が存在している。等核二原子分子は双極子禁制のため振動脱励起による赤外線放出は不活性だが、この A 状態と X 状態の電子脱励起過程により振動緩和を起こすことが可能である。この振動緩和の平均寿命に関して、報告された理論値と実験値の平均寿命に相違があり、これらを明らかにするために研究を開始した。TMU E-ring に蓄積された C_2^- とレーザー光を合流させ、 C_2^- の分光スペクトルを測定し、 C_2^- の振動・回転準位を選別可能とした。次にこの分光スペクトルを用いて、特定の振動・回転準位を選別し、 C_2^- の各振動準位の平均寿命を測定した。得られた結果は理論値をよく再現しており、理論が正しいことが証明された。

2) 多価イオンの電荷移行反応

中性原子から複数の電子を剥ぎ取ることで生成される多価イオンは、高い内部エネルギーを有するために中性の物質とは非常に激しい反応を起こす。そのダイナミクスは原子衝突物理学の重要な研究対象であるが、一方で、重原子については多価イオンの原子分光学的データは非常に乏しく、応用的な分野からの基礎データの要求に対して十分に答えられない状況が続いている。本研究室では電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance, ECR) 型多価イオン源を用いて、C のような軽元素から Bi のような重元素まで、様々な原子の多価イオンビームを生成して、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。

(1) 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、合体直後の原子イオンの価数は 3-4 価程度であり、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、全く別の理由で理論計算が始まっていた原子番号 68 の Er から実験を開始した。金属 Er ロッドを ECR イオン源において生成させた酸素プラズマの中に挿入することで Er をスパッタしてプラズマに供給し、多価 Er イオンを生成した。4-7 価の Er イオンを価数選別ビームとして取り出し、標的気体に衝突させて電荷交換分光の手法を用いて Czerny-Turner 型分光器によって発光スペクトルを観測した。標的気体としてイオン化ポテンシャルに近い Ar と N₂ を用いて、標的に依存しない発光を Er イオンからの遷移と同定する手法を用いた。それぞれの価数について可視光領域における数本の輝線を確認したが、理論計算によると低価数の Er イオンには膨大な数の微細構造が存在するため、極めて多数の輝線の観測が期待されていた。実験結果はこれとは大きく異なるため、電荷移行反応によって特定の励起状態が生成する可能性を考慮して、遷移の同定を進めている。

(2) 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：

従来の電荷交換分光では、多価イオンビームと中性標的気体の組み合わせで実験が行われているため、発光寿命が ns より長い場合は衝突領域における発光強度が極端に弱く、測定は不可能であった。一方で、ms 以上の長寿命の場合には、衝突領域を通過した励起多価イオンをイオントラップに導入し、閉じ込めた多価イオンからの発光を観測することには成功したが、発光断面積の測定は難しかった。そこで、閉じ込めた多価イオンに中性原子ビームを照射して電荷移行反応を起こさせ、励起イオンを閉じ込めたまま発光を観測する実験を計画した。今年度は、2.45 GHz のマイクロ波放電型プラズマイオン源から引き出した H⁺ ビームを気体セルの中で近共鳴電荷移行反応を利用して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設計および部品製作を完了させた。また、軟 X 線観測に使用するシリコンドリフト型検出器を導入して、その性能評価を行った。

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。理化学研究所において、ヘリウム液滴にアニリン分子 (C₆H₅NH₂) を捕獲させたものを、電子衝撃およびレーザー共鳴多光子吸収によってイオン化し、生成したイオンの質量スペクトルを測定した。電子衝撃ではアニリンイオンおよびフラグメントイオンしか観測されなかったが、REMPI 法では最大 68 個の He 原子が付着した複合体が観測された。これらのイオンの生成機構の検討とともに、分子イオンを内包した巨大なヘリウム液滴生成を目指した実験を進めている。

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。我々は気相実験班としてこのプロジェクトに数年前から参画して計画を練ってきた。今年度の採択を受けて改めて低温から中間温度までの領域においてイオン-分子反応を観測するための新しいイオン移動管装置の設計を開始した。

2. 研究業績

1) 論文

S. Iida, S. Kuma, H. Tanuma, T. Azuma, and H. Shiromaru: State-Selective Observation of Radiative Cooling of Vibrationally Excited C₂⁻, *The Journal of Physical Chemistry Letters* **11**, 24, 10526–10531 (2020).

A. Kawasuso, K. Wada, A. Miyashita, M. Maekawa, H. Iwamori, S. Iida, and Y. Nagashima: Positronium formation at 4H SiC(0001) surfaces, *Journal of Physics: Condensed Matter* **33**, 3, 035006 (2020).

S. Iida, S. Kuma, J. Matsumoto, T. Furukawa, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, V. Zhaunerchyk, and K. Hansen: Rotationally Resolved Excitation Spectra Measured by Slow Electron Detachment from Si₂⁻, *The Journal of Physical Chemistry Letters* **11**, 13, 5199–5203 (2020).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 年 9 月 8 日～11 日（オンライン開催）

大那拓海, 島田健人, 西村勇輝, 沼館直樹, 田沼肇: 極端紫外分光用斜入射分光器の波長に依存する検出効率の決定 II

飯田進平, 久間晋, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行, V. Zhaunerchyk, K. Hansen: Si₂⁻ の遅延電子脱離過程の解明

飯田進平, 久間晋, 東俊行, 田沼肇, 城丸春夫: C₂⁻ の A-X 遷移に伴う振動冷却

河上剛, 飯澤正登実, 大阿久貴博, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司: 極低温イオン蓄積リング RICE を用いた中性ビームと分子イオンビームの合流実験 I

飯澤正登実, 大阿久貴博, 河上剛, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司: 極低温イオン蓄積リング RICE を用いた中性ビームと分子イオンビームの合流実験 II

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行: 極低温ヘリウム液滴中の芳香族分子イオンの生成

● 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12 日～15 日（オンライン開催）

大阿久貴博, 飯澤正登実, 河上剛, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司: 極低温イオン蓄積リング RICE を用いた中性ビームと分子イオンビームの合流実験 III

3) 学会誌等

飯田進平: 静電型イオン蓄積リングにおける等核 2 原子分子負イオンの分光実験, *しょうとつ* **18**(2), 25–33 (2020).

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

「ひとみ」衛星のX線分光サイエンスを引き継ぐためのXRISM計画が進められ、本研究室はマイクロカロリメータを用いた観測装置 Resolve の中心的な役割を果たすグループとして参加している。一方、銀河間物質探査を目指す Super DIOS 計画や、地球磁気圏探査 GEO-X 計画を推進し、こうした将来のX線ミッションのために、MEMS 技術によるX線望遠鏡の開発のほか、TES カロリメータの開発やそれを用いた地上実験も進めた。

1) 「すざく」、XMM-Newton, NICER によるX線観測研究

これまでに軌道上に打ち上げられた衛星などの観測データを用いたX線観測研究も積極的に進めている。白色矮星と晩期型星の連星系である激変星の中でも、降着円盤の熱不安定性のために、可視光で2〜5等級の増光を繰り返す「矮新星」について、可視光静穏時に卓越する境界層からの硬X線を系統的に解析した。XMM-Newton のデータベースから、19個の矮新星について、25個の観測データを用い、複数回の観測が行われている矮新星については、日本が2005年に打ち上げた「すざく」衛星、米国が2017年に打ち上げ、国際宇宙ステーションに搭載されたX線望遠鏡NICERのデータも動員して、境界層からのX線の長期的な時間変動についても調べた。

太陽系天体についても、木星磁気圏からの広がったX線放射の太陽活動による時間変動を「すざく」衛星のデータを用いて系統的に解析することで、高エネルギー keV 電子とイオンによるオーロラ成分が卓越する木星本体に比べてX線光度変動が小さく、数十 MeV 電子による木星近傍のシンクロトロン電波と類似していることから、従来提唱してきた数十 MeV 電子による逆コンプトン散乱説を裏付けるという結論を得た。一方で、X線から類推される電子密度あるいは広がり木星周辺における電子分布モデルと一致せず、より多くあるいは広がった高エネルギー電子成分の存在を示唆するものとなった。

2) X 線分光撮像衛星 XRISM の開発

X 線分光撮像衛星 XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) は、日米協力で開発中の国際的な大型X線天文台であり、2022年度頃の打ち上げを目指して開発を進めている。都立大の石崎は搭載装置の目玉であるX線マイクロカロリメータ Resolve のPI (Principal Investigator) であり検出器システム全体の責任を負うほか、江副が冷却系全般、石川が超流動 He 排気系などを担当している。2020年度は装置の Flight Model 品の製作と組み上げを進め、冷媒として用いる超流動ヘリウムの低温でのリーク対処を行い、新居浜での冷却試験を実施して、性能評価を進めた。

3) 地球磁気圏探査衛星 GEO-X の開発

GEO-X は世界初の地球磁気圏のX線撮像を目指す50 kg 級超小型衛星計画であり、太陽活動の上昇に合わせて2023-25年頃の打ち上げを目指して開発を進めている。X線天文衛星の観測で見つかった地球周辺からの電荷交換X線放射を用いて、これまでの磁気圏観測では難しかった俯瞰的なグローバル撮像を行うものである。都立大の江副はPIとして、JAXA・東大、北海道大、名古屋大、関東学院大等からなるチームをリードしており、石川が望遠鏡を担当している。2020年度は観測装置の試作品を製作しての環境試験や各コンポーネント(望遠鏡、CMOS 検出器、可視光遮光フィルタ)のX線評価を行って性能を確認した。並行して新型の衛星推進系の試作試験および衛星本体の設計も行った。

4) MEMS X 線望遠鏡の開発

マイクロマシン (MEMS) 技術を用いた独自の超軽量 X 線望遠鏡の開発を進めている。薄い Si 基板に数十 μm の貫通穴を開け、側壁を反射鏡として利用できるよう高温アニールや原子層堆積法による重金属膜付けを行う。既に世界初の X 線の集光結像の実証に成功しており、衛星搭載へ向け性能向上を進めている。今年度は、上記の GEO-X 衛星計画を目指して、望遠鏡の試作を進め、鏡の端面に生じるバリを除去する化学機械研磨プロセスを取り入れた新プロセスでの光学系の試作と評価および、JAXA 筑波における音響試験や放医研における放射線照射試験を実施して、いずれも良好な結果を得た。GEO-X 衛星を含めた将来の太陽系探査に展開したいと考えている。関連して学生が発表賞を 1 件受賞した。

5) 新しい X 線望遠鏡と X 線偏光計の開発

上記のマイクロマシン技術を用いた新しい X 線望遠鏡の開発にも取り組んだ。一つ目が Si 基板の高温塑性変形による Si 反射鏡であり、Si 基板の表面そのものを反射鏡として用いることで従来「すぎく」衛星などで用いられてきたアルミ薄板型に比べて、軽量性を保ちつつ秒角の分解能が期待できるものである。本手法で世界初の円錐形に曲げた基板表面での X 線照射試験結果を論文として発表した。二つ目が上記 MEMS 望遠鏡の技術を用いて製作するロブスターアイ光学系である。甲殻類の眼を模擬した微細四角穴の光学系であり、広視野を容易に実現できる。本手法で世界初の試作を行うと共に、理研と協力して将来衛星に向けた新しい光学系配置の論文を発表し、また特許を申請した。三つ目が X 線偏光計である。偏光はエネルギー、時間、画像に続く第四の観測パラメータとして X 線天文で注目されており、我々は上述の高温塑性変形 Si 基板がブラッグ反射を生じることに着目し、新たな偏光計を設計して試作し、X 線で実証した。こちらも世界初であり、論文としてまとめている。学生が発表賞を 1 件受賞した。これらの技術開発が評価され、MEMS 望遠鏡と高温塑性変形 Si 鏡は JAXA 宇宙科学技術ロードマップにおける獲得すべきキー技術に選出されている。

6) TES カロリメータの開発と地上実験

SuperDIOS を目指した TES カロリメータの製作およびマイクロ波読み出しを産総研、宇宙研、立教大と協力して進めた。特に、産総研で製作した SQUID を用いたマイクロ波読み出しにより、38 ピクセルの TES カロリメータの同時読み出しに成功し、5.9 keV におけるエネルギー分解能は 2.79 – 4.56 eV の範囲であった。このうち、読み出しノイズの寄与は 0.9 – 1.7 eV と見積もられる。

米国 NIST 製の 240 素子からなる TES カロリメータをもちいて、立教大、理研、産総研ほかと協力して地上実験を進めた。特に、理研の SPring-8 放射光施設で世界で初めて、分光分析ビームライン (BL37XU) に持ち込んだ TES 検出器を用いて動作実証を行った。これまでの半導体検出器 (シリコンドリフト検出器) では抽出不可能な元素からの蛍光 X 線が分解でき、分光結晶法では困難な幅広いエネルギー領域に渡る X 線スペクトルを一挙に取得することに成功した。また、世界で初めて TES を利用した蛍光 XAFS を環境試料中の微量元素の化学状態分析に応用することにも成功し、立教大を中心として記者発表を行った。

7) Super DIOS の検討

宇宙のバリオンの多くを占めると考えられる、温度が数 100 万度の銀河間物質 (ダークバリオン) を酸素の輝線 (O_{VII} , O_{VIII}) で検出するために、Super DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) の検討を 2030 年ごろの打ち上げを目指して検討を進めた。視野が 30 分角、望遠鏡の角分解能が約 10 秒角、面積 1000 cm^2 以上、約 3 万素子の TES カロリメータを備える衛星で、埼玉大、宇宙研、名古屋大などとハードウェアの開発を行うとともに、理論グループと新たなシミュレーションも進めている。ダークバリオンの検出以外にダークマターや circum-galactic gas のサイエンスなどについても検討を行なった。

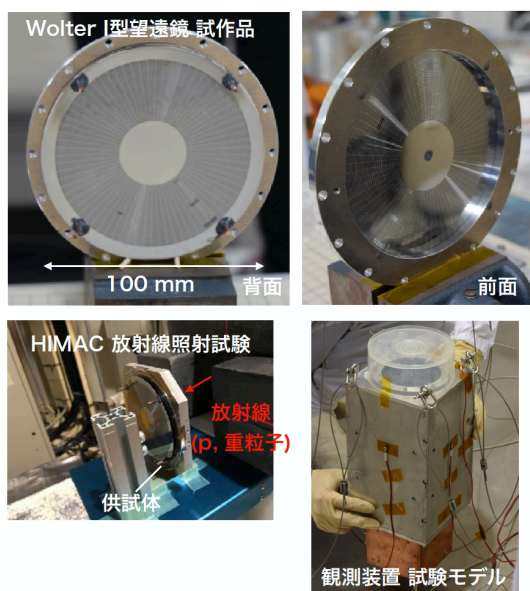


図 1: GEO-X 衛星に向けた Wolter I 型望遠鏡の試作品と各試験の様子。

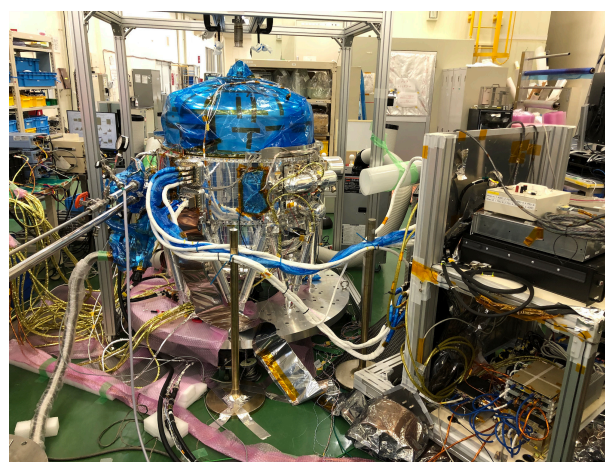


図 2: XRISM 衛星に搭載される観測装置 Resolve のフライトモデルの試験の様子。アメリカの NASA ゴダード宇宙飛行センターで製作され、住友重機械工業の新居浜工場で液体ヘリウムデュウに組み込まれた。

2. 研究業績

1) 論文

Tamagawa, Toru; Uchiyama, Keisuke; Otsubo, Ryota; Yuasa, Tatsuya; Zhou, Yuanhui; Mihara, Tatehiro; Ezoe, Yuichiro; Numazawa, Masaki; Ishi, Daiki; Fukushima, Aoto; Suzuki, Hikaru; Uchino, Tomoki; Sakuta, Sae; Ishikawa, Kumi; Enoto, Teruaki; Sakamoto, Takanori: Multiplexing lobster-eye optics: a concept for wide-field X-ray monitoring, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **6**, id. 025003, DOI: 10.1117/1.JATIS.6.2.025003 (04/2020)

Ezoe, Yuichiro ; Ishisaki, Yoshitaka ; Fujimoto, Ryuichi ; Takei, Yoh ; Horiuchi, Takafumi ; Tsujimoto, Masahiro ; Ishikawa, Kumi ; Yasuda, Susumu ; Yanagase, Keiichi ; Shibano, Yasuko ; Sato, Kosuke ; Kitamoto, Shunji ; Yoshida, Seiji ; Kanao, Keiichi ; Tsunematsu, Shoji ; Otsuka, Kiyomi ; Mizunuma, Syou ; Isshiki, Masahito ; Kelley, Richard L. ; Kilbourne, Calorine A. Porter, Frederick S. ; Dipirro, Michael J. ; Shirron, Peter ; The Xrism Resolve Team: Cooling system for the Resolve onboard XRISM, *Cryogenics*, **108**, article id. 103016., DOI: 10.1016/j.cryogenics.2019.103016 (06/2020)

Ishi, Daiki; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Numazawa, Masaki; Fukushima, Aoto; Otsubo, Ryota; Suzuki, Hikaru; Yuasa, Tatsuya; Sakuda, Sae; Uchino, Tomoki; Fujitani, Maiko; Mitsuda, Kazuhisa; Sowa, Mark J.: Enhanced X-ray reflectivity from Pt-coated silicon micropore optics prepared by plasma atomic layer deposition, *Applied Physics Express*, **13**, Issue 8, id.087001 DOI: 10.35848/1882-0786/aba7a5 (08/2020)

Nakashima, Y. ; Hirayama, F. ; Kohjiro, S. ; Yamamori, H. ; Nagasawa, S. ; Sato, A. ; Yamada, S. ; Hayakawa, R. ; Yamasaki, N. Y. ; Mitsuda, K. ; Nagayoshi, K. ; Akamatsu, H. ; Gottardi, L. ; Taralli, E. ; Bruijn, M. P. ; Ridder, M. L. ; Gao, J. R. ; den Herder, J. W. A. : Low-noise microwave SQUID multiplexed readout of 38 x-ray transition-edge sensor microcalorimeters, *Applied Physics Letters*, **117**, Issue 12, article id.122601, DOI: 10.1063/5.0016333 (09/2020)

Nakaniwa, Nozomi; Ezoe, Yuichiro; Numazawa, Masaki; Takeo, Mai; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Morishita, Kohei; Nakajima, Kazuo: Development of x-ray mirror foils using a hot plastic deformation process, *Applied Optics*, **59**, issue 28, p. 8793, DOI: 10.1364/AO.401644 (10/2020)

Yamada, Shinya ; Ichinohe, Yuto ; Tatsuno, Hideyuki ; Hayakawa, Ryota ; Suda, Hirotaka ; Ohashi, Takaya ; Ishisaki, Yoshitaka ; Uruga, Tomoya ; Sekizawa, Oki ; Nitta, Kiyofumi ; Takahashi, Yoshio ; Itai, Takaaki ; Suga, Hiroki ; Nagasawa, Makoto ; Tanaka, Masato ; Kurisu, Minako ; Hashimoto, Tadashi ; Bennett, Douglas ; Denison, Ed ; Doriese, William Bertrand ; Durkin, Malcolm ; Fowler, Joseph ; O'Neil, Galen ; Morgan, Kelsey ; Schmidt, Dan ; Swetz, Daniel ; Ullom, Joel ; Vale, Leila ; Okada, Shinji ; Okumura, Takuma ; Azuma, Toshiyuki ; Tamagawa, Toru ; Isobe, Tadaaki ; Kohjiro, Satoshi ; Noda, Hirofumi ; Tanaka, Keigo ; Taguchi, Akimichi ; Imai, Yuki ; Sato, Kosuke ; Hayashi, Tasuku ; Kashiwabara, Teruhiko ; Sakata, Kohei: Broadband high-energy resolution hard x-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8, *Review of Scientific Instruments*, **92**, Issue 1, article id.013103, DOI: 10.1063/5.0020642 (01/2021)

Takeo, Mai ; Hayashi, Takayuki ; Ishida, Manabu ; Nakaniwa, Nozomi ; Maeda, Yoshitomo: Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of U Geminorum in quiescence and outburst, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **73**, Issue 1, pp.143-153, DOI: 10.1093/pasj/psaa111 (02/2021)

Asakura, Kazunori; Matsumoto, Hironori; Okazaki, Koki; Yoneyama, Tomokage; Noda, Hirofumi; Hayashida, Kiyoshi; Tsunemi, Hiroshi; Nakajima, Hiroshi; Katsuda, Satoru; Ishi, Daiki; Ezoe, Yuichiro: Suzaku Detection of Solar Wind Charge Exchange Emission from a Variety of Highly-ionized Ions in an Interplanetary Coronal Mass Ejection, *Publications of the Astronomical Society of Japan, Advance Access*, DOI: 10.1093/pasj/psab015 (03/2021)

2) 国際会議報告

Hayakawa, R. ; Yamada, S. ; Tatsuno, H. ; Fowler, J. W. ; Swetz, D. S. ; Bennett, D. A. ; Durkin, M. ; O'Neil, G. C. ; Ullom, J. N. ; Doriese, W. B. ; Reintsema, C. D. ; Gard, J. D. ; Okada, S. ; Hashimoto, T. ; Ichinohe, Y. ; Noda, H. ; Hayashi, T. ; Heates Collaboration : Waveform Analysis of a 240-Pixel TES Array for X-Rays and Charged Particles Using a Function of Triggering Neighboring Pixels, *Journal of Low Temperature Physics*, **200**, Issue 5-6, p.269-276, DOI: 10.1007/s10909-020-02449-8 (04/2020)

Yamada, S. search by orcid ; Hayakawa, R. ; Tatsuno, H. ; Fowler, J. W. ; Swetz, D. S. ; Bennett, D. A. ; Durkin, M. ; O'Neil, G. C. ; Ullom, J. N. ; Doriese, W. B. ; Reintsema, C. D. ; Gard, J. D. ; Okada, S. ; Hashimoto, T. ; Ichinohe, Y. ; Noda, H. ; Hayashi, T. ; Heates Collaboration : High Energy Background Event Identification Using Local Group Trigger in a 240-pixel X-ray TES Array, *Journal of Low Temperature Physics*, **200**, Issue 5-6, p.392-399, DOI: 10.1007/s10909-020-02468-5 (05/2020)

Tatsuno, H. search by orcid ; Bennett, D. A. ; Doriese, W. B. ; Durkin, M. S. ; Fowler, J. W. ; Gard, J. D. ; Hashimoto, T. ; Hayakawa, R. ; Hayashi, T. ; Hilton, G. C. ; Ichinohe, Y. ; Noda, H. ; O'Neil, G. C. ; Okada, S. ; Reintsema, C. D. ; Schmidt, D. R. ; Swetz, D. S. ; Ullom, J. N. ; Yamada, S. ; J-PARC E62 Collaboration : Mitigating the Effects of Charged Particle Strikes on TES Arrays for Exotic Atom X-ray Experiments, *Journal of Low Temperature Physics*, **200**, Issue 5-6, p.247-254, DOI: 10.1007/s10909-020-02484-5 (06/2020)

Okada, S. search by orcid ; Azuma, T. ; Bennett, D. A. ; Caradonna, P. ; Doriese, W. B. ; Durkin, M. S. ; Fowler, J. W. ; Gard, J. D. ; Hashimoto, T. ; Hayakawa, R. ; Hilton, G. C. ; Ichinohe, Y. ; Indelicato, P. ; Isobe, T. ; Kanda, S. ; Katsuragawa, M. ; Kawamura, N. ; Kino, Y. ; Miyake, Y. ; Morgan, K. M. Ninomiya, K. ; Noda, H. ; O’Neil, G. C. ; Okumura, T. ; Reintsema, C. D. ; Schmidt, D. R. ; Shimomura, K. ; Strasser, P. ; Swetz, D. S. ; Takahashi, T. ; Takeda, S. ; Takeshita, S. ; Tatsuno, H. ; Ueno, Y. ; Ullom, J. N. ; Watanabe, S. ; Yamada, S.: X-ray Spectroscopy of Muonic Atoms Isolated in Vacuum with Transition Edge Sensors, *Journal of Low Temperature Physics*, **200**, Issue 5-6, p.445-451, DOI: 10.1007/s10909-020-02476-5 (06/2020)

Ezoe, Yuichiro; Funase, Ryu; Nagata, Harunori; Miyoshi, Yoshizumi; Kasahara, Satoshi; Nakajima, Hiroshi; Mitsuishi, Ikuyuki; Ishikawa, Kumi; Hiraga, Junko; Mitsuda, Kazuhisa; Fujimoto, Masaki; Ueno, Munetaka; Yamazaki, Atsushi; Hasegawa, Hiroshi; Matsumoto, Yosuke; Kawakatsu, Yasuhiro; Iwata, Takahiro; Sahara, Hironori; Kanamori, Yoshiaki; Morishita, Kohei Koizumi, Hiroyuki; Mita, Makoto; Mitani, Takefumi; Numazawa, Masaki; Kamps, Landon; Kawabata, Yusuke: GEO-X (GEOspace x-ray imager), *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, id. 1144428 12 pp, DOI: 10.1117/12.2560780 (12/2020)

Uchiyama, Keisuke; Tamagawa, Toru; Mihara, Tatehiro; Zhou, Yuanhui; Ezoe, Yuichiro; Numazawa, Masaki; Ishi, Daiki; Otsubo, Ryota; Fukushima, Aoto; Yuasa, Tatsuya; Suzuki, Hikaru; Uchino, Tomoki; Sakuda, Sae; Ishikawa, Kumi: Source position determination method of multiplexing lobster-eye optics, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, id. 114447E 13 pp, DOI: 10.1117/12.2560427 (12/2020)

Suzuki, Hitomi ; Nakaniwa, Nozomi ; Takeo, Mai ; Ishida, Manabu ; Maeda, Yoshitomo ; Nakatsubo, Shunichi ; Ohashi, Takaya: Development of a powerful x-ray generator with a small spot-size option at ISAS x-ray beamline facility, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, id. 114447G 9 pp, DOI: 10.1117/12.2560874 (12/2020)

Kosuke Sato, Takaya Ohashi, Yoshitaka Ishisaki, Yuichiro Ezoe, Shinya Yamada, Noriko Y. Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Manabu Ishida, Yoshitomo Maeda, Yuki Nakashima, Ikuyuki Mitsuishi, Yuzuru Tawara, Ryuichi Fujimoto, Takeshi G. Tsuru, Naomi Ota, Ken Osato, Shinya Nakashima, Yutaka Fujita, Daisuke Nagai, Kohji Yoshikawa, Nobuyuki Kawai, Kyoko Matsushita, Yuto Ichinohe, Yuusuke Uchida: Super DIOS mission for exploring missing baryon, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, DOI: 10.1117/12.2561681 (12/2020)

Midooka, Takuya ; Tsujimoto, Masahiro ; Kitamoto, Shunji ; Nakaniwa, Nozomi ; Maeda, Yoshitomo ; Hayakawa, Shinjiro ; Ishida, Manabu ; Ebisawa, Ken ; Tominaga, Mayu: X-ray transmission measurements of the gate valve for the x-ray astronomy satellite XRISM, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, id. 114445C 16 pp, DOI: 10.1117/12.2559451 (12/2020)

Nakashima, Yuki ; Hirayama, Fuminori ; Kohjiro, Satoshi ; Yamamori, Hirotake ; Nagasawa, Shuichi ; Sato, Akira ; Yamada, Shinya ; Hayakawa, Ryota ; Yamasaki, Noriko N. ; Mitsuda, Kazuhisa ; Nagayoshi, Kenichiro ; Akamatsu, Hiroki ; Gottardi, Luciano ; Taralli, Emanuele ; Bruijn, Marcel P. ; Ridder, Marcel L. ; Gao, Jian-Rong ; den Herder, Jan Willem: Development of microwave multiplexer for the Super DIOS mission: 38 transition-edge sensor x-ray microcalorimeter readout with microwave

multiplexing, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11454, id. 1145412 9 pp, DOI: 10.1117/12.2560819 (12/2020)

Nakajima, Hiroshi; Nakamura, Shotaro; Kouno, Hikaru; Hiraga, Junko; Yuhi, Daito; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi: Developing the detector of x-ray imaging spectrometer for GEO-X mission, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11454, id. 114540K 7 pp, DOI: 10.1117/12.2562221 (1/2021)

Tashiro, Makoto, et al (189 authors): Status of x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM), *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, id. 1144422 11 pp. DOI: 10.1117/12.2565812 (12/2020)

3) 日本語解説

江副祐一郎, 満田和久, 石川久美: 最近の超軽量 MEMS X 線望遠鏡の開発状況, X 線結像光学ニューズレター, No.52, 2020 年 12 月

4) 特許

江副祐一郎, 大橋隆哉, 石川久美ほか: 「X 線素子及び X 線素子の製造方法」, 特許出願 2020-104051

5) 学会講演

国内学会

● 応用物理学会 秋季年会 2020 年 9 月 8 – 11 日 (オンライン)

湯浅辰哉, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: 広視野 Lobster eye X 線光学系の開発

● 日本物理学会 秋季年会 2020 年 9 月 14 – 17 日 (オンライン)

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

● 太陽地球惑星圏の研究領域 将来衛星計画ロードマップ策定に向けた勉強会 2020 年 11 月 25 日 (オンライン)

江副祐一郎 (招待講演): X 線観測技術

● 地球電磁気・地球惑星圏学会 2020 年 11 月 1 – 4 日 (オンライン)

伊師大貴, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X に向けた超軽量 X 線望遠鏡のプラズマ原子層堆積法による Pt 膜付加工 (オーロラメダル)

● JAXA 宇宙科学シンポジウム 2021 年 1 月 6 – 7 日 (オンライン)

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

作田紗恵, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: MEMS 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発

石崎欣尚, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: X 線分光撮像衛星 (XRISM) 搭載 Resolve の開発状況

● 日本物理学会 春季年会 2021 年 3 月 12 – 15 日 (オンライン)

伊師大貴, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: シリコン高温塑性変形技術を用いた湾曲ブラッグ反射型 X 線偏光計の開発 (講演奨励賞)

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

● 日本天文学会 春季年会 2021 年 3 月 16 – 19 日 (オンライン)

内野友樹, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: 高温塑性変形技術を用いた Si 湾曲ブラッグ反射型偏光計の開発

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

● 応用物理学会 春季年会 2021 年 3 月 16 – 19 日 (オンライン)

上田陽功, 石川久美, 江副祐一郎, ほか: 高温塑性変形技術を用いたシリコン湾曲ブラッグ反射型 X 線偏光計の開発

● 太陽地球惑星圏の研究領域のロードマップ作成に向けた研究会 2021 年 3 月 (JAXA 宇宙研)

江副祐一郎 (招待講演): 撮像観測: X 線

江副祐一郎 (招待講演): 撮像観測: X 線 GEO-X (GEOspace X-ray imager)

国際会議

● SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2020, 2020 年 12 月 14 – 18 日 (on-line)

Ezoe, Yuichiro; Funase, Ryu; Nagata, Harunori; Miyoshi, Yoshizumi; Kasahara, Satoshi; Nakajima, Hiroshi; Mitsuishi, Ikuyuki; Ishikawa, Kumi; Hiraga, Junko; Mitsuda, Kazuhisa; Fujimoto, Masaki; Ueno, Munetaka; Yamazaki, Atsushi; Hasegawa, Hiroshi; Matsumoto, Yosuke; Kawakatsu, Yasuhiro; Iwata, Takahiro; Sahara, Hironori; Kanamori, Yoshiaki; Morishita, Kohei Koizumi, Hiroyuki; Mita, Makoto; Mitani, Takefumi; Numazawa, Masaki; Kamps, Landon; Kawabata, Yusuke: GEO-X (GEOspace x-ray imager)

● COSPAR Scientific Assembly, 2021 年 1 月 28 – 2 月 4 日 (on-line)

Y. Ezoe: X-ray emission from the Jupiter system: past, present and beyond (invited)

Numazawa, Masaki ; Shiota, Daikou ; Ezoe, Yuichiro ; Kimura, Tomoki ; Ohashi, Takaya ; Branduardi-Raymont, Graziella ; Uchiyama, Yasunobu ; Miyoshi, Yoshizumi ; Ishikawa, Kumi: Jovian diffuse hard X-ray emission observed with Suzaku

● Cool Stars 20.5, 2021 年 3 月 2 – 4 日 (on-line)

Tsubasa Umetani: Searching for x-ray transit of exoplanet with the Chandra Satellite

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) 生物をヒントにパターン形成ダイナミクスを探る

生物の中には集団になると協動的な動きを発現し、面白い挙動を示すものがある。例えば、生物がレイリー・テイラー不安定性により対流する生物対流やバクテリアのコロニー形成などが挙げられる。また細胞性粘菌の集団が凝集する際には、単純な円の形状に集まるのではなく、ヒゲのように伸びたネットワークパターンを形成する。このネットワーク形成のメカニズムはまだわかっていない。我々の研究室では、生物に見られるこれらの特徴的な協同現象に対して物理的な要因を抜き出したシンプルなモデルを提案し、ネットワークパターンの再現に成功した。この他にも数値計算を行うことによってメカニズムを理解することを目指している。

2. 研究業績

1) 論文

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, 混相流学会 (推薦論文) (掲載決定)

Kazuya U. Kobayashi, Ryoko Shinohara and Rei Kurita : Mechanism of transient stagnant formation in convection of binary mixtures, J. Phys.:Condens. Matter, accepted (2021),

Marie Tani, Honoka Fujio and Rei Kurita : Transition Behavior in Silicone-coated Sand Mixtures J. Phys. Soc. Jpn., **90**, 033801 (2021),

Naoya Yanagisawa, Marie Tani and Rei Kurita : Dynamics and mechanism of liquid film collapse in a foam, Soft Matter, **17**, 1738-1745 (2021),

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : Size distribution dependence of collective relaxation dynamics in a two-dimensional wet foam, Scientific Reports, **11**, 2786 (2021).

2) 学会講演

● EUFoam 2020 conference (Virtual Meeting)

Foam droplet falling in a Hele-Shaw cell (Poster) Marie Tani and Rei Kurita

Collective bubble collapse dynamics in a foam (Oral) Naoya Yanagisawa and Rei Kurita

● 日本物理学会 第76回年次大会 (オンライン開催)

谷 茉莉, 栗田 玲: Hele-Shaw セル中の泡沫滴の pinch-off

篠原 良子, 谷 茉莉, 栗田 玲: 蛍光観察による2成分系対流の濃度ゆらぎ増大の測定

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲: 3次元 directional quenching による相分離のパターン形成

柳沢 直也, 栗田 玲: 泡沫の緩和ダイナミクスにおける気泡のサイズ分散依存性

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崩壊ダイナミクス

田村 優斗, 谷 茉莉, 栗田 玲: 弾性率の異なる円の混合系における力の伝播

八島 拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲: o-terphenyl 結晶成長時に発生する速度異常性

金澤拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 二分子膜のスポンジ・ミセル相転移のシミュレーション

● 第 19 回 関東ソフトマター研究会 (都立大学・オンライン開催)

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力学的特性の転移

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 泡沫の塗り広げの速度依存性

石川 陸矢, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 3 次元 directional quenching による相分離パターン

金澤 拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 界面活性剤系におけるスポンジ・ミセル相転移のシミュレーション

田村 優斗, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 弾性率の異なる円の混合系における力の伝搬

八島 拓未, 谷 茉莉, 栗田 玲 : OTP の結晶成長における速度異常性

篠原 良子, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 2 成分系対流における濃度ゆらぎの増大

寺田 行宏, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 界面活性剤におけるスポンジミセル相分離過程

柳沢 直也, 谷 茉莉, 栗田 玲 : 泡沫における液膜の崩壊挙動

谷 茉莉, 栗田 玲 : 擬 2 次元泡沫滴の pinch off

● 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年) (オンライン開催)

藤尾穂香, 谷茉莉, 栗田玲 : シリコンコーティングされた砂のパークレーション

柳沢直也, 谷茉莉, 栗田玲 : 泡沫における液膜の崩壊ダイナミクス

谷茉莉, 栗田玲 : Hele-Shaw セル中の泡沫滴の下降

塚田剛, 栗田玲 : Directional quenching による相分離のパターン形成

小林和也, 篠原良子, 栗田玲 : コロイド分散系における異常対流

● 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2020 (2020 年) (静岡大学 現地開催中止)

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

粒子ビーム物性研究室

1. 研究活動の概要

For a decade or more, magnetic monopoles in condensed matters have attracted much attention as tractable analogs of magnetic charged particles. An example is the elementary excitation in spin ice (SI), where point defects or monopoles emerge from its macroscopically degenerate ground states by breaking local “2-in-2-out” spin configurations (Fig. 1(a)). A pair of monopoles and antimonopoles is fractionalized into two independent quasiparticle defects by successively flipping spins (Fig. 1(a)) and are thought to move diffusively along Dirac strings. Although they are not true elementary particles, the concept of monopoles in SI is attractive and their static and dynamic properties have been investigated by several experiments.

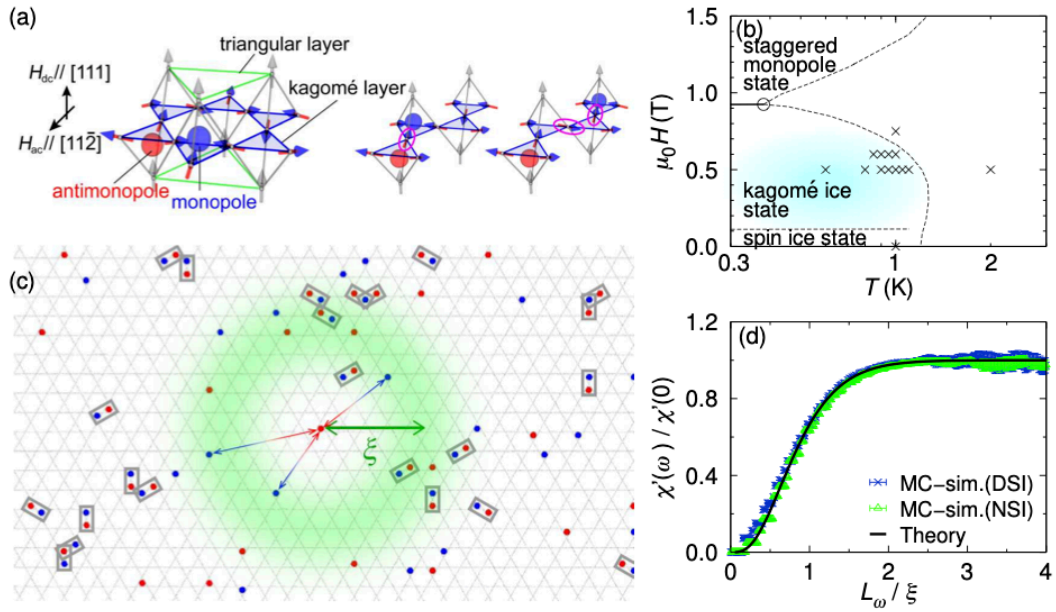


FIG. 1. (a) Magnetic monopoles in kagomé ice. Left: a monopole and antimonopole pair is created in the KI state by a single spin flip. Right: they separate by successively flipping spins. (b) Phase diagram of DTO under an applied field along the 111 direction [13, 15]. The solid line represents the first-order phase transition to the critical point (open circle). The dashed lines are crossover regimes showing the borders of the KI state. The typical KI range is $\mu_0 H_{dc} \sim 0.5$ T and $T < 1.2$ K. Cross symbols indicate measurement points of $\chi(\omega)$ in the (T, H) plane. (c) A snapshot of monopoles (blue) and antimonopoles (red) in the MC simulation of the DSI model for DTO at $T = 1$ K and $\mu_0 H_{dc} = 0.5$ T. This is shown for a 2D kagomé plane viewed from the 111 direction. There are fractionalized monopoles and antimonopoles, separated by a certain distance $\sim \xi$. A monopole-antimonopole pair closely bounded in an adjacent region is also seen (gray squares). ξ determined by the scaling plot of Fig. 1(d) agrees with the visual distance between separate monopoles in the snapshot (green arrow), $\xi \sim 30$ Å [26]. (d) Calculated $\chi'(\omega)$ plotted as a function of $L_\omega/\xi(= (\omega_1/\omega)^{1/2})$ for the NSI and DSI models and comparison with the theoretical scaling curve of Ref. [18], $\chi'(\omega)/\chi'(0) = \mathcal{F}(L_\omega/\xi)$.

$\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (DTO) is a pyrochlore magnet showing the SI ground state. It is known that the space dimensionality of the SI state can be tuned by applying a magnetic field along the 111 direction of the crystallographic axis of this compound. Along the 111 direction, DTO consists of alternating stacks of the triangular and kagomé lattice layers of Dy^{3+} (Fig. 1(a)). Under an appropriate field ~ 0.5 T at low temperatures, the spins on the triangular lattice layers are fixed parallel to the 111 direction, while the spins on each kagomé lattice layer remain frustrated, keeping the 2-in-2-out spin configuration (Fig. 1(a)). This state is referred to as the kagomé ice (KI) state (Fig. 1(b)) where the monopoles are restricted to move in each two-dimensional (2D) kagomé plane. It is thus considered that the 2D

dynamics of monopoles can potentially be evaluated in the KI state.

It has been theoretically pointed out that monopoles in the KI state behave like a 2D Coulomb gas (CG) and obey a scaling law for the frequency-dependent magnetic susceptibility $\chi(\omega)/\chi(0) = \mathcal{F}(\omega/\omega_1) = \mathcal{F}(L_\omega/\xi)$, where $\omega_1 = \mathcal{D}/\xi^2$ is a characteristic frequency determined by the charge correlation length ξ of the KI and the diffusion constant $\mathcal{D}$. The frequencies ω is related to a mean diffusion length $L_\omega = (\mathcal{D}/\omega)^{1/2}$. This scaling law is universal among 2D CG systems such as the vortex dynamics of 2D superconductors, 2D superfluids, classical XY magnets, and the dynamics of melting of Wigner crystals. It is a novel perspective for the study of the monopole dynamics in SI compounds.

We have experimentally investigated the monopole dynamics in the KI state of DTO by measuring the frequency dependence of the ac magnetic susceptibility $\chi(\omega)$. These enable us to capture a new aspect of monopoles in 2D and to interpret experimental data of $\chi(\omega)$ clearly by a comparison with a theoretical scaling relation for generic systems of 2D charged particles (see H. Takatsu et al. arXiv:2103.12101).

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 10 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 7 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伝導系の物性探索

$\text{Pt}_{1-x}\text{Cd}_x$ は、 $x \simeq 0.86$ のとき、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、四面体、八面体、十二面体の構造を持つ 4 つの殻状クラスタが入れ子になった構造をしている。本物質の単結晶を合成し、この特徴的な結晶構造がもたらす物性を調べた。磁化率には、Pt と Cd の両イオンの内殻電子の反磁性では説明できない巨大な反磁性成分が存在することがわかった。これは、多層殻状クラスタに起因する電子バンド構造が、フェルミエネルギー近傍で縮退的な構造を持ち、トポロジカルな特性を持つバンド間遷移が関与した磁化率の軌道成分が増強される状況にある可能性がある。または、クラスタが持つ分子軌道に磁場中で誘起されるリング電流で説明できるかもしれない。比熱には、多層殻状クラスタの構造に起因するものと考えられる低エネルギーフォノンモードが存在することを示す異常な温度依存性を見出した。このフォノン励起は、比熱の温度依存性に、Einstein モード的な振る舞いをもたらしている。電気抵抗は低温で温度の冪的振舞をしめすが、中間温度領域では、上述のフォノンによる伝導電子散乱に起因する温度依存性の異常を観測した。

2) 磁性イオンとスピン軌道強結合電子の相互作用がもたらす新規伝導現象

スピンと軌道角運動量が強く結合した電子が伝導を担うスピン軌道強結合電子系では、Dirac 点または Weyl 点がフェルミエネルギー近傍に存在する場合、電子輸送現象にそれらを反映したトポロジカルな性質が顕著に表れることが期待される。このような伝導電子系が、結晶中で磁性イオンと相互作用できる場合、どのような新規電子状態が現れるかという問題は、興味ある未解決の研究テーマである。我々は、同一結晶中でスピン軌道強結合電子と磁性イオンが相互作用可能な磁性伝導体の候補物質に着目し、物質合成および新規伝導現象の探索を進めている。

3) 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、 $\alpha\text{-IrSn}_4$ 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。 $\alpha\text{-IrSn}_4$ と同一の結晶構造を持つ IrGe_4 では、テトラ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える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。

IrGe_4 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。

4) 高い T_K を持つ希土類内包カゴ状物質 $\text{Sm}_3\text{Tr}_4\text{Ge}_{13}$ の強相関電子物性

近年、複数の $4f$ 電子を持つ系において、価数揺動や多極子が関わる新しいタイプの重い電子状態の形成や秩序状態、超伝導の発現が報告され、注目を集めている。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。これらの物性の起源解明と普遍的な理解を目指すために、 Sm の f 電子が持つ自由度 (価数, 多極子) と Sm イオンサイトの局所対称性に注目し、物質探索を進めている。今回、その候補として Sm サイトが正方対称のカゴに内包された構造を持つ $\text{Sm}_3\text{Tr}_4\text{Ge}_{13}$ (Tr : 遷移金属) に注目し、 $\text{Sm}_3\text{Rh}_4\text{Ge}_{13}$ の多結晶および単結晶育成を行い、基礎物性測定を行った。多結晶を用いた比熱測定において $T_1 = 4.7 \text{ K}$, $T_2 = 2.7 \text{ K}$ での逐次相転移、 100 K 付近に結晶場励起状態に起因したショットキーピークが存在することを見出した。さらに、秩序相において Sm 強相関化合物に特徴的な電子比熱係数の増強 ($\gamma = 1.6 \text{ J/mol-f.u. K}^2$) を示すことも見出した。抵抗率の温度依存性では、温度降下につれて $100, 20 \text{ K}$ 付近で増大する振る舞いを観測した。高温の振る舞いは、 100 K 付近に比熱、Seebeck 係数のピークが存在することから、結晶場励起状態に起因した高い T_K を持つ近藤効果である可能性が考えられる。また、 20 K 付近の抵抗率は、 $-\log T$ 依存性を示すが、 12 T までその振る舞いは抑制されず、通常の近藤効果から期待される負の磁気抵抗を示さず、全温度領域で正の磁気抵抗を示す。さらに、比熱で相転移が観測された $T = T_1$ において磁化率では異常が存在するが、抵抗率ではほとんど異常を示さず、磁気秩序しても抵抗の $\log T$ 依存性が影響を受けないことを見出した。このことから、磁性と電子輸送特性が分離している特異な状態が実現していることが期待される。

2. 研究業績

1) 論文

I. Khan, K. Sunakawa, R. Higashinaka, T.D. Matsuda, Y. Aoki, K. Nomura, E. Kuzmann, Z. Homonay, K. Sinkó, T. Naka, T. Nakane, S. Krehula, S. Musić, S. Kubuki: "Structural characterization and

magnetic properties of iron-phosphate glass prepared by sol-gel method”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **543** 120158 (2020) [11 pages]. DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2020.120158

Rajveer Jha, Yosuke Goto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki and Yoshikazu Mizuguchi : ”Superconductivity in Se-doped $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_2\text{Pb}_2\text{S}_{6-x}\text{Se}_x$ with a $\text{Bi}_2\text{Pb}_2\text{CH}_4$ -type thick conducting layer”, *Europhys. Lett.*, **129** 67001 (2020) [7 Pages]. DOI: 10.1209/0295-5075/129/67001

Ryosuke Kiyama, Yosuke Goto, Kazuhisa Hoshi, Rajveer Jha, Akira Miura, Chikako Moriyoshi, Yoshihiro Kuroiwa, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Yoshikazu Mizuguchi : ”Bulk Superconductivity Induced by Se Substitution in Self-Doped BiCh_2 -Based Compound $\text{CeOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **89** 064702 (2020) [6 pages] DOI: 10.7566/JPSJ.89.064702

Aichi Yamashita, Rajveer Jha, Yosuke Goto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki and Yoshikazu Mizuguchi : ”An efficient way of increasing the total entropy of mixing in high-entropy-alloy compounds: a case of NaCl-type $(\text{Ag}, \text{In}, \text{Pb}, \text{Bi})\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.0, 0.25, 0.5$) superconductors”, *Dalton Trans.*, **49** 9118 (2020) [5 pages]. DOI: 10.1039/D0DT01880E

T. Matsumura, S. Michimura, T. Inami, C. H. Lee, M. Matsuda, H. Nakao, M. Mizumaki, N. Kawamura, M. Tsukagoshi, S. Tsutsui, H. Sugawara, K. Fushiya, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, and Y. Aoki: ”Isotropic parallel antiferromagnetism in the magnetic field induced charge-ordered state of $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ caused by p-f hybridization”, *Phys. Rev. B*, **102** 214444 (2020) [11 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.102.214444

Yosuke Goto, Shota Nakanishi, Yusuke Nakai, Takeshi Mito, Akira Miura, Chikako Moriyoshi, Yoshihiro Kuroiwa, Hidetomo Usui, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Yoshifumi Nakacho, Yuto Yamada, Kiyoshi Kanamurag and Yoshikazu Mizuguchi : ”The crystal structure and electrical/thermal transport properties of $\text{Li}_{1-x}\text{Sn}_{2+x}\text{P}_2$ and its performance as a Li-ion battery anode material”, *J. Mater. Chem. A*, **9** 7034 (2020) [8 pages]. DOI: 10.1039/D0TA11045K

T. Morita, Y. Matsuzawa, S. Kumar, E. F. Schwier, K. Shimada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, N. L. Saini, and T. Mizokawa : ”Evolution of the Fermi surface in superconductor $\text{PrO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x = 0.0, 0.3$, and 0.5) revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy”, *Phys. Rev. B*, **103** 094510 (2021) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.103.094510

Y. Mizuguchi, M.R. Kasem, T.D. Matsuda : ”Superconductivity in CuAl_2 -type $\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Rh}_{0.3}\text{Ir}_{0.3}\text{Zr}_2$ with a high-entropy-alloy transition metal site”, *Material Research Letters*, **9** 141 (2021) [7 pages]. DOI: 10.1080/21663831.2020.1860147

2) 学会講演

● 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 年 9 月 8 日 (火)～11 日 (金) (オンライン開催)

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, 芳賀芳範, 増田隼人, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 重い電子系 SmAu_3Al_7 の Al-NMRIII

有長祐人, 濱本諭, 近藤佑宥, 藤原秀紀, 西本幸平, 姫野良介, 木須孝幸, 中田惟奈, 今田真, 田中新, 中川広野, 山崎篤志, 東谷篤志, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 関山明 : 内殻硬 X 線光電子線二色性による反強磁性体 SmPt_2Si_2 における $4f$ 軌道対称性の研究

有馬寛人, Y. Yuan, 内藤康氏, 工藤一輝, 矢藤優佑, Rajveer Jha, 後藤陽介, 水口佳一, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 松林和幸: BiS₂ 系層状化合物における圧力誘起半導体-半金属転移と超伝導

島岩泰暉, 密岡拓心, 溝川貴司, 大村瑠美, 千葉優馬, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 島田賢也, Shiv Kumar, Eike F. Schwier, A. Barinov, V. Kandyba, A. Giampietri, N.L. Saini: 角度分解光電子分光によるカイラル結晶 IrGe₄ の電子状態

● 日本物理学会 2021 年春季大会 2021 年 3 月 12 日 (金)~15 日 (月) (オンライン開催)

平岡良太, 中村直貴, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 3D ディラック電子系 Bi_{1-x}Sb_x の均一単結晶育成と輸送特性

矢沼彩乃, 中村直貴, 千葉優馬, 嶋田隼輔, 田村知真, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: カイラルな結晶構造を持つ α -RhSn₄ の単結晶育成と物性測定

中村直貴, 千葉優馬, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: カイラルな結晶構造を持つ IrGe₄ の dHvA 効果の測定

久保徹郎, 東中隆二, 宮脇瑠美佳, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二, 平田倫啓, 佐々木孝彦: PrT₂Al₂O (*T*: Mo, W) の NMR による研究

松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 李哲虎, 松田雅昌, 中尾裕則, 水牧仁一朗, 河村直己, 筒井智嗣, 塚越舜, 菅原仁, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: SmRu₄P₁₂ 磁場誘起電荷秩序相における長短型反強磁性と格子変調

坪田棕, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 高い近藤温度を持つ希土類内包カゴ状物質 Sm₃Rh₄Ge₁₃ の強相関電子物性

有馬寛人, Y. Yuan, 成田傑, 工藤一輝, 矢藤優佑, Rajveer Jha, 後藤陽介, 水口佳一, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 松林和幸: BiS₂ 系層状化合物の単結晶試料における高圧力下電気伝導測定

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・熱電材料の開発を行っている。

1) BiCh_2 系超伝導体の研究

BiCh_2 系超伝導体の高圧相の超伝導発現機構解明 BiCh_2 系超伝導体は圧力の印加により正方晶構造から単斜晶構造に構造相転移することがわかっている。単斜晶相では、超伝導転移温度が大幅に上昇し、 $\text{La}(\text{O},\text{F})\text{BiS}_2$ の高圧相では、正方晶構造の $T_c \sim 2 \text{ K}$ の 5 倍近い $T_c \sim 10 \text{ K}$ が発現する。本研究では、高圧相の超伝導発現機構を探るため、硫黄同位体を用いた T_c の同位体効果を検証した。キャリアドープ量を精密に制御可能な $(\text{Sr},\text{RE})\text{FBiS}_2$ の圧力下超伝導相図を磁化測定から精密に作製し (Yamashita et al., Sci. Rep. 2020), 同位体効果検証に最適な組成を見出した。 $(\text{Sr},\text{La})\text{FBiS}_2$ において同位体試料 (^{32}S および ^{34}S) の精密合成と圧力下磁化率測定から、高圧相 (単斜晶相) では同位体効果が観測され、フォノンが超伝導発現機構に重要であることを見出した (Yamashita et al., Sci. Rep. 2021)。正方晶構造の $\text{La}(\text{O},\text{F})\text{BiSSe}$ (Hoshi et al., PRB 2017) および $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ (Jha, Mizuguchi, APEX 2020) の同位体効果に関しては、同位体効果が観測されない非従来型機構を示唆する結果が得られており、高圧相の結果とあわせて議論することで、 BiCh_2 系超伝導体において「結晶構造対称性の変化により、超伝導機構のスイッチングが起きている可能性」を提案した。(実験結果の図を Fig. 1 に示す)

ネマティック超伝導に関する研究 BiCh_2 系超伝導体において、結晶構造の対称性 (伝導面内に 4 回回転対称性を有する) を破った超伝導状態の面内異方性 (2 回回転対称性) が観測され (Hoshi et al., JPSJ 2019), ネマティック超伝導状態が発現していると考えられる。ネマティック超伝導は、 Bi_2Se_3 系超伝導体 (トポロジカル超伝導体候補物質) でも観測されており、本系との関連も含め、さらなる研究が求められている。2020 年度の研究では、ネマティック超伝導が $\text{LaO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{BiSSe}$ (Hoshi et al., J. Phys. Commun. 2020) や $\text{CeOBiS}_{1.7}\text{Se}_{0.3}$ (Kiyama et al., PSS-RRL2021) でも観測されることを見出した。また、 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiSSe}$ の低温結晶構造解析を行い、F ドープ量が $x = 0.03$ を超えると低温においても正方晶構造を保つことを示し、低温で観測されるネマティック超伝導が構造対称性の低下に由来するものでないことを示した (Hoshi et al., Condens. Matter 2020)。

4 層型 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{Ag}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{S}_6$ の圧力下超伝導相図 BiS_2 系超伝導体の伝導層は 2 層型 (2 枚の BiS_2 層がファンデルワールスで結合している) であるが、カルコゲナイド層を 4 層にした $\text{La}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ の超伝導体の開発を行ってきた。2020 年度の研究で、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{Ag}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{S}_6$ の高圧下結晶構造解析と高圧下電気抵抗測定を行い、圧力下超伝導相図を作製した。2 層型では、高圧印加により正方晶から単斜晶へと構造相転移を起こし、転移温度が大幅に上昇することがわかっていた。4 層型においては、2 GPa 程度までの低圧領域では正方晶構造を保ち、そこでバルク超伝導が発現することがわかった。4 GPa 以上の高圧領域では T_c の上昇が観測され、8 K に達した領域で低対称構造への構造変化が観測された (Liu et al., JPCM 2021)。複雑な 4 層型資料の高圧下構造解析であったため、高圧相の構造同定には至っていないが、今後の研究で解明していきたい。

2) 高エントロピー合金型 (HEA 型) 超伝導体・熱電材料の研究

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。2020年度の研究では、 CuAl_2 型構造をもつ TrZr_2 (Tr: 遷移金属) の Tr サイトを HEA 化した新しい超伝導体 $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Rh}, \text{Ir})\text{Zr}_2$ を開発した (Mizuguchi et al., Mater. Res. Lett. 2021)。数種類の $(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Rh}, \text{Ir})\text{Zr}_2$ 超伝導体も合成し、 T_c が混合エントロピーと相関を示さないことを見出した (Kasem et al., J. Mater. Sci. 2021)。一方、比熱測定から超伝導ギャップに関する情報を評価すると、混合エントロピーの増大に伴い、超伝導ギャップの開き方に明確に不均一化することが観測されている。このことは、 TrZr_2 が HEA 化の影響を強く受ける3次元構造と、ほとんど影響を受けない2次元構造の中間に位置する構造次元性を持っていることに起因すると考えており、超伝導体の HEA 化を理解する上で重要な系であると考えている。2020年度には新 HEA 型超伝導体として、 Nb_3Sn 型の $\text{Nb}_3(\text{Al}, \text{Sn}, \text{Ge}, \text{Ga}, \text{Si})$ も開発した (Yamashita et al., J. Alloy Compd 2021)。3次元構造を有するため HEA 化により T_c が低下してしまったが、混合エントロピーの増大により H_{c2} や J_c が向上する傾向がみられた。

NaCl 型カルコゲナイド 2019年に NaCl 型を持つ金属テルライド超伝導体 $(\text{Ag}, \text{In}, \text{Sn}, \text{Pb}, \text{Bi})\text{Te}$ を報告した (Mizuguchi, JPSJ2019)。2020年度は、この物質をベースとし、M サイト (Ag や Bi など) とカルコゲンサイト (Se や Te) を両方とも合金化し、単一サイトの HEA 化では達成できない非常に高い混合エントロピーを実現する手法を開発した (Yamashita et al., Dalton Trans. 2020)。また、同手法を用いて熱電材料開発を行い、低い熱伝導率と高い無次元性能指数 ZT を有する HEA 型熱電材料を開発した。

3) 熱電材料の開発

異方的キャリア極性を示す配向多結晶 NaSn_2As_2 の作製 従来の熱電変換では、キャリア極性が p 型の材料と、n 型の材料を組み合わせてモジュールを組み立てる。すなわち、それぞれの材料の熱電特性を最適化したうえで、機械強度や化学的安定性の異なる p 型・n 型材料を組み合わせて熱電変換素子を作製する必要があった。これに対し、結晶中のある方向においては p 型であり、別の方向には n 型である、という異方性を示す材料を用いた場合、p 型・n 型の材料を組み合わせることなく、単一の材料による熱電変換が可能になる。2019年には他グループにより NaSn_2As_2 が異方的なキャリア極性を示すことが報告されたが (He et al. Nature Mater. 2019)、試料が微小単結晶であることから熱電モジュールへの応用は困難であった。本研究では、一軸加圧焼結を用いることで NaSn_2As_2 配向多結晶を作製し、多結晶においても異方的なキャリア極性という特異な性質が維持されることを明らかにした。大型化、加工が容易であることから、具体的な熱電モジュール構築が検討可能になる。今後、材料の選択肢が飛躍的に広がり、さらなる高性能材料の開発が期待される (Nakamura et al., Appl. Phys. Lett. 2021 Editor's pick)。 (実験結果の図を Fig. 2 に示す)

As/P 系ジントル相 $\text{EuIn}_2\text{As}_{2-x}\text{P}_x$, SrSn_2As_2 の熱電特性 ジントル相化合物は共有結合したアニオン・ネットワークにイオン結合したカチオンから構成される一連の物質群であり、高い熱電特性が報告されてきた。従来のジントル相熱電材料はニクトゲンとして Sb を用いていたが、最近 As を含む場合でも高い熱電特性を示すことが報告され始めている。本研究では、As/P 系ジントル相 $\text{EuIn}_2\text{As}_{2-x}\text{P}_x$, SrSn_2As_2 の熱電特性を明らかにした。 $\text{EuIn}_2\text{As}_{2-x}\text{P}_x$ のキャリア密度は $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であるのに対し、 SrSn_2As_2 は $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ であった。これは SrSn_2As_2 に含まれる Sn 欠損に由来すると考えられる。 $\text{EuIn}_2\text{As}_{2-x}\text{P}_x$

の電力因子は $x = 0.1, 0.2$ のとき $\sim 1 \text{ mW/mK}^2$ という比較的高い値を示す。無次元性能指数 ZT は最大で 0.29 であり、熱伝導率低減によりさらなる熱電特性向上が期待できる。興味深い点は、第一原理計算によれば EuIn_2As_2 と SrSn_2As_2 はバンド反転を伴うトポロジカル物質であるのに対し、 EuIn_2P_2 は通常の半導体である点であり、本研究で合成した $\text{EuIn}_2\text{As}_{2-x}\text{P}_x$ はトポロジカル量子相転移の研究という観点からも重要となりうることを示した (Shinozaki et al., ACS Appl. Energy Mater. 2021)。

リチウムイオン二次電池の負極材料 $\text{Li}_{1-x}\text{Sn}_{2+x}\text{P}_2$ の開発 NaSn_2As_2 や $\text{Na}_{1-x}\text{Sn}_2\text{P}_2$ といった新超伝導物質を報告してきた。本研究では、 $\text{Li}_{1-x}\text{Sn}_{2+x}\text{P}_2$ の合成に成功し、その結晶構造や輸送特性を明らかにした。結晶構造は Li/Sn の混合占有により特徴づけられる。上記の超伝導体とは異なり、 $\text{Li}_{1-x}\text{Sn}_{2+x}\text{P}_2$ は 0.5 K 以上では超伝導転移を示さないが、これは Li/Sn 混合占有により電子構造が大きく変化するためであると考えられる。また、X線回折などの平均構造解析のみならず、 ^{31}P 核磁気共鳴測定から局所的な秩序構造を持つことを示した。さらに、ハニカム型 SnP 伝導層と Li/Sn スペース層からなる結晶構造が、Li をインターカレートしたグラファイトに類似している点に着想を得て、 $\text{Li}_{1-x}\text{Sn}_{2+x}\text{P}_2$ をリチウムイオン二次電池の負極材料として検討した。単粒子電気化学測定により充放電特性が観測され、負極材料として活性を示すことを明らかにした (Goto et al., J. Mater. Chem. A 2021)。

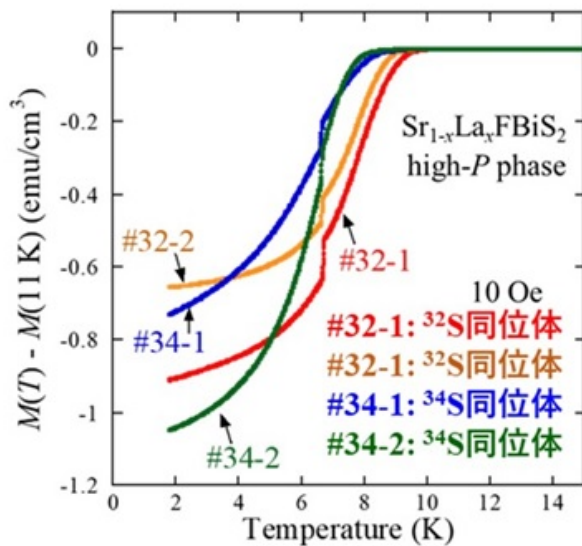


図 1: BiS_2 系超伝導体の同位体効果に関する図。

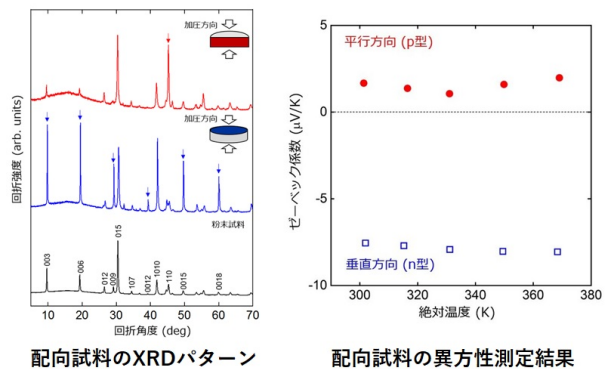


図 2: NaSn_2As_2 多結晶試料における異方的キャリア極性の図。

2. 研究業績

1) 論文

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”, *J. Alloy Compd.*, **868** (2021) 159233

Y. Goto, S. Nakanishi, Y. Nakai, T. Mito, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, H. Usui, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Nakacho, Y. Yamada, K. Kanamura, Y. Mizuguchi: “The crystal structure and electrical/thermal transport properties of $\text{Li}_{1-x}\text{Sn}_{2+x}\text{P}_2$ and its performance as a Li-ion battery anode material”, *J. Mater. Chem. A*, **9**, (2021) 7034

Md. R. 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”, *J. Mater. Sci.*,

- R. Kiyama, K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Investigation of Superconducting Properties and Possible Nematic Superconductivity in Self-Doped BiCh₂-Based Superconductor CeOBiS_{1.7}Se_{0.3}” , *Phys. Status Solidi RRL*, **56** (2021) 2000546
- K. Hoshi, K. Sudo, Y. Goto, M. Kimata, Y. Mizuguchi: “Investigation of in-plane anisotropy of c-axis magnetoresistance for BiCh₂-based layered superconductor NdO_{0.7}F_{0.3}BiS₂” , *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60** (2021) 020907
- A. Yamashita, H. Usui, K. Hoshi, Y. Goto, K. Kuroki, Y. Mizuguchi: “Possible pairing mechanism switching driven by structural symmetry breaking in BiS₂-based layered superconductors” , *Sci. Rep.*, **11** (2021) 230
- Y. Mizuguchi, Md. R. Kasem, T. D. Matsuda: “Superconductivity in CuAl₂-type Co_{0.2}Ni_{0.1}Cu_{0.1}Rh_{0.3}Ir_{0.3}Zr₂ with a high-entropy-alloy transition metal site” , *Mater. Res. Lett.*, **9** (2021) 141
- K. Hoshi, S. Sakuragi, T. Yajima, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Structural Phase Diagram of LaO_{1-x}F_xBiS₂: Suppression of the Structural Phase Transition by Partial F Substitutions” , *Condens. Matter*, **5** (2020) 81
- G. M. Pugliese, E. Paris, F. G. Capone, F. Stramaglia, T. Wakita, K. Terashima, T. Yokoya, T. Mizokawa, Y. Mizuguchi, N. L. Saini: “The local structure of self-doped BiS₂-based layered systems as a function of temperature” , *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **22** (2020) 22217
- K. Hoshi, M. Kimata, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, M. Nagao, Y. Mizuguchi: “Two-fold symmetry of in-plane magnetoresistance anisotropy in the superconducting states of BiCh₂-based LaO_{0.9}F_{0.1}BiS₂ single crystal” , *J. Phys. Commun.*, **4** (2020) 095028
- R. Jha, Y. Mizuguchi: “Unconventional isotope effect on transition temperature in BiS₂-based superconductor Bi₄O₄S₃” , *Appl. Phys. Express*, **13** (2020) 093001
- A. Yamashita, K. Kihou, H. Kunioka, H. Nishiate, A. Yamamoto, Y. Goto, Y. Mizuguchi, T. Iida, Y. Takano, C. H. Lee: “Thermoelectric properties of NaZn_{4-x}Cu_xAs₃ crystalized in the rhombohedral structure” , *J. Solid State Chem.*, **291** (2020) 121588
- A. Yamashita, R. Jha, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, C. Kawashima, K. Ishida, H. Takahashi, Y. Mizuguchi: “Evolution of two bulk-superconducting phases in Sr_{0.5}RE_{0.5}FBiS₂ (RE: La, Ce, Pr, Nd, Sm) by external hydrostatic pressure effect” , *Sci. Rep.* , **10** (2020) 12880
- R. Jha, Y. Goto, R. Higashinaka, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Improvement of superconducting properties by chemical pressure effect in Eu-doped La_{2-x}Eu_xO₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S₆” , *Physica C*, **876** (2020) 1353731
- A. Yamashita, R. Jha, Y. Goto, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “An efficient way of increasing the total entropy of mixing in high-entropy-alloy compounds: a case of NaCl-type (Ag,In,Pb,Bi)Te_{1-x}Se_x (x = 0.0, 0.25, 0.5) superconductors” , *Dalton Trans.*, **49** (2020) 9118

G. M. Pugliese, F. Stramaglia, F. G. Capone, M. Y. Hacısalıhoğlu, R. Kiyama, R. Sogabe, Y. Goto, S. Pollastri, D. Oliveira De Souza, L. Olivi, T. Mizokawa, Y. Mizuguchi, N. L. Saini: “Local structure displacements in $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{OBiSSe}$ as a function of Ce substitution” , *J. Phys. Chem. Solids*, **147** (2020) 109648

R. Jha, Y. Mizuguchi: “Superconductivity in $\text{La}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ -Type Bi-based Compounds: A Review on Element Substitution Effects” , *Condens. Matter*, **5** (2020) 27

R. Jha, Y. Goto, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “Superconductivity in Se-doped $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_2\text{Pb}_2\text{S}_{6-x}\text{Se}_x$ with a $\text{Bi}_2\text{Pb}_2\text{Ch}_4$ -type thick conducting layer” , *EPL*, **129** (2020) 67001

K. Morino, Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Crystal Structure and Thermoelectric Transport Properties of As-Doped Layered Pnictogen Oxyselenides $\text{NdO}_{0.8}\text{F}_{0.2}\text{Sb}_{1-x}\text{As}_x\text{Se}_2$ ” , *Materials*, **13** (2020) 2164

R. Kiyama, Y. Goto, K. Hoshi, R. Jha, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “Bulk Superconductivity Induced by Se Substitution in Self-Doped BiCh_2 -Based Compound $\text{CeOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ ” , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **89** (2020) 064702

E. Paris, B. Joseph, C. Marini, K. Terashima, T. Wakita, T. Yokoya, Y. Mizuguchi, T. Mizokawa, N. L. Saini: “High-pressure x-ray absorption and diffraction study of the self-doped superconductor EuFBiS_2 ” , *Phys. Rev. B*, **101** (2020) 214526

2) 著書

Y. Mizuguchi, A. Yamashita: “Superconductivity in HEA-Type Compounds” , *IntechOpen (Online book chapter)*, **2021** DOI: 10.5772/intechopen.96156

3) 特許

後藤陽介, 水口佳一, 中村尚人, 「異方性多結晶体及びその製造方法」, 出願日: 2020 年 11 月 30 日, 特願 2020-199146

水口佳一, 山下愛智, 「熱電材料, 熱電変換素子, 熱電発電モジュールおよびペルチェ冷却器」, 出願日: 2020 年 11 月 30 日, 特願 2020-199059

4) 学会講演

国内会議

● TMU Materials 2020 (オンライン (都立大主催), 2020 年 9 月 25 日)

M. Katsuno: “High-Pressure Synthesis and Superconducting Properties of NaCl-Type $\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$ ($x = 0-0.8$)”

K. Hoshi: “In-plane anisotropy of the magnetoresistance in the superconducting state for BiCh_2 -based superconductor”

S. Liu: “High pressure effects on superconducting properties and crystal structure of $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{Ag}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{S}_6$ ”

- A. Yamashita : “S isotope effect for high pressure phase of (Sr,La)FBiS₂ superconductor”
- T. Inui : “Synthesis of Ca-substituted four-layer-type BiS₂-based compound”
- Y. Shukunami : “Synthesis of RE123 superconductors with a high-entropy-alloy-type RE site”
- Md. R. Kasem : “Superconducting properties of HEA tellurides M-Te (M: Ag, In, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi) with a NaCl-type structure and atomic displacements”
- K. Shinozaki : “Thermoelectric properties and element substitution effects of EuIn₂As₂”
- N. Nakamura : “Axis-dependent carrier polarity of polycrystalline NaSn₂As₂ and its potential”
- ISSP ワークショップ (オンライン (物性研主催) 9 月 24, 28–29 日)
- 水口 佳一 : “Bi 系層状超伝導体の特性制御” (招待講演)
- TCTFN2020 (オンライン (都立大主催) 12 月 1 日)
- 後藤 陽介 : “Axis-dependent carrier polarity in NaSn₂As₂” (招待講演)
- 2021 年日本物理学会年次大会 (オンライン 3 月 12–15 日)
- 水口 佳一 : “BiS₂ 系層状超伝導体の発見と超伝導発現条件の解明” (若手奨励賞記念講演)
- 劉 蘇鵬 : “多層型伝導層を持つ層状超伝導体 La₂O₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S₆ の圧力下超伝導相図”
- 中村 尚人 : “多結晶 NaSn₂As₂ の異方的なキャリア極性”
- Md. Riad Kasem : “Superconductivity in High-Entropy-Alloy-type compound TrZr₂” (英語講演)

国際会議

- REWS2020 2020 年 10 月 28–29 日 (Online, Organized by Muroran Tech.)
- A. Yamashita : “Possible pairing mechanism switching by structural symmetry breaking in (Sr,La)FBiS₂” (Invited)

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や無機ナノチューブ・ナノワイヤ、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・磁性・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。2020年度は、新型コロナ感染拡大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

薄膜熱伝導測定技術の開発 近年、フレキシブルディスプレイといった柔らかな材料は様々なデバイス応用をなされている。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多く有しており、その界面において、熱および電荷がどのような関係で流れているのかを正しく理解することは基礎・応用の両面から重要な課題である。特にナノスケール薄膜の状態での熱伝導を正しく評価する測定技術が必要不可欠である。例えば、単層カーボンナノチューブや有機ポリマーといったフレキシブル材料の薄膜は、厚み数 10nm の薄膜である為、その熱伝導率を評価するのは通常的手法では非常に困難である。唯一、時間領域サーモリフレクタンス法 (TDTR 法) が、その熱伝導を評価することが可能である。本研究室では、薄膜の電気伝導率と熱伝導率との相関を明らかにする為、電気化学的手法も組み合わせた TDTR 測定技術の開発を行っている。TDTR 法とは、フェムト秒のパルスレーザーを用い、ポンププローブ分光手法を用いて、金属薄膜ターゲットの反射率の時間変化を明らかにすることで、熱の伝播を解き明かす手法である。通常の TDTR 法では、アルミを金属基板として用いるが、アルミは電気化学的に極めて弱い為、我々が目的とする手法に向いていない。電気化学反応に強く、電極として一般的に用いられる金をターゲットとする為には、金の反射率変化を感度よく検出できる波長 520nm を検出光源とした新たな TDTR 法の開発をする必要があった。産総研八木先生の指導のもと、本研究室では、新規 TDTR 系の構築を達成した。金 TDTR 系と電気化学手法を組み合わせた独自の研究を展開している。

ファンデルワールス界面系の熱伝導の解明と制御 ファンデルワールス界面における熱・電荷流を実験的に解き明かす為、二次元材料である遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) を研究対象とした研究を進めた。単層や数層 TMDC では、単に金表面に試料を配置した TDTR 測定では、試料の比熱しか求めることができない。しかし、特定の熱浸透率を有するポリマー等を試料の上に形成することにより、試料の熱伝導を評価することが可能となった。4層または5層のホモもしくはヘテロ積層した試料を作製し、TDTR 測定を行い、その熱伝導の評価を行った。その結果、転写法ではなく合成で4層積層した試料が最も熱伝導が大きく、ヘテロで一層ずつ転写した試料が最も熱伝導が低く、両者の差は20倍以上あった。界面の接合の仕方で大きく熱伝導が変化することを明らかにした。また更に、過塩素酸カリウムをイオンとして用いて、インターカレーションによる熱伝導を制御する研究を進め、転写した試料において熱伝導が変化する知見を得た。

単層カーボンナノチューブ薄膜における熱伝導とキャリア密度との関係解明 単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電特性を理解する為には、その熱伝導率のキャリア密度依存性の解明が必要不可欠である。そこで、金をトランスデューサとして用いた TDTR 測定の特徴を生かし、電気化学的手法と組み合わせ、イオンゲルを電解質として用いた電解質ゲーティングと TDTR 測定を同時に行う測定を行った。キャリア密度を二桁変調させたが、半導体型 SWCNT 薄膜の熱伝導率は実験精度の範囲で変化が見られなかった。キャリア密度と薄膜熱伝導の相関を解明したはじめての研究成果である。熱伝導率の変化が見られなかった背景を詳細に明らかにしていくこと、更に、ゼーベック係数・電気伝導率との相関を明らかにすることが今後の課題である。

2) ナノ物質における新規物性探索と制御

ナノチューブの熱電物性と次元性 単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の熱電物性はこれまで数多く研究がなされているが、1 本にみられる 1 次元電子構造が、SWCNT が束となり、更に薄膜となった構造において現れるのかは未解明な課題であった。金属型 SWCNT においては、ゼーベック係数と電気伝導率が同時に増大するという熱電特性トレードオフの破れが一次元電子構造に由来する特徴的な振る舞いとして実験・理論の両面で解き明かしてきた。一方、半導体型 SWCNT においては、次元性と熱電特性との相関は未解明の課題であった。そこで、東京理科大山本先生と連携して、理論・実験の両面で解析を進め、通常の熱電特性であるゼーベック係数やパワーファクタには、次元性の特徴は現れないが、熱電伝導率 (L_{12}) の形は、電子構造の次元性を顕著に反映した振る舞いが見られることを明らかにし、高純度 (6,5) 型 SWCNT 薄膜において一次元性を反映した L_{12} の振る舞いが見られることを明らかにした。

ナノチューブの熱電特性の温度依存性 SWCNT 薄膜におけるゼーベック係数の温度依存性は、常に温度減少とともに値が小さくなる金属的もしくは Variable Range Hopping 的な振る舞いを示す報告がなされていた。しかし、半導体型 SWCNT 薄膜においては、その電子構造を反映したゼーベック係数と電気伝導率との関係が表れており、伝導機構のみでゼーベック係数の振る舞いを説明することは困難であった。ゼーベック係数の振る舞いの背景を理解する為、系統的にフェルミレベルを改変した状況で、ゼーベック係数の温度依存性を解き明かし、その物理的背景の理解を進めた。金属型 SWCNT 薄膜や半導体型 SWCNT 薄膜のバンド内にフェルミレベルが位置する際には、温度低下とともにゼーベック係数が減少する通常の振る舞いが見られた。しかし、半導体型 SWCNT 薄膜においてバンドギャップ内にフェルミレベルが位置する際、温度低下とともにゼーベック係数が増大する特異な振る舞いが見いだされた。現在、その背景の理解を進めている。

ナノチューブにおける高次高調波発生とその制御 高強度の中赤外レーザーパルスを照射することにより、10 数次に及ぶ高次高調波が固体から発生することが近年明らかになり、固体系における極端非線形光学という新たな研究分野が立ち上がってきた。当研究室は、京都大学田中耕一郎研究室と共同で、SWCNT 系における高次高調波発生とその制御の研究を進め、系統的に電子構造が異なる SWCNT における高次高調波発生を解明し、更には、(6,5) 型 SWCNT 薄膜において電解質ゲーティングと高次高調波発生測定とを組み合わせ、キャリア注入制御により高次高調波の増強や減少を世界ではじめて制御することを達成した。その起源を、二準位系の密度行列の時間発展の計算を行い、増強については非線形電流の増加に由来し、減少については非線形分極の現象が支配的であることを明らかにした。増大・減少が、高調波光のエネルギーとバンドギャップエネルギーとが関係することが示唆されており、今後、TMDC 系においても検証を進める。

一次元遷移金属カルコゲナイドナノチューブの新規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、カイラル構造に由来して、非従来型超伝導やバルク光電効果といった新たな物性が報告され、現在活発に研究がなされている。しかし、TMDC-NT は、古くからその合成手法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、新たな合成法に着手し、MoS₂ ナノチューブ、MoSe₂ ナノチューブなどの新規合成を進めた。

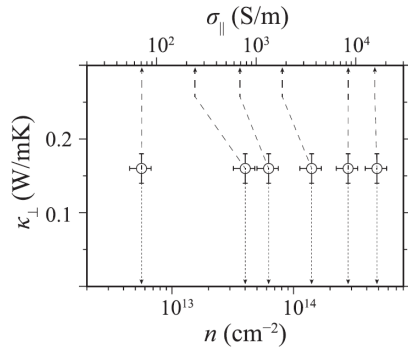


図 1: 半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜における熱伝導率とキャリア密度との関係

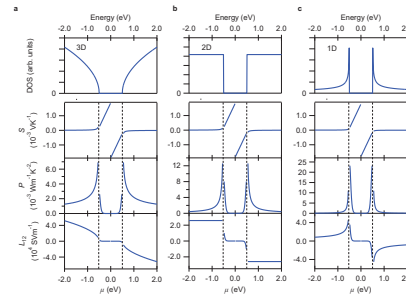


図 2: 半導体の次元性と熱電特性 (ゼーベック係数, パワーファクタ, L_{12}) との関係. L_{12} にのみ次元性を反映した顕著な違いが見られる.

2. 研究業績

1) 論文

K. Ueji, Y. Matsuoka, T. Yagi, Y. Yomogida, Y. Ichinose, A. Yoshida, and K. Yanagi: "In situ time-domain thermoreflectance measurements using Au as the transducer during electrolyte gating", *Appl. Phys. Lett.*, **117** (2020) 133104

H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, J. Pu, M. Maruyama, T. Endo, C. Ando, H. Shimizu, K. Yanagi, S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata: "Wafer-Scale Growth of One-Dimensional Transition-Metal Telluride Nanowires", *Nano Lett.*, **21** (2020) 243

H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, Y. Ichinose, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Tanaka, K. Yanagi: "Control of high-harmonic generation by tuning the electronic structure and carrier injection", *Nano Lett.*, **20** (2020) 6215

N. Komatsu, M. Nakamura, S. Ghosh, D. Kim, H. Chen, A. Katagiri, Y. Yomogida, W. Gao, K. Yanagi, J. Kono: "Groove-assisted global spontaneous alignment of carbon nanotubes in vacuum filtration", *Nano Lett.*, **4** (2020) 1941-1946

F. Fedi, O. Domanov, H. Shiozawa, K. Yanagi, P. Lacovig, S. Lizzit, A. Goldoni, T. Pichler, P. Ayala: "Direct observation of cross-polarized excitons in aligned single-chirality single-wall carbon nanotubes", *J. Mater. Chem. A*, **8** (2020) 9753

Y. Yomogida, Y. Kainuma, T. Endo, Y. Miyata, K. Yanagi: "Synthesis and ambipolar transistor properties of tungsten diselenide nanotubes", *Appl. Phys. Lett.*, **116** (2020) 203106

Y. Yomogida, T. Tanaka, M. Tsuzuki, X. Wei, H. Kataura: "Automatic Sorting of Single-Chirality Single-Wall Carbon Nanotubes Using Hydrophobic Cholates: Implications for Multicolor Near-Infrared Optical Technologies", *ACS Appl. Nano Mater.*, **3** (2020) 11289

蓬田陽平, 柳和宏, 田中涼雅: 遷移金属カルコゲナイドナノチューブの製造方法, 特願 2021-25512

2) 学会講演

● 第 59 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 2020 年 9 月 16–18 日 (オンライン)

Y. Ichinose, M. Matsubara, Y. Yomogida, A. Yoshida, K. Ueji, K. Kanahashi, J. Pu, T. Takenobu, T. Yamamoto, K. Yanagi: One dimensionality of the thermoelectric properties in semiconducting single walled carbon nanotubes

R. Tanaka, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of NbSe₂ nanowires by selenization of niobium oxide nanowires

M. Nagano, Y. Yomogida, Y. Miyata, and K. Yanagi: Tellurization of solution-synthesized tungsten oxide nanowires

H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, Y. Ichinose, J. Eda, H. Okubo, Y. Yomogida, K. Tanaka, K. Yanagi: Fermi-level dependence of high-harmonic generation in semiconducting single-walled carbon nanotubes with different bandgaps

A. Yoshida, Y. Ichinose, K. Fukuhara, K. Ueji, Y. Yomogida, K. Yanagi: Temperature dependence of Seebeck coefficients in semiconducting and metallic single wall carbon nanotubes

K. Ueji, Y. Matsuoka, T. Yagi, Y. Yomogida, Y. Ichinose, A. Yoshida, and K. Yanagi: Unravelling the Thermal Conductivity of Semiconducting Carbon Nanotubes Film with Different Doping Levels

● 第 60 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 3 月 1–3 日 (オンライン)

K. Ueji, Y. Ichinose, Y. Matsuoka, Y. Yomogida, T. Yagi, J. Kono, and K. Yanagi: Unraveling Thermoelectric Dimensionless Figure-of-Merit of Aligned Single-Walled Nanotube Thin-Film

R. Tanaka, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: High-yield synthesis of MoS₂ and MoSe₂ nanotubes

M. Nagano, Y. Yomogida, H. Hamasaki, K. Hirahara, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of WTe₂ nanowires by tellurization of tungsten oxide nanowires and origin of non-formation of tubular structure

Y. Hosokawa, Y. Yomogida, K. Yanagi: Circular dichroism spectra on this films of Helicity Selected Single-wall Carbon Nanotubes

H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, K. Kawahara, J. Eda, H. Okubo, Y. Yomogida, H. Ago, K. Tanaka, K. Yanagi: Gate-tuned high-harmonic generation in metallic single-walled carbon nanotubes and graphene

A. Katagiri, K. Ueji, Y. Matsuoka, J. Eda, H. Okubo, Y. Yomogida, J. Kono, T. Yagi, and K. Yanagi: Thermal boundary resistance of aligned films of single-walled carbon nanotube using time-domain thermoreflectance method

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, and K. Yanagi: Tuning Thermal Properties of 2D van der Waals Molybdenum Disulfide-based Structures via Hetero/homo-interfacial Engineering

● 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12–15 日（オンライン）

一ノ瀬 遙太, 松原 愛帆, 蓬田 陽平, 吉田 朱里, 上治 寛, 金橋 魁利, 蒲 江, 竹延 大志, 山本 貴博, 柳 和宏: 半導体型ナノ材料における熱電物性の一次元性

● 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 2021 年 3 月 16–19 日（オンライン）

上治 寛, 松岡 勇也, 八木 貴志, 蓬田 陽平, 一ノ瀬 遙太, 吉田 朱里, 柳 和宏: 電解質ゲートにおけるその場時間領域サーモフレクタンス測定

上治 寛, 片桐 温寛, 松岡 勇也, 武藤 暢宏, 蓬田 陽平, 八木 貴志, 河野 淳一郎, 柳 和宏: 配列制御単層カーボンナノチューブ薄膜を用いた界面熱抵抗制御

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, and K. Yanagi: Tuning Thermal Conductance Across Vertically Stacked Two-dimensional van der Waals Materials via Interfacial Engineering

国際会議

● 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2020) 2020 年 11 月 9–12 日（Online）

K. Ueji, Y. Matuoka, N. Muto, K. Watanabe, T. Yagi, Y. Ichinose, A. Yoshida, Y. Yomogida, T. Takenobu, and K. Yanagi: Development of In Situ Time-domain Thermoreflectance for Flexible Thin Films during Electrolyte Gating

Y. Ichinose, M. Matsubara, Y. Yomogida, A. Yoshida, K. Ueji, K. Kanahashi, J. Pu, T. Takenobu, T. Yamamoto, K. Yanagi: Dimensionality of Thermoelectric Properties in Low Dimensional Semiconducting Materials

Y. Yomogida, R. Tanaka, M. Nagano, Y. Miyata and K. Yanagi: Synthesis of 1D Transition-Metal Dichalcogenides by Chalcogenization of Transition-Metal Oxide Nanowires

W. Yuan, K. Ueji, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, and K. Yanagi: Tuning Thermal Properties of 2D van der Waals Molybdenum Disulfide-based Structures via Hetero/homo-interfacial Engineering

● Workshop on Thermal and Charge Transport across Flexible Nano-Interfaces (TCTFN2020) 2020 年 12 月 1 日（Online）

K. Ueji: In situ Time-domain Thermoreflectance Study on the Thermal Conductivity of Flexible Transistor with Ionic Gel

ナノ物性研究室

1. 研究活動の概要

グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) 等の原子層物質（二次元物質）、カーボンナノチューブ (CNT) 等の一次元物質などのナノメートルサイズの構造を有する物質系では、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、このようなナノ構造物質系において、新規物性の探索とその発現機構について、試料作製と物性実験の種々の手法を用いて研究している。2020 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結晶成長と物性解明

原子層物質のヘテロ構造は、従来にはない人口二次元構造として、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。われわれは、化学気相成長を利用し、二硫化モリブデンや二硫化タングステンなどの遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) の原子層を合成し、その光・電子物性について研究を進めている。2020 年度は、二次元半導体ヘテロ界面の励起子光物性（和田修士論文）、二次元超格子の気相成長と評価（橋本卒業研究）、二次元半導体への電界ドーピング（山口卒業研究）、二セレン化ニオブ結晶の合成と評価（三宅卒業研究）などについて研究を進めてきた。今後、多様な組成・構造を持つ TMDC やそのヘテロ構造の合成法の開発を進め、その電気伝導や励起子光物性などの物性解明を通じ、光・電子デバイス応用への展開も見据えた研究を進めていく。

2) 原子細線の合成と物性解明

3 原子程度の直径を持つ、遷移金属モノカルコゲナイド原子細線は、その一次元構造に由来する電子状態や光学応答が注目を集めている。しかしながら、これまでの研究では、試料の合成法は限られており、その光学応答や電子状態の研究はほとんどなされていない。今年度は、化学気相成長を利用した大面積試料の合成に成功し、その電気伝導特性（安藤修士論文）や熱電変換機能（戸谷卒業研究）の研究を行ってきた。今後、その試料の集合状態に起因した電子状態や電子輸送特性に関する研究を進めていく。

3) 学外共同利用施設による研究、その他

産業技術総合研究所 NPF において共同利用研究を行った。課題名（課題番号）：細線状の遷移金属カルコゲナイドの電気伝導特性の評価（20009034, 代表 中西）

名古屋大学微細加工プラットフォームにおいて共同利用研究を行った。課題名（課題番号）：遷移金属チオハライド層状結晶の新奇二次元物質の構造決定（F-20-NU-0069, 代表 中西）

2. 研究業績

1) 論文

K. Kato, K. Takaba, S. Maki-Yonekura, N. Mitoma, Y. Nakanishi, T. Nishihara, T. Hatakeyama, T. Kawada, Y. Hijikata, J. Pirillo, L. T. Scott, K. Yonekura, Y. Segawa, K. Itami: "Double-helix supramolecular nanofibers assembled from negatively curved nanographenes", *J. Am. Chem. Soc.*, **143** (2021) 5465

T. Takahashi, C. Ando, M. Saito, Y. Miyata, Y. Nakanishi, J. Pu, T. Takenobu: "Three-dimensional networks of superconducting NbSe₂ flakes with nearly isotropic large upper critical field", *npj 2D Mater. Appl.*, **5** (2021) 31

- 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) SCCD02-1-5
- T. Inoue, T. Saito, K. Takei, T. Arie, Y. Miyata, S. Akita: "Light-induced persistent resonance frequency shift of MoS₂ mechanical resonator" *Appl. Phys. Express*, **14** (2021) 035003
- S. Gupta, F. Rortais, R. Ohshima, Y. Ando, T. Endo, Y. Miyata, M. Shiraishi: "Approaching barrier-free contacts to monolayer MoS₂ employing [Co/Pt] multilayer electrodes" *NPG Asia Materials*, **13** (2021) 13
- W. H. Chang, N. Okada, M. Horikawa, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: "ALD-ZrO₂ Gate Dielectric with Suppressed Interfacial Oxidation for High Performance MoS₂ Top Gate MOSFETs" *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60** (2021) SBBH03
- H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, J. Pu, M. Maruyama, T. Endo, C. Ando, H. Shimizu, K. Yanagi, S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata: "Wafer-Scale Growth of One-Dimensional Transition-Metal Telluride Nanowires", *Nano Lett.*, **21** (2021) 243-249
- K. Nagai, K. Uchida, N. Yoshikawa, T. Endo, Y. Miyata, K. Tanaka: "Dynamical symmetry of strongly light-driven electronic system in crystalline solids", *Commun. Phys.*, **3** (2020) 137
- H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, Y. Ichinose, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Tanaka, K. Yanagi: "Control of High-Harmonic Generation by Tuning the Electronic Structure and Carrier Injection" *Nano Lett.*, **20** (2020) 6215-6221
- N. Kanda, Y. Nakanishi, D. Liu, Z. Liu, T. Inoue, Y. Miyata, D. Tomanek, H. Shinohara: "Efficient growth and characterization of one-dimensional transition metal tellurides inside carbon nanotubes" *Nanoscale*, **12** (2020) 17185-17190
- T. Taniguchi, L. Nurdiwijayanto, S. Li, H. E. Lim, Y. Miyata, X. Lu, R. Ma, D.-M. Tang, S. Ueda, K. Tsukagoshi, T. Sasaki, M. Osada: "On/Off Boundary of Photocatalytic Activity between Single- and Bilayer MoS₂" *ACS Nano*, **14** (2020) 6663-6672
- Y. Yomogida, Y. Kainuma, T. Endo, Y. Miyata, K. Yanagi: "Synthesis and ambipolar transistor properties of tungsten diselenide nanotubes" *Appl. Phys. Lett.*, **116** (2020) 203106

2) 特許

宮田耕充, 中西勇介, 林宏恩, 遠藤尚彦, 安藤千里「導電膜, 導電部材及び導電膜の製造方法」(出願番号: 2020-079285) 東京都立大学, 特許出願中.

3) 学会講演

● 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 2020 年 9 月 8-11 日 (オンライン)

Y. Miyata: Growth and device applications of in-plane heterostructures based on layered chalcogenides

T. Takahashi, J. Pu, C. Ando, Y. Nakanishi, M. Saito, Y. Miyata, T. Takenobu: Superconductivity of CVD-grown large-area NbSe₂ thin films

K. Ho, M.-Y. Li, J.-K. Huang, N. Wada, W. Zhang, Y. Miyauchi, K. Matsuda, Y. Miyata, L.-J. Li, T. Takenobu: Atomically thin lateral heterojunction light-emitting devices

茂木裕幸, 菊地隆生, 水野良祐, 和田尚樹, 宮田耕充, 吉田昭二, 武内修, 重川秀実: 光励起多探針 STM を用いた WS₂/WSe₂ 面内ヘテロ接合デバイス評価

● 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 8-11 日 (オンライン)

永井恒平, 内田健人, 草場哲, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 田中耕一郎: 薄層 WSe₂ における高次高調波発生の光キャリアドーピング効果

● 第 84 回 半導体・集積回路技術シンポジウム, 2020 年 9 月 15-16 日 (オンライン)

入沢寿史, 岡田直也, 岡田光博, 張文馨, 浅井栄大, 福田浩一, 遠藤尚彦, 宮田耕充: 2D 材料遷移金属ダイカルコゲナイドの LSI 応用へ向けた挑戦

● 第 57 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, 2020 年 9 月 16-18 日 (オンライン)

Y. Nakanishi, N. Kanda, C. Ando, M. Nagata, Z. Liu, T. Shiga, K. Suenaga, H. Shinohara, Y. Miyata: Bottom-Up Growth of One-dimensional Transition Metal Chalcogenides and Their Characterization

H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, J. Pu, T. Endo, C. Ando, H. Shimizu, K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Miyata: Wafer-scale synthesis of 1D transition metal chalcogenide nanowires

C. Ando, Y. Nakanishi, H. Shimizu, H. E. Lim, Z. Liu, T. Endo, Y. Miyata: Electrical Conductivity of Chemical-Vapor-Deposition Grown WTe Nanowire Bundles

H. Ogura, Y. Murai, T. Irisawa, Z. Liu, H. Shimizu, H. E. Lim, Y. Nakanishi, T. Endo, R. Kitaura, Y. Miyata :

M. Nagano, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Tellurization of solution-synthesized tungsten oxide nanowires

N. Wada, J. Pu, T. Yamada, W. Zhang, Z. Liu, Y. Nakanishi, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata: Anomalous electroluminescence from WS₂ /WSe₂ in plane heterostructures

R. Tanaka, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of NbSe₂ nanowires by selenization of niobium oxide nanowires

H. Shimizu, J. Pu, H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, T. Endo, T. Takenobu, Y. Miyata: Electron transport properties of WTe nanowire networks

H. G. Ji, P. Solís-Fernández, D. Yoshimura, M. Maruyama, T. Endo, Y. Miyata, S. Okada, H. Ago: Chemically tuned p- and n-type WSe₂ monolayers with improved carrier mobility for electronic applications

Y. Murai, S. Yoshida, Z. Liu, T. Irisawa, H. Shimizu, H. Ogura, T. Endo, Y. Miyata, R. Kitaura: A controllable post doping method for TMD atomic layers

T. Takahashi, C. Ando, M. Saito, Y. Miyata, Y. Nakanishi, J. Pu, T. Takenobu: Superconducting properties in three-dimensional networks of NbSe₂ films

● 化学系学協会北海道支部 2021 年冬季研究発表会 2021 年 1 月 26-27 日 (オンライン)

H. Sakamoto, T. Endo, Y. Miyata, K. Ueno: Fabrication and spectral properties of metal/transition metal dichalcogenide nanostructures

● 第 60 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 3 月 1-3 日 (オンライン)

Y. Nakanishi, N. Kanda, Z. Liu, M. Aizaki, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Y. Miyata: Self-assembly of metal-chalcogenide clusters into layered 2D materials

N. Kanda, Z. Liu, M. Aizaki, M. Maruyama, S. Okada, H. Shinohara, Y. Miyata, Y. Nakanishi: Self-assembly of two-dimensional structures composed of tetrahedral molybdenum clusters

K. Shimogami, M. Kishibuchi, H. Inoue, L. Zheng, Y. Miyata, Y. Hayashi, H. Suzuki: One-dimensional growth of WS₂ by chemical vapor deposition

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi: Tuning Heat Flow Across Two-dimensional Layered van der Waals Materials via Interfacial Mismatch and Coupling Engineering

H. Shimizu, J. Pu, Z. Liu, H. E. Lim, Y. Nakanishi, T. Endo, K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Miyata: Two-dimensional electron gas in laterally-assembled WTe atomic wires

M. Kaneda, Y. Nakanishi, H. E. Lim, T. Endo, Y. Miyata: Preparation of twisted bilayers by folding monolayer WS₂

S. Suzuki, H. Ogura, Y. Nakanishi, H. E. Lim, T. Endo, Y. Nonoguchi, Y. Miyata: Fabrication and transport properties of PN diodes based on chemically-doped few-layer WSe₂

H. Ogura, M. Kaneda, Y. Nakanishi, Y. Nonoguchi, J. Pu, M. Ohfuchi, T. Irisawa, H. E. Lim, K. Yanagi, T. Endo, T. Takenobu, Y. Miyata: Air-Stable, Efficient Electron Doping of Monolayer MoS₂ by Salt-Crown Ether Treatment

M. Nagano, Y. Yomogida, H. Hamasaki, K. Hirahara, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of WTe₂ nanowires by tellurization of tungsten oxide nanowires and origin of non-formation of tubular structure

R. Tanaka, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: High-yield synthesis of MoS₂ and MoSe₂ nanotubes

● 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 2021 年 3 月 16-19 日 (オンライン)

W. H. Chang, N. Okada, M. Horikawa, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: Top-gate monolayer MoS₂ MOSFETs with ZrO₂ gate dielectrics formed by low temperature ALD

H. Wen, S. Sugioka, N. Kanda, J. Li, T. Inose, Y. Miyata, Y. Nakanishi, K. Hirai, Y. Fujita, H. Uji-i: Nanoscale characterisation of carbon nanomaterials using tip-enhanced Raman spectroscopy

W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi: Tuning Thermal Conductance Across Two-dimensional Layered van der Waals Materials via Interfacial Mismatch and Coupling Engineering

村井雄也, 劉崢, 入沢寿史, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 吉田昭二, 岡田晋, 北浦良: ポストドーピングによる遷移金属カルコゲナイド原子層の p/n 型制御

● 日本化学会 第 101 春季年会 2021 年 3 月 19-22 日 (オンライン)

中西勇介: 一次元ナノ空間を用いた遷移金属カルコゲナイドの未踏ナノ構造の創出

国際会議

● SSDM2020, Sep. 27-30, 2020

Y. Miyata: Growth of transition-metal-dichalcogenide in-plane heterostructures

W. H. Chang, N. Okada, M. Horikawa, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: ALD-ZrO₂ Gate Dielectric with Suppressed Interfacial Oxidation for High Performance MoS₂ Top Gate MOSFETs

● IRMMW-THZ 2020, Nov. 8-13, 2020

K. Nagai, K. Uchida, S. Kusaba, T. Endo, Y. Miyata, K. Tanaka: Photo-carrier doping effect on high-order harmonic generation in monolayer WSe₂

● 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2020), Nov. 9-12, 2020

H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, J. Pu, T. Endo, C. Ando, H. Shimizu, K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Miyata: Controlled, Wafer-Scale Growth of Transition Metal Chalcogenide Nanowires

H. Ogura, Y. Nonoguchi, T. Irisawa, T. Endo, H. E. Lim, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Transport and optical properties of salt-coordinated monolayer MoS₂

H. Shimizu, J. Pu, H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, T. Endo, T. Takenobu, Y. Miyata: Electron transport properties of one-dimensional transition metal chalcogenide networks

Y. Yomogida, R. Tanaka, M. Nagano, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of 1D Transition-Metal Dichalcogenides by Chalcogenization of Transition-Metal Oxide Nanowires

W. Yuan, K. Ueji, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi: Effects of Thickness and Interfacial Coupling on The Thermal Transport of Two-Dimensional Molybdenum Disulfide Homogeneous Structures

● 2020 Virtual MRS Fall Meeting and Exhibit, Nov. 27-Dec. 4, 2020

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

H. Ogura, Y. Nonoguchi, T. Irisawa, T. Endo, H. E. Lim, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Efficient Electron Doping of Monolayer MoS₂ by Salt-Crown Ether Treatment

H. Shimizu, J. Pu, H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, T. Endo, T. Takenobu, Y. Miyata: Electron Transport of Transition Metal Chalcogenide Nanowire Networks

編集後記

本学報告はコロナウィルスの影響で思うように研究が進められなかったり、学会や国内・国際会議が中止・延期あるいはオンライン開催となった中、必死に研究活動を維持した記録が残されていると思われる。研究・教育において時事刻々と変化する状況に対応することは重要だと思うが、なかなか難しいことであったように思う。現在も緊急事態宣言の最中であり、感染対策を万全に行った上で新しい形での対面授業がはじまり、教員・職員・学生はその対応に追われている。ワクチン接種も徐々に始まっているものの、まだまだ日常には程遠い現状である。当たり前のことが当たり前でなくなって一年が経った。これらでの経験が、また新しい知・技術として蓄積されバネとなり、この困難が去った後にまた一つ大きな力となることを願うばかりである。

私ごとで恐縮ではあるが、2020年6月に出産を経験した。出産はいつの時も一大事業だと思うが、コロナ禍の中の出産はまさに大変の一言であった。多くの方々に柔軟に対応・お世話をしていただき、無事出産を終えることができたこと、この場を借りて御礼を申し上げたい。さて、そのように劇的に状況が変化した中、なかなか状況に馴染めずにいた私ではあるが、最近やっと状況に慣れて来たように思う。ひとえに様々な方のお力添えのおかげだと思う。いまだにコロナ禍の中、困難な状況下ではあるが、なんとか乗り越えられるように努力しようと思うこの頃である。

(荒畑恵美子 記)

2020年度 年次報告編集委員
青木勇二（2020年度物理学教室主任）
荒畑恵美子
蓬田陽平