

研究室活動状況 2025 年度

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

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

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

素核宇宙グループ

1. 研究活動の概要

素核宇宙グループは、素粒子理論分野、高エネルギー理論分野、原子核ハドロン物理分野、および宇宙理論分野からなる大講座である。

1) 素粒子理論 (素粒子宇宙論分野: Yin)

アキシオン暗黒物質の生成機構の計算 QCD アキシオンおよび ALP 暗黒物質の宇宙論において、初期宇宙における非線形遷移、レベル交差、非零運動量モードの効果を取り入れた暗黒物質生成量の計算をすすめた。特に、非相対論的な運動量をもつアキシオン場であっても、ポテンシャル高を超えるエネルギー密度をもつ場合には相対論的成分として振る舞うことを示し、最小 ALP 暗黒物質模型に対する頑健な制限を導出した。また、非線形遷移により断熱不変量が保存されない領域を解析し、実験探索で重要となる小さい崩壊定数領域におけるアキシオン存在量とスペクトルの評価を精密化した。

QCD アキシオン領域壁問題の解析 QCD アキシオン理論において、軽いアキシオンまたは質量のないアキシオンを導入することで、領域壁問題を解決する新しい機構を解析した。この機構では、QCD アキシオンと軽いアキシオンの混合により、QCD アキシオンの領域壁が軽いアキシオンのストリングに束縛され、宇宙論的に安全なストリング・壁ネットワークへと変化する。さらに、多重アキシオン模型におけるトポロジカル欠陥の進化を調べ、低エネルギーでは一つの有効 PQ スカラー理論に見える場合でも、実際のストリング・領域壁ネットワークの進化が単一アキシオン模型とは定性的に異なることを明らかにした。

宇宙壁と重力波信号の計算 初期宇宙で形成される領域壁およびバブル壁の時間発展を計算し、それらが生成する重力波信号と直接検出可能性を調べた。インフレーション中の長波長ゆらぎをもつ領域壁は、熱的初期条件で形成される領域壁に比べてポテンシャルバイアスに対して安定であり、崩壊寿命と重力波スペクトルが有意に変化することを示した。また、宇宙壁が地球を通過した際に鉱物中に残す損傷飛跡に着目し、古代鉱物を用いる paleodetector による宇宙壁の直接探索法を提案した。

暗黒光子の実験探索感度の計算 標準模型を拡張する暗黒光子理論において、アンジュレータ放射を用いた light-shining-through-a-wall 探索の感度を量子論的に再評価した。従来の単純な光子-暗黒光子振動公式では無視されがちな有限波束効果、光源の微視的構造による運動学的抑制、壁および空気中での混合抑制・増強を取り入れ、暗黒光子質量と媒質の屈折率に依存して感度が大きく変化することを示した。さらに、シンクロトロン放射施設における放射線安全モニターを用いた寄生的探索を提案し、eV 質量領域の暗黒光子混合に対して競争力のある制限を与えられることを示した。

低スケールインフレーションと重力波の計算 単一場低スケールインフレーション模型において、インフレーション終期に発生するタキオン不安定性とその非線形発展を解析した。十分に低いインフレーションスケールでは、場の振動が確立する前にタキオン不安定性が急速に成長し、トンネル効果やポテンシャル障壁を伴わない一次相転移的な衝撃波構造が形成される。このハッブルスケールのタキオンの衝撃波の衝突により重力波が生成され、MeV から EeV 程度の低スケールインフレーションをパルサータイミングアレイ、地上重力波検出器、将来の宇宙重力波実験で検証できることを示した。

Higgs 型インフレーションと超重暗黒物質の解析 インフレーション模型において、ACT, Planck, BICEP/Keck, DESI の観測結果を踏まえ、Higgs 型インフレーションの予言を再検討した。Jordan frame のポテンシャルに二次質量項を加えることで、スカラー摂動のスペクトル指数を上昇させ、最新観測と整合的な模型を構成できることを示した。また、自然インフレーションにおいてインフラトンが超重暗黒物質として振る舞う模型を解析し、最高エネルギー宇宙線および高エネルギーニュートリノ事象と関連する多重メッセンジャー信号を調べた。

Peccei–Quinn 模型の構成と現象論 QCD アキシオンを強い CP 問題の解決および暗黒物質候補として用いる Peccei–Quinn 模型において、巨大な PQ スケールを新しい高エネルギー階層として導入する代わりに、大きな波動関数繰り込みをもつ feebly-interacting PQ 模型を構成した。この模型では、電弱スケール近傍の新粒子、軽い PQ Higgs 粒子、アキシオンおよび PQ Higgs を含む暗黒物質宇宙論が予言される。さらに、第五の力探索、暗黒物質直接検出、加速器実験、重力波観測により検証可能な現象論を調べた。

2) 暗黒物質の自己相互作用による矮小銀河のコア形成 (素粒子理論分野：北澤)

宇宙の構造形成において、標準的な相互作用をしない暗黒物質では小さなスケールの構造が説明できないという問題がある。例えば、我々の銀河系の伴銀河としての矮小銀河の中心部に暗黒物質のコアができていているという観測結果がうまく説明できない。暗黒物質が自己相互作用するものであるとすると、熱重力収縮という効果により、大規模構造についての成功している説明を変えることなく、自然にコアができることが知られている。熱重力収縮に引き続いて重力崩壊が起きれば、矮小銀河の中心にあるブラックホールの起源を説明することができる。通常物質も十分に大量にあれば暗黒物質のコアを形成することが知られているので、銀河系の伴銀河の中で通常物質の量が少ないものの一つを例に取り、その説明のために必要な相互作用の強さを見積もってみると、観測による制限値よりも 1 桁大きくなければならないことがわかった。

3) 暗黒物質の自己相互作用による散在低表面輝度銀河のコア形成 (素粒子理論分野：北澤)

我々の銀河系の伴銀河としての矮小銀河のコアは通常物質や伴銀河同士の衝突などで形成されると理解して、もっと純粋に暗黒物質の効果のみを見ることができそうな天体を探した。散在低表面輝度銀河という他の多くの銀河から重力的に離れて存在し、しかも通常物質が暗黒物質に比べて非常にわずかしかな含まれない天体があることを知った。現在、この天体を使って暗黒物質の自己相互作用の可能性を考察している。

4) 原子核ハドロンの物理の理論 (原子核ハドロンの物理分野：兵藤)

散乱観測量との対応を考慮したエキゾチックハドロンの内部構造の解明

近年、ハドロンの物理において、従来のメソン・バリオンの枠組みを超えたエキゾチックハドロンの研究が大きく進展している。特に、 $X(3872)$ をはじめとする多数の候補状態の発見により、それらの内部構造がコンパクトな多クォーク状態であるのか、あるいはハドロンの分子状態であるのかを解明することが重要な課題となっている。この問題に対して、束縛状態の分子性を定量化する概念である複合性が注目されているが、複合性は一般に模型依存的であり、実験で直接測定可能な散乱観測量との関係を明確にする理論的枠組みが必要とされている。

本研究では、クォーク自由度とハドロンの自由度を含む多チャンネル系に対してチャンネル結合模型を構築し、フェッシュバッハ射影法により有効ハドロンの相互作用を導出することで、散乱長や有効レンジと複合性との定量的関係を解析的に明らかにした。その結果、低エネルギー散乱パラメータが束縛状態

の分子性を強く反映することを示すとともに、有限レンジ効果や直接相互作用の影響を系統的に評価した。さらに、局所ポテンシャル近似の性質を検討し、HAL QCD ポテンシャルでは複合性が自動的に1となることを示して、内部構造の解釈に注意が必要であることを明らかにした。構築した枠組みを具体的なエキゾチックハドロン候補に適用した結果、 $X(3872)$ や $T_{cc}(3875)^+$ は分子的構造が支配的である一方、チャーム・ストレンジ系ではベアクォーク状態と閾値との近接性が内部構造に重要な役割を果たすことを示した。本研究は、複合性と散乱観測量の間に定量的な橋渡しを与え、エキゾチックハドロンの内部構造解明に向けた理論的基盤を提供するものである。

量子エンタングルメント抑制のスピン 3/2 バリオンへの応用

近年、ハドロン散乱における量子情報的側面に注目が集まっており、特に散乱過程で生成されるスピンの量子もつれを抑制する「エンタングルメント抑制」の概念が新たな理論的枠組みとして提案されている。この枠組みでは、ハドロン散乱の S 行列をスピン空間における量子論理ゲートとして捉え、生成されるエンタングルメントを最小化する条件から有効な対称性が創発することが示されている。実際、低エネルギー領域での核力におけるスピン・フレーバー SU(4) 対称性や非相対論的共形対称性は、それぞれ S 行列が恒等ゲートや SWAP ゲートに対応する条件として理解される。しかしながら、これまでの議論は主にスピン 1/2 系に限られており、高スピン系におけるエンタングルメント抑制と対称性の関係は十分に明らかになっていなかった。

本研究では、エンタングルメント抑制の概念をスピン 3/2 のフレーバー 10 重項バリオン散乱へと拡張し、S 行列のエンタングルメント・パワーを計算することで創発対称性の構造を解析した。その結果、スピン 1/2 系と同様に、エンタングルメント・パワーが最小となる条件においてより大きな SU(40) などのスピン・フレーバー対称性や非相対論的共形対称性が現れることを示した。一方で、同種粒子散乱の場合にはスピン統計の制約によりエンタングルメント・パワーはゼロとならないが、これは対称・反対称部分空間への射影として解釈でき、制限されたヒルベルト空間上で S 行列が恒等あるいは SWAP ゲートとして作用することを明らかにした。さらに、エンタングルメント・パワーがゼロでなくとも極小値をとる場合には対称性の創発が起こることを示し、具体例として $\Omega\Omega$ 散乱の角運動量成分 $J=0$ と $J=2$ の関係を解析した。本研究の成果は、ハドロン相互作用における創発対称性を量子情報の観点から統一的に理解する新たな視点を提供するものである。

カイラル動力学モデルにおける Ξ 共鳴状態が観測可能なスペクトルに及ぼす影響の解明

ストレンジネス量子数 $S=-2$ をもつ Ξ バリオンの励起状態は、生成の困難さから長らく実験データが不足しており、 $\Xi(1620)$ や $\Xi(1690)$ などの性質には未解明な点が多く残されてきた。しかし近年、 Ξ_c 崩壊における不変質量分布の精密測定や相関関数解析による散乱長の決定など、新たな実験的情報が蓄積されつつあり、これらの共鳴状態の内部構造や性質を再検討する機運が高まっている。一般に、 Ξ 共鳴は多チャンネル散乱における複素エネルギー平面上の極として特徴付けられるが、リーマン面構造の複雑さにより複数の極が現れ得るため、それらの物理的意味や相互関係を明確に理解することが重要な課題となっている。さらに、実験的に直接観測されるのは三体崩壊スペクトルに限られるため、観測量と極構造との対応関係を明らかにする理論的枠組みが求められている。

本研究では、多チャンネル散乱における極構造と観測可能な不変質量分布との関係を体系的に解析した。まず、既存モデルでは観測されたスペクトルを再現できないことを示し、極の存在が必ずしも明確な共鳴ピークとして現れないことを明らかにした。次に、二チャンネルモデルを用いて固有状態と極の関係を整理し、束縛状態・仮想状態・共鳴状態の遷移や、チャンネル結合による準束縛状態の生成を解析した。さらに、 Ξ 共鳴の現実的モデルに適用した結果、多くの極は互いに独立な起源を持ち、特に閾値から離れ

た極は連続的につながらないことを示した。加えて、三体崩壊スペクトルの計算から、 $\bar{K}\Sigma$ 閾値近傍にカusp構造が現れることや、 $\bar{K}\Lambda$ 散乱長の符号がスペクトル形状を支配することを明らかにした。本研究は、極構造と実験スペクトルとの対応関係を明確化し、限られた実験情報から三バリオン励起状態の共鳴構造を理解するための理論的指針を提供するものである

フェムトスコピーにおける高次部分波の寄与 フェムトスコピーは、高エネルギー原子核衝突実験で測定される運動量相関関数を通じて、さまざまなハドロン間相互作用に制約を与える有力な実験手法として注目されている。その解析には、Koonin-Pratt 公式および Lednicky-Lyuboshitz (LL) 公式が広く用いられてきたが、これらは高次部分波の寄与が無視できるという仮定のもとで導出されている。一方で、高次部分波を含めた一般化も提案されているものの、一般化された Lednicky-Lyuboshitz 公式は原点における波動関数の特異な振る舞いに起因して誤った結果を与えるという問題が知られている。このように、高次部分波の効果を適切に取り入れた相関関数の記述は未解決の課題となっている。

本研究では、一般化された Lednicky-Lyuboshitz 公式にカットオフを導入することで正則化を行い、この問題の解決を試みた。得られた正則化公式の妥当性は、Koonin-Pratt 公式を基準として検証した。さらに、導入したカットオフと元の Lednicky-Lyuboshitz 公式における有効レンジ補正との関係を明らかにした。この新たな枠組みに基づき、相関関数のソースサイズ依存性、有効レンジ展開の適用範囲、およびカットオフ依存性を系統的に解析した。また、散乱長パラメータの逆数と相対運動量を変数とするヒートマップを用いて、相互作用依存性を可視化した。本研究の成果は、高次部分波を含むフェムトスコピー解析の信頼性を向上させるとともに、ハドロン間相互作用の精密決定に向けた理論的基盤を提供するものである。

5) 宇宙重力物理 (宇宙重力物理分野：本橋)

ブラックホール ブラックホールは、宇宙で最も強い重力を持つと同時に、最もシンプルな天体でもある。この極限環境において、重力の本質が浮き彫りになり、一般相対論を超える新たな物理の手がかりが得られる可能性がある。本研究室では、ブラックホール解の導出、摂動論の確立、準固有振動の解析、共鳴現象の発見など、理論的基盤から応用的側面まで多角的に研究を進めている。

本研究では、ブラックホール準固有振動数の値が近付き擬交差が起こる際に励起係数が大幅に増幅される共鳴現象を突き止めた。ブラックホール重力波における準固有振動とは、ブラックホールが外部から摂動された際に発する特徴的な減衰振動のことである。本研究では、一般相対論における回転ブラックホール解であるカー時空における複数の準固有振動数の値が近づく際にお互いを避け合う擬交差と呼ばれる現象が起こることと、それに伴って対応する励起因子が大幅に増幅される共鳴現象が現れることを突き止めた。同時に、この現象が、約 30 年にわたる未解決問題であったカー時空の準固有振動に特有の現象を説明できることを明らかにした。その結果を図 5 に示す。研究成果は国内外の研究会やセミナーにて発表するとともに、本学よりプレスリリースされ、国内外のメディアに広く取り上げられた。

重力波 アインシュタインによって 100 年以上前に予言された重力波は、宇宙の深奥の物理を明らかにする重要な手段である。長年困難とされてきた重力波の直接観測が可能となった現在、重力物理学研究はかつてないほどの発展期を迎えている。本研究室では、ブラックホールから放出される重力波や宇宙背景重力波の理論的研究、観測データを解析する新たな計算手法の開発などに取り組んでいる。

本研究では、ブラックホール連星合体直後に生じるリングダウン重力波を解析する方法として、正規直交化された準固有振動モードを用いる新たな手法を提案した。リングダウン重力波は準固有振動の線型結合で表されるが、準固有振動は非エルミート系の減衰振動であるため、通常のパラメータ化されたモー

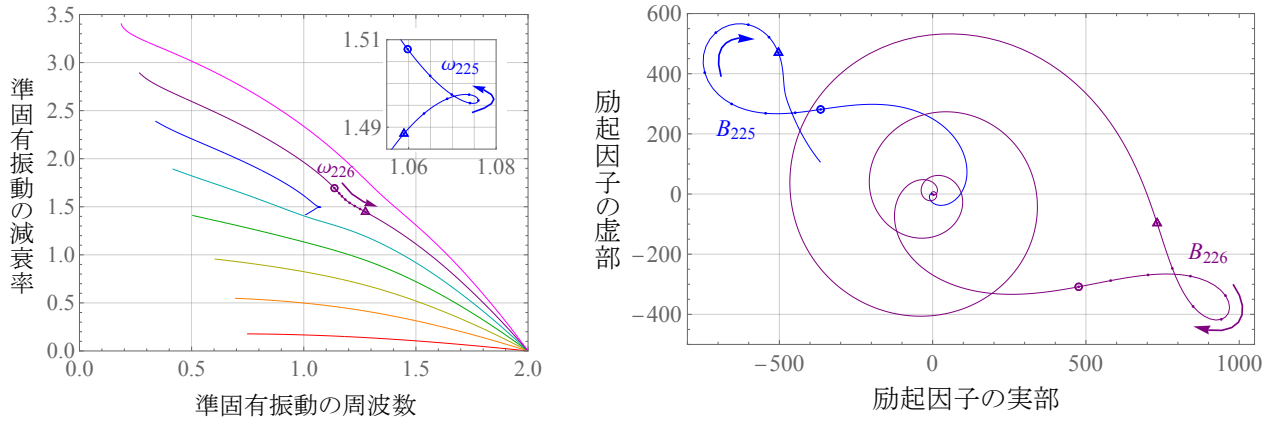


図 1: 回転ブラックホールの準固有振動における擬交差（左）と共鳴励起（右）の様子。

ド展開を用いることができない。本研究では、ブラックホール準固有振動の正規直交化されたモードを構築する方法を提案し、これを用いてリングダウン重力波を解析する新たな手法を提案した。この手法は、従来の方法に比べて、モード間の相関を削減することができ、より正確に準固有振動を抽出できることを示した。

機械学習

ノイズの中に埋もれた微弱な信号を抽出することが求められる重力波解析において、機械学習は有望な手段である。本研究では、機械学習を活用した新たなデータ解析手法の開発に取り組んでいる。

本研究では、連星ブラックホール合体から生じる重力波を効率よく探索するため、従来の整合フィルタ法と畳み込みニューラルネットワークを組み合わせた新たな解析手法を提案した。具体的には、多数のテンプレートに対して整合フィルタで計算した SNR 時系列を重ねた SNR マップをニューラルネットワークに入力し、観測データ中に重力波信号が含まれるかどうかを判定する。恒星質量ブラックホール連星からの模擬重力波信号をガウス雑音に埋め込んだデータで検証したところ、標準的な整合フィルタ探索や既存の機械学習手法と同程度の性能を示し、現実的な計算資源で有望な感度が得られることを明らかにした。

また、重力波解析を念頭に、オートエンコーダを用いた機械学習による重ね合わせ減衰振動のパラメータ推定手法の開発を行った。オートエンコーダとは、入力データを低次元の潜在空間に圧縮し、そこから元のデータを再構築するニューラルネットワークの一種である。先行研究において、オートエンコーダを用いて単一成分の減衰振動からのパラメータ推定が議論されていた。オートエンコーダは、一度学習が完了すれば入力信号を与えるだけでパラメータが得られるため、最小二乗法や FFT などの手法と比較して、高速に処理でき、かつ、それらと同等またはそれ以上の推定性能であることが示されていた。本研究では先行研究を拡張し、ホワイトガウスノイズを含む 2 成分の減衰振動の重ね合わせから、オートエンコーダを用いて、それぞれの成分について周波数・位相・減衰時間・振幅を推定する手法を提案した。その結果、単一成分の減衰振動の場合の結果と同等またはそれ以上の推定性能を持つことを明らかにした。本手法は短時間・高ノイズ環境下での解析に有効であることから、重力波の実データへの応用が期待される。

6) 宇宙理論 (宇宙理論分野：藤田，川中)

XRISM による観測 X 線天文衛星 XRISM は、搭載されたマイクロカロリメータ分光器 Resolve の高エネルギー分解能を活かし、銀河団や超新星残骸・活動銀河核 (AGN) に至る多様な天体に対して先例のない精度の観測成果をもたらしている。本年度も多数の重要な論文を Nature をはじめとする各雑誌に発表した。以下はそのうちの代表的なもので、藤田が大きく貢献したものである。

藤田らが中心となって進めてきたへびつかい座銀河団の研究では、力学的に攪乱されたコア領域にもかかわらずガスの速度構造が顕著に静穏であることを明らかにした。速度分散は他の銀河団と比較して異例に小さく、乱流によって期待されるはずの非熱的圧力成分が極めて限られていることが示された。この結果は、コア内部のエネルギー輸送機構に関する従来の描像を問い直す重要な知見である。また、高分解能 X 線分光によるへびつかい座銀河団コアの化学組成の研究では、元素の存在度を精密に決定し、コア領域における化学的濃縮の様相を明らかにした。

ペルセウス銀河団については、複数のガス速度場駆動源を分離することに成功し、AGN フィードバック・スロッシング・合体など異なる起源を持つ運動成分を同定した。さらに、XRISM によってペルセウス銀河団全体にわたるガス速度場のマッピングを行い、乱流の性質とその含意について詳細な議論を展開している。ケンタウルス座銀河団については、多相ガス構造の X 線輝線診断を行う一方、コアの化学組成と金属濃縮を精密に解明した。

スターバースト銀河 M82 の観測においては、超新星からのエネルギーの大半が高速のスターバースト風に消費されることを直接観測的に示した。これはスターバースト駆動のアウトフローに関する理解を根本から変える発見である。

Circinus 銀河の活動銀河核については、超大質量ブラックホール周辺の化学組成を蛍光 X 線分析によって精密に決定した。その結果、ブラックホールに流れ込むガスがスターバースト領域からくることが、そこで爆発する超新星の親星の質量は 20 太陽質量未満に限られることが明らかになった。

宇宙線の伝搬 PeV エネルギー宇宙線の伝搬の新しい記述方法と、それを用いたマイクロエーサー周囲に分布する PeV エネルギー宇宙線の振る舞いについて研究を行った。PeV 程度のエネルギーをもつ宇宙線は平均自由行程が 100 pc 程度になり、これより短いスケールの伝搬は弾道的となるため、これまで伝搬を記述する際に従来よく用いられてきた拡散近似は不正確となる。そこで拡散的伝搬と弾道的伝搬、さらにその中間状態も正確に記述できる新しい宇宙線の伝搬の定式化を提示した。さらに、宇宙線の伝搬が拡散的か弾道的かによって、空間分布とエネルギースペクトルがどのように異なるかを理論的に解析した。LHASSO などの次世代ガンマ線観測によって検証可能な予測を導出しており、超高エネルギー宇宙線の起源解明に向けた観測戦略の立案に貢献するものである。

低光度 AGN のガンマ線の起源 低光度 AGN である NGC 4278 からの超高エネルギーガンマ線放射の起源について研究を行った。ハドロン起源モデル、すなわち陽子-陽子衝突によるパイ中間子崩壊を通じたガンマ線放射シナリオを詳細に検討し、観測されたスペクトルを説明できることを示した。低光度 AGN における宇宙線加速と非熱的放射機構の理解に重要な示唆を与える。

AGN jet のシミュレーション 銀河団コアに存在する AGN jet を XRISM がどのように観測するかを模擬観測によって検討した。シミュレートされた AGN jet 構造に対して XRISM/Resolve の模擬観測を適用し、Resolve の高エネルギー分解能によって jet 起源の速度成分が検出可能かどうかを定量的に評価した。本研究は XRISM による銀河団 AGN フィードバックの直接観測に向けた理論的基盤を提供するものである。

M87 中心核周辺の分子ガス検出報告の真偽 M87 はおとめ座銀河団の中心にある楕円銀河である。最近の電波観測では、楕円銀河の中心付近に低温の分子ガスが大量に存在することが明らかになっており、中心の AGN 活動がこのガスの降着によって励起されているという説が広く受け入れられ始めている。このため、M87 においてもその中心領域の分子ガス探査がこれまで電波望遠鏡 ALMA をはじめとしたいくつかの電波観測によってなされてきたが、長らく明確な検出は報告されていなかった。最近、あるチームによって ALMA のアーカイブデータの解析から M87 の中心領域に CO (一酸化炭素) 分子の輝線・吸収線を発見した、という報告がなされた。我々はこれを検証するため、そのチームが用いていたデータセットの一部を再解析したところ、システム雑音温度のスペクトル中に上昇が見られるなど、正しく較正されていないことを示す徴候が見つかった。これらのことから、我々は先の報告において CO の吸収線とされた構造は M87 に起因するものではなく、地球大気中の水蒸気の吸収に起因するものであり、M87 周囲の分子ガスは未検出であると結論づけた。

超高光度 X 線源からの高エネルギーニュートリノ放射 近年の IceCube による観測で、NGC 1068 などのセイファート銀河からの高エネルギーニュートリノが検出されており、その生成過程として降着円盤コロナが有力視されている。コロナとは、幾何学的に薄い降着円盤を取り囲むように存在する高温で希薄なプラズマであり、X 線連星や AGN などのブラックホールの X 線放射源と広く信じられている。このコロナが無衝突プラズマとみなせるため、乱流や磁気リコネクションによる非熱的粒子加速が可能となり、したがってそれに伴う高エネルギーニュートリノ放射が期待されている。一方、超高光度 X 線源 (ULX) や高赤方偏移 AGN の観測から、超エディントン率で降着するブラックホールの存在が示唆されている。これらの天体は亜エディントン系に比べてより急峻な X 線スペクトルを示すため、比較的低温で光学的に厚いコロナを持つことを示唆する。そこで過去に構築した、超エディントン降着ブラックホールにおけるコロナのモデルを用いて、コロナにおける非熱的粒子加速およびそれに伴う高エネルギーニュートリノ生成の可能性について調べた。

7) 宇宙理論 (宇宙理論分野：佐々木)

観測的宇宙論の理論的研究 新しい観測装置が稼働し、従来よりも質・量ともに優れた結果が報告されるにつれ、これまで多くの観測結果を説明できた標準宇宙モデルの綻びが見られるようになってきた。まだ、標準宇宙モデルに修正を施すだけで良いのか、それとも根本的に考え直す必要があるのかはわからないが、今後、報告される観測結果を注意深く見る必要がある。そのような状況をふまえ、宇宙論パラメータの決定を主な課題として観測的宇宙論の理論的研究を進めた。

2. 研究業績

1) 論文

H. Masubuchi, Y. Narita, W. Yin, *et al.*, “Hubble-Scale Tachyonic Shocks from Low-Scale Inflation – A New Gravitational-Wave Window on Inflation”, *arXiv preprint*, arXiv:2602.15825 [hep-ph] (2026), to appear in *JCAP*.

J. Lee, K. Murai, F. Takahashi, W. Yin, “Resolving the QCD axion domain wall problem with a light axion”, *J. High Energy Phys.* **2026** (2026) 01.

Y. Narita, W. Yin, “Relativistic axion with nonrelativistic momenta: a robust bound on minimal ALP dark matter”, *J. High Energy Phys.* **2026** (2026) 01.

W. Yin, “Direct detection of cosmic walls with paleodetectors”, *Phys. Rev. D* (2026).

- T. Sugeno, W. Yin, “Axion Cosmology with Multi-Branch Yang-Mills”, *arXiv preprint*, arXiv:2511.19429 [hep-ph] (2025), to appear in *JHEP*.
- W. Yin, “Feebly-interacting Peccei-Quinn model”, *J. High Energy Phys.* (2025) 10.
- K. Murase, Y. Narita, W. Yin, “Superheavy dark matter from the natural inflation in light of the highest-energy astroparticle events”, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* (2025) 10.
- M. Miyazaki, Y. Narita, D. Song, N. Yaginuma, W. Yin, “Revisiting axion dark matter with nonlinear transitions”, *arXiv preprint*, arXiv:2509.13292 [hep-ph] (2025), to appear in *JHEP*.
- W. Yin, “Higgs-like inflation ACTivated mass”, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* (2025) 09.
- W. Yin, “Novel Limits on Dark Photon Mixing from Radiation Safety”, *arXiv preprint*, arXiv:2508.14885 [hep-ph] (2025), to appear in *PRL*.
- W. Yin, “Quantum and Material Effects in Undulator-Based LSW Searches for Dark Photons”, *arXiv preprint*, arXiv:2507.22055 [hep-ph] (2025), to appear in *JHEP*.
- N. Kitajima, J. Lee, F. Takahashi, W. Yin, “Stability of domain walls with inflationary fluctuations under potential bias, and gravitational wave signatures”, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* (2025) 07.
- J. Lee, K. Murai, F. Takahashi, W. Yin, “More is different: multi-axion dynamics changes topological defect evolution”, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* (2025) 04.
- W. Yin, “Non-Scaling Topological Defects and Gravitational Waves in Higgs Portal”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2025) 04.
- J. Wada, W. Yin, “Gauge coupling jump and small instantons from a large non-minimal coupling”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2025) 05.
- K. Murai, Y. Narita, F. Takahashi, W. Yin, “QCD axion dark matter from level crossing with refined adiabatic condition”, *J. High Energy Phys.* (2025) 04.
- J. Lee, K. Murai, F. Takahashi, W. Yin, “Isotropic cosmic birefringence from string axion domain walls without cosmic strings and DESI results”, *Phys. Rev. D* (2025) 08.
- A. Arza, *et al.*, “The COSMIC WISPer White Paper: The physics case for Weakly Interacting Slim Particles”, *arXiv preprint*, arXiv:2603.03433 [hep-ph] (2026).
- H. Takaura, W. Yin, “Beyond thresholds: reconstructing UV physics from IR expansions”, *arXiv preprint*, arXiv:2603.03277 [hep-th] (2026).
- C. Albertus, *et al.*, “WISPedia – the WISPs Encyclopedia”, *arXiv preprint*, arXiv:2602.09089 [hep-ph] (2026).
- S. Hirose, *et al.*, “Mineral Detection of Neutrinos and Dark Matter 2025 Proceedings”, *arXiv preprint*, arXiv:2508.20482 [physics.ins-det] (2025).
- Y. Kamiya, A. Jinno, T. Hyodo, A. Ohnishi, “Theoretical study on $\Xi\alpha$ correlation function”, *Phys. Rev. C*, **113** (2026) 055205

- I. Terashima, T. Hyodo, "Compositeness and wave function of shallow bound states in relation to scattering observables", *Phys. Rev. C*, **113** (2026) 035202
- T. Nishibuchi, T. Hyodo, "Eigenstates in coupled-channel scattering amplitude and their effects on spectrum", *J. Subatomic Part. Cosmol.*, **5** (2026) 100285
- K. Sone, T. Hyodo, "General amplitude of near-threshold hadron scattering for exotic hadrons", *Phys. Rev. C*, **112** (2025) 065207
- T. R. Hu, K. Sone, F. K. Guo, T. Hyodo and I. Low, "Entanglement Suppression, Quantum Statistics and Symmetries in Spin-3/2 Baryon Scatterings", *Phys. Rev. Res.*, **7** (2025) 043306
- A. Sakai, K. Murase, H. Fujii, T. Hirano, "Dynamical evolution of critical fluctuations with second-order baryon diffusion coupled to a chiral condensate", *Phys. Rev. C*, **112** (2025) 024907
- T. Kinugawa, T. Hyodo, "Compositeness of hadrons, nuclei, and atomic systems", *Eur. Phys. J. A*, **61** (2025) 154
- Hayato Motohashi, "Resonant excitation of quasinormal modes of black holes", *Phys. Rev. Lett.*, **134** (2025) 141401, [arXiv:2407.15191].
- Takuya Takahashi, Hayato Motohashi, Kazufumi Takahashi, "Resonance of black hole quasinormal modes in coupled systems", *Phys. Rev. D*, **112** (2025) 064006, [arXiv:2505.03883].
- Soichiro Morisaki, Hayato Motohashi, Motoki Suzuki, Daiki Watarai, "Analyzing Black-Hole Ringdowns with Orthonormal Modes", *Phys. Rev. D*, **112** (2025) 124083, [arXiv:2507.12376].
- Kei-ichiro Kubota, Hayato Motohashi, "Resonance in black hole ringdown: Benchmarking quasinormal mode excitation and extraction", *Phys. Rev. D*, **113** (2026) 043053, [arXiv:2509.06411].
- Takahiro S. Yamamoto, Kipp Cannon, Hayato Motohashi, Hiroaki W. H. Tahara, "Hybrid algorithm combining matched filtering and convolutional neural networks for searching gravitational waves from binary black hole mergers", *Phys. Rev. D*, **113** (2026) 062004, [arXiv:2512.12399].
- 飯田百香, 本橋隼人, 高橋弘毅, "オートエンコーダを用いた2成分重ね合わせ減衰振動のパラメータ推定", 知能と情報 (日本知能情報フエジィ学会論文誌), **38** (2026) 528-531.
- XRISM Collaboration, "XRISM Forecast for the Coma Cluster: Stormy, with a Steep Power Spectrum", *Astrophys. J.*, **985** (2025) L20
- XRISM Collaboration, "Structured Ionized Winds Shooting out from a Quasar at Relativistic Speeds", *Nature*, **641** (2025) 1132
- N. Kawanaka & R. Takahashi, "Beyond Diffusion: A Causality-Preserving Model for Cosmic Ray Propagation", *Phys. Rev. D*, **111** (2025) 123016
- O. Adriani *et al.*, "Precision Spectral Measurements of Chromium and Titanium from 10 to 250 GeV/n and Sub-Iron to Iron Ratio with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", *Phys. Rev. Lett.*, **135** (2025) 021002

- O. Adriani *et al.*, "Detected Abundances of Nuclei Relative to ^{26}Fe for Elements ^{14}Si through ^{44}Ru with CALET on the International Space Station", *Astrophys. J.*, **988** (2025) 148
- XRISM Collaboration, "Kinematic Evidence for Bipolar Ejecta Flows in the Galactic Supernova Remnant W49B", *Astrophys. J.*, **988** (2025) L58
- N. Kawanaka, H. Nagai, & Y. Fujita, "Reexamination of the CO Absorption Line in the M87 Nucleus", *Astrophys. J.*, **990** (2025) 66
- M. Tashiro *et al.*, "X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77S** (2025) 1
- XRISM Collaboration, "Thermal and Kinematic Properties of Ejecta in SN1987A Revealed by XRISM", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77S** (2025) 193
- XRISM Collaboration, "Constraining Gas Motion and Non-Thermal Pressure beyond the Core of the Abell 2029 Galaxy Cluster with XRISM", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77S** (2025) 242
- Y. Fujita, K. Fukushima, K. Sato *et al.*, "XRISM Observation of the Ophiuchus Galaxy Cluster: Quiescent Velocity Structure in the Dynamically Disturbed Core", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77S** (2025) 270
- XRISM Collaboration, "Delving into the Depths of NGC 3783 with XRISM: II. Cross-Calibration of X-Ray Instruments Used in the Large, Multi-Mission Observational Campaign", *Astron. Astrophys.*, **702** (2025) A147
- D. Yonetoku *et al.*, "Concept of High- z Gamma-Ray Bursts Unraveling the Dark Ages and Extreme Space-Time Mission—HiZ-GUNDAM", *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.*, **11** (2025) 044002
- XRISM Collaboration, "Stratified Wind from a Super-Eddington X-Ray Binary Is Slower than Expected", *Nature*, **646** (2025) 57
- XRISM Collaboration, "Comparing XRISM Cluster Velocity Dispersions with Predictions from Cosmological Simulations: Are Feedback Models Too Ejective?", *Astrophys. J.*, **993** (2025) L11
- XRISM Collaboration, "XRISM Constraints on Unidentified X-Ray Emission Lines, Including the 3.5 keV Line, in the Stacked Spectrum of 10 Galaxy Clusters", *Astrophys. J.*, **994** (2025) L28
- XRISM Collaboration, "XRISM/Resolve View of Abell 2319: Turbulence, Sloshing, and ICM Dynamics", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77** (2025) 1278
- Y. Omiya *et al.*, "XRISM Observations of the Prototypical Cold Front in A3667", *Astrophys. J.*, **996** (2026) L15
- XRISM Collaboration, "Chlorine and Potassium Enrichment in the Cassiopeia A Supernova Remnant", *Nat. Astron.*, **10** (2026) 144
- F. Mernier *et al.*, "Chemical Composition and Enrichment of the Centaurus Cluster Core Seen by XRISM/Resolve", *Astron. Astrophys.*, **706** (2026) A86

K. Iwasawa *et al.*, "Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs): XXII. Chandra Observations of Narrow-Line Quasar Candidates at $z \geq 6$ ", *Astron. Astrophys.*, **706** (2026) A305

XRISM Collaboration, "A XRISM/Resolve View of the Dynamics in the Hot Gaseous Atmosphere of M87", *Astrophys. J.*, **998** (2026) 210

Y. Fujita, R. Takahashi, & N. Kawanaka, "Diffusive or Ballistic? Distributions and Spectra of PeV Cosmic Rays around Microquasars", *Astrophys. J.*, **998** (2026) 226

XRISM Collaboration, "Disentangling Multiple Gas Kinematic Drivers in the Perseus Galaxy Cluster", *Nature*, **650** (2026) 309

A. Shoji, Y. Fujita, N. Kawanaka, S. Inoue & K. Nishiwaki, "Hadronic origin of the very high-energy gamma-ray emission from the low-luminosity AGN in NGC 4278", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **78** (2026) 166

C. Zhang *et al.*, "Mapping the Perseus Galaxy Cluster with XRISM: Gas Kinematic Features and Their Implications for Turbulence", *Astron. Astrophys.*, **707** (2026) A109

XRISM Collaboration, "A Fast Starburst Wind Consumes Most of the Energy from Supernovae", *Nature*, **651** (2026) 909

2) 著書

3) 学会講演

● JAMSTEC 横浜研究所セミナー

殷 文：Paleo detector によるコズミックウォールの直接探索

● 原子核三者夏の学校 2025

殷 文：ステライルニュートリノによる KM3-230213A の起源解明

● 原子核三者夏の学校 2025

柳沼音明：近赤外線観測によるダークマター探索

● 原子核三者夏の学校 2025

宮崎マックス：重力崩壊における非球対称摂動と静的外部解の構造について

● 素粒子物理学の進展 2025

成田悠馬：ステライルニュートリノによる KM3-230213A の起源解明

● 第 14 回観測的宇宙論ワークショップ

成田悠馬：インフレーション起源のダークマターによる超高エネルギー宇宙線の生成

● 研究会「原子核ハドロン物理における多彩なフレーバーとの邂逅」 2025 年 6 月 7～7 日（大阪大学中之島センター）

Tao-Ran Hu, Katsuyoshi Sone, Feng-Kun Guo, Tetsuo Hyodo, Ian Low : 「Entanglement suppression and hadron scatterings」

● 研究会「量子もつれと原子核物理」 2025 年 6 月 5～6 日（理研）

Tao-Ran Hu, Katsuyoshi Sone, Feng-Kun Guo, Tetsuo Hyodo, Ian Low : 「Entanglement suppression and hadron scatterings」

● ブラックホール摂動論研究会, 2025 年 8 月 29 日（石川県政記念しいのき迎賓館）

本橋隼人 : “Non-Hermitian Black Hole Physics”

● 日本物理学会第 80 回年次大会（2025 年）, 2025 年 9 月 16 日–19 日（広島大学）

本橋隼人 : 「非エルミート系としてのブラックホール準固有振動の共鳴励起現象」

高橋卓弥, 本橋隼人, 高橋一史 : 「複数自由度系におけるブラックホール準固有振動の共鳴」

窪田圭一郎, 本橋隼人 : 「ブラックホール準固有振動の第 8 倍音の特異な振る舞い」

飯田百香, 本橋隼人, 高橋弘毅 : 「オートエンコーダを用いた減衰振動のパラメータ推定: リングダウン重力波解析に向けて」

鈴木幹基, 森崎宗一郎, 本橋隼人, 度會大貴 : 「正規直交化された減衰振動モードを用いたブラックホールリングダウン重力波解析」

田原弘章, 本橋隼人 : 「スケール不変性に着目した最適化手法の開発と応用」

日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 9 月 23 日–26 日（オンライン）

須一優人, 本橋隼人 : 「Kerr ブラックホール摂動における Matsubara モード」

中司桂輔, 木村匡志, 本橋隼人, 高橋一史 : 「リングダウン重力波の倍音モードによる高階曲率重力理論の検証」

● 日本天文学会 2025 年秋季年会 2025 年 9 月 9～11 日（海峡メッセ下関）

藤田裕 : 「XRISM で探る Ophiuchus 銀河団中心部の速度構造」

川中宣太, 高橋芳太 : 「エネルギー損失の効果を考慮した因果律を保つ高エネルギー宇宙線の伝搬の定式化とその応用」

白鳥希拓, 藤田裕 : 「活動銀河核ジェットのシミュレーションと XRISM 模擬観測」

● 日本物理学会 第 80 回年次大会 2025 年 9 月 16～19 日（広島大学 東広島キャンパス）

藤田裕 : 「XRISM 衛星で切り拓く銀河団ガスの物理」（招待講演）

● 学術変革 (A) マルチメッセンジャー天文学 : 第 3 回領域研究会 2025 年 11 月 18～20 日（鳴子観光ホテル）

川中宣太 : 「Possibility of High Energy Neutrino Production in Super-Eddington Accreting Black Holes」

● ALMA Workshop 2025 2025 年 11 月 26～28 日 (TKP 金沢カンファレンスセンター)

藤田裕：「XRISM による cool core の観測」

● 高エネルギー宇宙物理学研究会 2025 2025 年 12 月 3～5 日 (大阪大学)

藤田裕：「XRISM による銀河団観測」

● 日本天文学会 2026 年春季年会 2026 年 3 月 4～7 日 (京都産業大学)

藤田裕, 高橋芳太, 川中宣太：「マイクロクエーサーの PeV 宇宙線はどのように伝搬するか」

川中宣太, 木村成生：「超エディントン降着するブラックホールからの高エネルギーニュートリノ放射の可能性」

東海林旭, 藤田裕, 川中宣太, 井上進, 西脇公祐：「NGC 4278 の低光度 AGN からのハドロン起源ガンマ線」

国際会議

CA21106 Brainstorming meeting 2025

Wen Yin eV dark matter search with infrared spectrographs,

● PandaX-xT opening meeting 2025

Wen Yin Extending the Reach of PandaX-xT: Some Physics Targets (of) Beyond WIMPs, (invited)

● @FY2024 "What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter" 2025

Wen Yin Current status on eV dark matter and future prospects , (invited)

● KEK QUP New Horizon Seminar 2025

Wen Yin Undulators as axion/dark photon factories , (invited)

● Mineral Detection of Neutrinos and Dark Matter 2025

Wen Yin Dark matter overview and a novel proposal of using paleo detector (invited)

● JAMSTEC 横浜研究所セミナー 2025

Wen Yin Paleo detector によるコズミックウォールの直接探索, (invited)

● 理研 iTHEMS Cosmology Forum n° 4 2025

Wen Yin The Cosmological Constant Problem, Time-Varying Dark Energy, and DESI , (invited)

● チェコ科学アカデミー物理学研究所セミナー 2025

Wen Yin Novel Scenarios of Domain Wall Formation and Their Searches , (invited)

● IFPU Focus Week on Ultralight Dark Matter and observable phenomena 2025

Wen Yin Early Cosmology of Ultralight Dark Matter , (invited)

● 多様化する未知粒子探索のフロンティア 2025

Wen Yin A parasitic search of dark photon, (invited)

● 第1回 TAICO ワークショップ 2025

Wen Yin ダークマターと宇宙の歴史, (invited)

● YOUNGST@RS - Shaping the Universe: Framework and Footprints of Cosmological Phase Transitions 2026

Wen Yin Relativistic Axion with Nonrelativistic Momenta and Baumkuchen Domain Wall, (invited)

● Melbourne Theoretical Particle Physics seminar 2026

Wen Yin A Generic Prediction of Single-Field Low-Scale Inflation, (online, invited)

● 北海道大セミナー 2025

Yuma Narita, Exploring New Physics via multi-messenger observations

● Axion in Stockholm (week 2) 2025

Yuma Narita, "QCD Axion Dark Matter with Enhanced Abundance via Level Crossing", (ポスター発表)

● Axion in Stockholm (week 3) 2025

Yuma Narita, "Exploring super-heavy ALP in cosmology via multi-messenger observations", (ポスター発表)

● 東京都立大ジョイントセミナー 2025

Yuma Narita, "Sterile-Neutrino Interpretation of the KM3-230213A Event", (invited)

● マゼラン望遠鏡観測検討会 (LCO25b/c) 2025

Nemin Yaginuma, Dark Matter, "eV-Dark Matter" search with WINERED, (online)

● 東京都立大ジョイントセミナー 2025

Nemin Yaginuma, Effects of Nonlinear Transitions on the Generation of Axion Dark Matter, (invited)

● 東京都立大ジョイントセミナー 2025

Max Miyazaki, Impact of Nonlinear Transition on Axion Dark Matter Production, (invited)

Relativistic-like behavior of ALPs with non-relativistic momenta,

Yuma Narita, GPPU Seminar,

● The 15th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2025) 2025 年 9 月 29-10 月 3 日 (University of Tokyo, Japan)

K. Murase, T. Hyodo: Higher partial waves and resonance contributions in femtoscopy

Y. Kamiya, A. Jinno, T. Hyodo, A. Ohnishi: Femtoscopy using hyperon-nucleus correlation function

K. Murase, T. Doi, T.M. Doi: Lattice QCD study of baryon-baryon interactions in the $S = -1$ channel at the physical point

T. Kinugawa, T. Hyodo: Structure of near-threshold states in systems with Coulomb and short-range interactions

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Eigenstates in coupled-channel scattering amplitude and their effects on spectrum

I. Terashima, T. Hyodo: Internal structure of exotic hadrons with coupled channel potential in relation with scattering observables

C. Uno, T. Hyodo: Wave functions and radii of bound states with Coulomb plus short-range interaction

E. Gushiken, T. Hyodo: Decay effect on scattering amplitude With complex and coupled-channel potentials

● International Workshop and Town Meeting on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex WS/Town-Meeting 2025) 2025 年 9 月 26-27 日 (RIKEN, Japan)

T. Hyodo: Femtoscopy for the systems with strangeness and charm

● The 9th Asia-Pacific conference on Few-body problems in Physics (APFB2025) 2025 年 9 月 20-29 日 (Lanzhou University, China)

Tao-Ran Hu, Katsuyoshi Sone, Feng-Kun Guo, Tetsuo Hyodo, Ian Low : Entanglement Suppression, Quantum Statistics and Symmetries in Spin-3/2 Baryon Scatterings

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Eigenstates in coupled-channel scattering amplitude and their effects on spectrum

I. Terashima, T. Hyodo: Internal structure of exotic hadrons by compositeness with coupled channel potential in relation with scattering observables

C. Uno, T. Hyodo: Wave functions and radii of bound states with Coulomb plus short-range interaction

E. Gushiken, T. Hyodo: Decay effect on scattering amplitude with complex and coupled-channel potentials

● The China-Japan Joint School for Nuclear Physics 2025 年 8 月 20-29 日 (Lanzhou University, China)

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Eigenstates in coupled-channel scattering amplitude and their effects on spectrum

I. Terashima, T. Hyodo: Internal structure of exotic hadrons by compositeness with coupled channel potential in relation with scattering observables

C. Uno, T. Hyodo: Wave functions and radii of bound states with Coulomb plus short-range interaction

E. Gushiken, T. Hyodo: Decay effect on scattering amplitude with complex and coupled-channel potentials

● Southeast Asian Workshop on Nuclear and Hadron Physics (SEA-NHP 2025) 2025 年 8 月 19-21 日 (Universitas Gadjah Mada, Indonesia)

Tao-Ran Hu, Katsuyoshi Sone, Feng-Kun Guo, Tetsuo Hyodo, Ian Low : Entanglement Suppression, Quantum Statistics and Symmetries in Spin-3/2 Baryon Scatterings

I. Terashima, T. Hyodo: Internal structure of exotic hadrons with coupled channel potential in relation with scattering observables

● The Frontier of Particle Physics: Exploring Muons, Quantum Science and the Cosmos, 2025 年 6 月 15-20 日 (京都大学基礎物理学研究所)

Tao-Ran Hu, Katsuyoshi Sone, Feng-Kun Guo, Tetsuo Hyodo, Ian Low : Consequences of entanglement suppression on light decuplet baryons

● YITP international workshop on Hadron in Nucleus (HIN2025) 2025 年 4 月 2-4 日 (YITP, Kyoto Univ., Japan)

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of near-threshold states with Coulomb plus short range interaction

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Effect of eigenstates on spectra in coupled-channel scattering with the chiral unitary method

I. Terashima, T. Hyodo: Internal structure of $X(3872)$ by compositeness with coupled channel potential

K. Sone, T. Hyodo: Threshold cusp structure in multi-channel scattering

C. Uno, T. Hyodo: Effect of Coulomb interaction on bound state by strong interaction

E. Gushiken, T. Hyodo: Scattering amplitude and effective range expansion with complex potential

● ISSP-IIS Joint Symposium on Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry and Topology, 2025 年 8 月 4 日 (Institute for Solid State Physics (ISSP) and Institute of Industrial Science (IIS), University of Tokyo, Japan)

Hayato Motohashi: “Resonance and exceptional points in black hole quasinormal modes”

● New Physics from Gravitational Waves 2025, 2025 年 9 月 19 日 (Hiroshima University, Japan)

Hayato Motohashi: “Non-Hermitian Black Hole Physics”

● The 34th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG34), 2026 年 1 月 19 日–23 日 (Kyoto University, Japan)

Hayato Motohashi: “Exceptional Points and Resonance in Black Hole Ringdown”

Yuto Suichi, Hayato Motohashi: “Extending mode decomposition of Kerr black hole perturbations”

● Variable Galactic Gamma-Ray Sources (VGGRS) VII 2025 年 5 月 6～8 日 (バルセロナ, スペイン)

Y. Fujita: ALMA observations of binary pulsar PSR B1259-63/LS2883 (招待講演)

● Tracing Cosmic Evolution with Galaxy Clusters V 2025 年 7 月 7～11 日 (セスト, イタリア)

Y. Fujita: XRISM Observations of the Centaurus Cluster

● XRISM International Conference 2025 2025 年 10 月 20～24 日 (京都)

Y. Fujita: XRISM Observation of the Ophiuchus Galaxy Cluster: Quiescent Velocity Structure in the Dynamically Disturbed Core

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 高次元シンプレクティック写像における馬蹄型力学の分類

馬蹄型力学を示す最も単純なモデルの一つに2次元エノン写像がある。エノン写像はそれぞれ一つの引き伸ばしと折れたたみの方向をもち、適当な有界領域を馬蹄状領域に写す。一方、系が高次元になると、引き伸ばしと折れたたみの方向が複数現れる可能性があるため、より複雑なダイナミクスが期待される。本年度は、4次元シンプレクティック2次多項式写像の標準型として知られる Moser 写像に現れる非自明な馬蹄型力学を詳しく調べた。Moser 写像には、引き伸ばしと折れたたみの方向が2つ存在し、4進の記号力学系と半共役になるケース、および引き伸ばしと折れたたみの方向が1つだけ存在し、2進の記号力学系と半共役になる2つの場合があることがこれまでの研究でわかっているが、それに加えて、系が4次元の2次写像であるにも関わらず、3進の記号力学系と半共役になる状況が存在する。ここでは、この状況の非自明性が、無限遠方での軌道の振る舞い、および不安定多様体近傍での軌道の特異な振る舞いからくること、特に、不安定多様体に沿う軌道が、一定時間不安定多様体に沿って運動するものの、しばらくすると向きを反転させ、不安定多様体が漸近する方向とは異なる方向に運動を反転させることを数値的に示しその特異性を明らかにした。このことから、系の filtration を特定するための有限分割を構成することができず、非遊走集合の存在領域を見出すことが困難になる。

2) 超近可積分系のトンネル効果と複素軌道の階層性

系が非可積分になると、位相空間に非可積分由来の構造がプランクセルスケールで認められない状況（超可積分系）であっても、量子波動関数のトンネルテールには自明でない階段構造が出現し、トンネル確率の異常増大が見られる。その異常増大の起源は、系の実古典位相空間に非可積分性由来の構造がなく、その手がかりがない以上、複素古典位相空間に求めるしかないが、実際、系が非可積分に転じた瞬間、複素不変構造には劇的な変化が起こる。特に、可積分系において分離されていた位相空間はジュリア集合を介してどの領域の間でも遷移可能になり、ジュリア集合上の複素軌道がトンネル遷移を担うようになる。このような、複素位相空間のトポロジーの変化（実空間上では KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser) トーラスがあるためそれが起こらない）が物理現象として顕在化したものが超可積分系におけるトンネルテールの階段構造であり、それに伴うトンネル確率の異常増大である。ここでは、複素トポロジーの質的变化を反映して、トンネル確率が摂動強度に対して特異的な応答を示すこと示し、背景にある複素位相空間の構造からその理由を考察した。一方、トンネルテールに現れる階段構造は、トンネル遷移をもたらす複素軌道間の干渉によるものと思われるが、その機構を支える複素軌道が寄与可能な軌道群のなかにどのような形で隠れ、どのような干渉を起こすことでその階段構造が出現するのかについての解析を進めた。

3) 作用変数を変化させる断熱サイクルのトポロジカルな特徴付け

作用変数は完全可積分な古典ハミルトン系での断熱不変量である。すなわち、その値は断熱的な時間発展で不変である。同時に、位相空間上の（断熱パラメーターとは独立な座標についての）関数としての作用変数は、断熱サイクルによって変わり得る。このとき、作用変数が指定するトーラスは、断熱サイクルによって別のトーラスへと移される。従来、このような作用変数の“ホロノミー”を実現する断熱サイクルの探索には理論的な裏付けが無く、対応する量子系からの類推といった偶発的な要素を必要とした。これに対して、量子論での固有空間の新奇なホロノミーに類似する、被覆空間を利用した定式

化を完全可積分系に導入した。この結果、断熱サイクルに対するホモトピックな分類から、作用変数のホロノミーを誘発するもの・しないものを同定できるようになった。

2. 研究業績

1) 論文

Yoshihiro Nakahara and Akira Shudo: Relaxation of Hamiltonian dynamics in intermediate timescales and slow dynamics of glass-forming liquids, *Phys. Rev. E* **112** (2025) 045424 (12 pages)

Keisuke Fujioka and Ryota Kogawa and Jizhou Li and Akira Shudo: Topological horseshoe and uniform hyperbolicity of the symplectic coupled Hénon map, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **481** (2025) 134722 (17 pages)

Domenico Lippolis: Spatiotemporal stability of synchronized coupled map lattice states, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **490** (2025) 135148 (9 pages)

2) 学会講演

国内研究会

● 複雑系研究会, 2025 年 11 月 8 日–9 日 (琉球大学)

首藤啓: トンネル効果における量子干渉と複素カオス (招待講演)

● Dynamics Days 2025, 2025 年 12 月 4 日–10 日 (鹿児島大学)

首藤啓: Eigenstate flooding and amphibious complex trajectories (招待講演)

● 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 3 月 23–26 日 (オンライン)

田中篤司: 断熱サイクルによる作用変数の変化のトポロジカルな定式化

国際会議

● 3rd Q-DYNAMO (EUSE program) workshop on quantum dynamics, 2025 年 5 月 12 (Tokyo University of Science)

A. Shudo: Quantum phenomena in mixed phase space: indispensable roles of complex-domain (invited)

● Quantum chaos workshop, 2025 年 10 月 23 日–25 日 (Polish Academy of Science, Krakow)

A. Shudo: Ultra-near integrable systems and quantum tunneling (invited)

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 量子力学の諸問題への機械学習の応用

古典スピン系の転移点の特定に機械学習を応用する手法が開発されている。これに対し、改良法としてこれまでにいくつかの手法を提案してきた。今年度はそれらの手法の汎化性能の評価を詳細に行った。特定のモデルに対して学習した手法が他のモデルにどの程度活用できるかを判定し、汎化性能の向上のために必要な改善策を検討した。[森]

2) 量子力学的粒子系のモンテカルロシミュレーションへの機械学習の応用

量子力学的粒子系を世界線モンテカルロシミュレーションを実施する場合、虚時間軸をプラスした次元の一つ高い古典粒子系として粒子のは位置を考えることができる。この空間配置図を画像として取り込み、機械学習の画像認識を使って物性解析に応用する手法を考えてきた。今年度はその手法の改善に取り組み、一定の成果が得られている。その結果は論文にまとめる予定である。[森]

3) トーラス型トラップ中に閉じ込められたフェルミ原子気体の多殻構造の解析

トーラス型トラップ中に閉じ込められたフェルミ原子気体に対して理論解析を行い、超流動状態における空間構造と励起特性について調べた。その結果、BCS 領域において、フェルミ原子気体の密度分布や超流動秩序変数が半径方向に複数のピーク構造を形成し、多殻構造 (multi-shell structure) を示す可能性があることを明らかにした。この構造は、トーラス型閉じ込めポテンシャルとフェルミ粒子間相互作用の競合によって生じるものであり、従来の単純な中心対称トラップでは見られない特徴的な超流動状態である。さらに、結合定数や粒子数、トラップ形状を変化させた際の密度分布および超流動ギャップの振る舞いを系統的に解析し、多殻構造の形成条件や安定性について検討を行った。これにより、トーラス型フェルミ超流動における新しい空間構造の可能性を示すとともに、冷却原子系を用いた量子多体系研究に対する新たな知見を与えた。現在、これらの成果をまとめた関連論文を執筆中である。[荒畑]

4) Bose 原子気体超流動の温度推定器の改良

冷却原子気体でボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現するためには、磁場によって形成されたトラップ中に希薄な原子気体を捕捉し、極低温まで冷却する必要がある。冷却原子気体の観測には飛行時間測定法 (Time-of-Flight: TOF) が広く用いられており、通常は原子集団を理想気体とみなし、相互作用を無視して自由膨張することを仮定した密度分布から温度推定を行う。しかし実際には原子間相互作用の影響は無視できず、相互作用を考慮した場合には、従来手法による温度推定結果との間に大きな差異が生じることが知られている。

2025 年度は、Zaremba–Nikuni–Griffin (ZNG) 理論を用いて、トラップ切断後の Bose 原子気体の非平衡ダイナミクスを高精度に再現したシミュレーションデータを教師データとして利用し、Bose 原子気体超流動の温度を推定する機械学習モデルの構築と詳細な解析を行った。機械学習モデルの構築では、多数のハイパーパラメータを適切に選択する必要があるが、本研究では Optuna を用いたハイパーパラメータ最適化を導入することで、高精度かつ効率的な温度推定モデルの作成に成功した。現在、これらの成果をまとめた関連論文を執筆中である。[荒畑]

5) 二次元格子対称性をもつ普遍的漸近式を用いた相関関数の数値的研究

非臨界状態にある古典格子模型の相関関数の漸近形の研究を行っている。正方格子の C_{4v} 対称性および三角格子の C_{6v} 対称性を持つ漸近形がそれぞれの離散的対称性を反映した 4 次の代数曲線により与えら

れることを Q -状態 Potts 模型に関する数値計算を用いてこれまで明らかにしてきた。それに引き続き現在、二次元格子上的 $O(n)$ シグマ模型の解析を行っている。 $n = 0$ の自己回避ランダムウォークから $n = 3$ のハイゼンベルグスピンモデルまでの数値解析を行うことにより、高温領域において代数曲線をパラメタライズする楕円関数のモジュラスの温度依存性が成分数 n には依らず格子対称性のみにより決まることを見いたした。[大塚、岡部豊、藤本雅文 (奈良医大)]

6) フラストレーションにより乱れた状態に対する遠距離相互作用効果の研究

反強磁性 (AF) 体は強磁性 (F) 体と異なり格子構造の影響を受け易く低温まで秩序しないものや新奇な相転移を示すものが多く知られている。カゴメ格子 AF イジング模型はその代表例であり基底状態においても相関長が有限な常磁性相にある。我々は次近接 F 相互作用を加えることにより現れる相構造が双対 sine-Gordon 模型で記述される 6 状態クロック普遍性クラスにあると Monte-Carlo 法を用いた機械学習のアプローチおよび転送行列の固有値構造を解析する level-spectroscopy 法を用いて定量的に確認した。[大塚、岡部豊]

2. 研究業績

1) 論文

Berezinskii-Kosterlitz-Thouless phase transitions of the antiferromagnetic Ising model with ferromagnetic next-nearest-neighbor interactions on the kagome lattice, Yutaka Okabe and Hiromi Otsuka, Phys. Rev. B 113 (2026) 014441.

Universal asymptotic correlation functions for point groups C_{4v} and C_{6v} : Numerical observation for square- and triangular-lattice Q -state Potts models, Hiromi Otsuka and Masafumi Fujimoto, J.Phys.: Conf. Ser. 3161 (2026) 012021.

2) 著書

「エントロピーと秩序」(ピーター・アトキンス、米沢富美子・森弘之訳、ちくま学芸文庫)

「入門 熱力学・統計力学」(森弘之著、森北出版)

3) 学会講演

●日本物理学会第 80 回年次学会 2025 年 9 月 16 日-19 日 広島大学

藤本美紀子, 荒畑恵美子: BCS-BEC クロスオーバーにおける擬 1 次元光格子中の Fermi 超流動気体のエネルギースペクトルの解析

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。2025年度の研究室構成は、常勤教員2名、連携客員教授1名、大学院生6名、卒研1名であった。以下は、2025年度に行った主な研究の概要である。

1) 交差応答関数に対するカイラル秩序変数の揺らぎの解析

空間反転対称性の破れた系では、通常物質とは異なり、電気と磁気が結合することに起因した交差応答の物理が近年盛んに研究されている。本研究では、そのような交差相関の一つである電流誘起磁化が、秩序変数揺らぎによりどのような影響を受けるのかについて、最近発見されたURhSnの反転および鏡映対称性を破ったカイラルな軌道秩序状態を例に解析した。電子系との結合を考慮した有限温度の古典近藤格子模型を用いて電流誘起磁化を数値対角化により解析し、相転移温度以下におけるその温度依存性を詳細に解析することに成功した。電流誘起磁化は平均場近似のものよりも転移温度近傍で抑制され、温度依存性も秩序変数の上凸のものと比較して下凸に近いものになることが見出された。これらの起源が、秩序変数揺らぎによる電子系のスペクトルの分裂に起因することも明らかになり、最近観測された電流誘起磁化の結果を説明することができる。

2) ダイヤモンド格子におけるL点四極子秩序のモンテカルロ解析

近年f電子系として注目されているPrIr₂Zn₂₀は、非クラマース二重項の基底状態を持ち、磁気双極子を持たない。その一方、電気四極子が基底状態で活性であり、四極子近藤効果や非フェルミ液体的な振る舞いなど多彩な物性を持つことが知られている。本研究では、その四極子有効ハミルトニアンを構築し、古典モンテカルロ法を用いて磁場-温度相図を作成し2段階相転移が現れることを確認した。得られた相図から、ゼロ磁場では二重qの四極子状態の存在をシステムサイズ依存性から示し、[001]方向の2段階転移は四極子の秩序変数が切り替わる転移であることを見出した。これらの結果は、観測されているPrIr₂Zn₂₀における多極子秩序の温度磁場相図と定性的に整合する。

3) 層間クーロン相互作用による二層系ニッケル酸化物におけるd波超伝導の発現機構

2023年に発見された新規超伝導体La₃Ni₂O₇のギャップ関数の対称性については、これまでの理論研究によると、層間の $d_{3z^2-r^2}$ 軌道ペアリングに由来した $s^\pm$ 波が最も安定した解になることが示されている。一方、実験研究では圧力下で精密なギャップ関数の測定が難しく、確定的な結論はまだ得られていないが、最近の点接合分光実験から、ノードを持つd波の可能性が示唆されている。そこで、先行研究のバンド計算によって得られた強束縛近似モデルにクーロン相互作用を考慮した2層2軌道ハバードモデルに基づいて解析を行った。特に、z方向に伸びるNiの $d_{3z^2-r^2}$ 軌道の層間クーロン相互作用 $U_\perp$ の効果に着目する。クーロン相互作用に関する乱雑位相近似によって電子間有効相互作用を計算し、それを用いて得られたギャップ方程式を数値的に解いて、 T_c とギャップ関数の対称性を求めた。まず、 $U_\perp$ が小さい場合、ギャップ関数は層間 $d_{3z^2-r^2}$ 軌道のペアリングが支配的であり、軌道描像で等方的なs波が見られた。これはバンド描像では $s^\pm$ 波となり、先行研究の結果と一致する。一方、 $U_\perp$ を大きくしていくと、ギャップ関数は層間 $d_{3z^2-r^2}$ 軌道のペアリングが支配的ではあるものの、その対称性がs波からd

波に変化することを見出した。この結果は、今後の $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 超伝導体のギャップ対称性の解明に一定の貢献をすることが期待される。

2. 研究業績

1) 論文

G. Furuya and K. Hattori, “Order parameter fluctuation effect on current-induced magnetization”, *Phys. Rev. B* **112**, 035171 (2025).

K. Hattori and H. Kusunose, “Kondo-Peierls transition with nonsymmorphic zone boundary gap formation”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 113702 (2025).

T. Hotta, “Effect of Γ_7 and Γ_8 Hybridizations on Three-Channel Kondo Phase Emerging from Ho Ions”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 114702 (2025).

N. Okamoto, Y. Kono, T. Onimaru, K. T. Matsumoto, K. Hattori, and S. Kittaka, “Probing magnetic-field-induced multipolar ordering through field-angle-resolved magnetostriction and thermal expansion in $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ ”, *Phys. Rev. B*, **112**, L241113 (2025).

M. Kawamata, R. Higashinaka, T. Matsumura, M. Avdeev, K. Iwasa, H. Nakao, K. Hattori, and T. D. Matsuda, “Collinear Magnetic Structure in the Diamond Network Magnet $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **95**, 024701 (2026).

T. Ishitobi and K. Hattori, “Purely electronic chirality without structural chirality”, *Phys. Rev. Lett.* **136**, 056402 (2026). *Selected to Editors' suggestion and Featured in Physics.*

2) 著書

3) 特許

4) 学会講演

● CeCoSi における最近の発展 2025 年 6 月 6～7 日（富山県立大学）

服部一匡：「異方的近藤スクリーニングによる秩序化」

● 基研 WS 「高次にもつれた量子相探索の展開」 2025 年 9 月 1～3 日（京都大学基礎物理学研究所）

Kazumasa Hattori：「Symmetry breaking due to cluster quadrupole degrees of freedom」

● 日本物理学会 第 80 回年次大会 2025 年 9 月 16～19 日（広島大学）

佐々海斗，服部一匡：「古典モンテカルロ法を用いた $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ における四極子秩序の解析」

堀田貴嗣：「Ho イオンに創出する 3 チャンネル近藤効果に対する Γ_7 および Γ_8 混成の影響」

● アシンメトリ量子物質の機能物性に関する現状の把握と展望 2025 年 11 月 1～3 日（ホテル白鳥 島根県市町村職員共済組合宿泊所）

服部一匡：「秩序変数揺らぎと電流誘起磁化」

● 第 909 回基礎科学セミナー 2026 年 2 月 19 日（日本原子力研究開発機構）

堀田貴嗣：「核スピンと f 電子の超微細相互作用の微視的取り扱い」

● 日本物理学会 2026 年春季大会 2026 年 3 月 23～26 日（オンライン）

松原慧汰，服部一匡：「構造相転移におけるカイラリティ」

佐々海斗，服部一匡：「ダイヤモンド構造上の多重 Q 四極子秩序」

小山慎之介，是常隆，服部一匡：「時間反転対称な系における歪み場誘起磁化応答」

国際会議

● Workshop on theory of cross correlations, multipoles, and computational material design 2025
Winter 2025 年 12 月 22 日～23 日（Gotemba, Shizuoka, Japan）

Kazumasa Hattori: 「Kondo-Peierls Transition with Nonsymmorphic Zone Boundary Gap Formation」

計算物質科学研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、主に第一原理計算に基づく磁性体と超伝導体の計算手法開発、および開発した手法を用いた物性計算を行なっている。2025 年度に達成した主要な成果について、以下に報告する。

1) 対称性に基づく第一原理強束縛模型の開発

完全多極子基底に基づく対称性適合 closest Wannier 模型 第一原理計算から得られる Wannier 強束縛模型は、物性解析の標準的な出発点であるが、数値的な wannierization や disentanglement に起因して結晶対称性がわずかに破れ、縮退の人工的な分裂や Berry 曲率応答の誤評価を生じる場合がある。本研究では、closest Wannier 形式と対称性適合多極子基底を組み合わせ、対称性を厳密に満たす強束縛模型を非反復的に構成する手法を開発した。本手法では、closest Wannier 関数の Hilbert 空間に完全正規直交な多極子基底を導入し、Hamiltonian を恒等表現に属する基底へ射影することで、結晶場、スピン軌道相互作用、電子ホッピングなどの模型パラメータを一意に抽出できる (図 1)。単層グラフェンへの適用により、外部電場下で生じる微小な対称性破れを除去し、正しい対称性の下でバンド構造と応答を解析できることを示した。また、手法を Python ライブラリ SymClosestWannier として実装し、汎用的な第一原理模型構築手法として公開した。

2) 複雑磁性体のスピン模型構築と磁気構造探索

第一原理強束縛模型に基づく双二次スピン相互作用の計算 非共線・非共面磁気構造の安定化には、通常の実線形 Heisenberg 相互作用だけでなく、双二次相互作用などの高次スピン相互作用が重要となる。本研究では、第一原理強束縛模型に対して、disordered local moment 法と spin cluster expansion を組み合わせることで、双二次スピン相互作用を効率的に評価する計算手法を定式化した。まず二副格子 Hubbard 模型に適用し、強相関極限の摂動論から得られる実線形・双二次相互作用を良く再現することを確認した (図 2)。さらに bcc Fe, hcp Co, fcc Co に対する benchmark 計算を行い、既存の KKR 法による結果との整合性を検証した。応用例として $\text{Co}_{1/3}\text{TaS}_2$ および $\text{K}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3$ を扱い、複雑な磁気秩序の背後にある高次相互作用を第一原理的に解析できることを示した。

クラスターマルチポール法を用いた低エネルギー磁気構造探索 複雑磁性体では、結晶対称性が許す多数の非共線磁気構造候補の中から、実際に安定な構造を効率的に選別することが課題である。本研究では、クラスターマルチポール法で生成した対称性適合磁気構造を、第一原理計算から導出した原子スピン模型で評価する多階層的計算手法を開発した。この手法では、常磁性状態を参照状態とする DLM 法により交換相互作用を評価し、クラスターマルチポール基底で表される候補構造のエネルギーをスピン模型レベルで比較する。 Mn_3X および Fe_3X ($\text{X} = \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$) カゴメ磁性体への適用では、交換相互作用の波数依存性から磁気変調の安定性を解析し、相対論的相互作用を含めることで低エネルギー構造間の縮退が部分的に解けることを示した。本手法は、未知の磁気秩序を持つ物質群に対する高効率なスクリーニングに有用である。

2. 研究業績

1) 論文

Masaki Gen, Takuya Nomoto, Hiraku Saito, Taro Nakajima, Yusuke Tokunaga, Rina Takagi, Shinichiro Seki, and Taka-hisa Arima, "Effect of uniaxial stress on helimagnetic phases in the square-lattice itin-

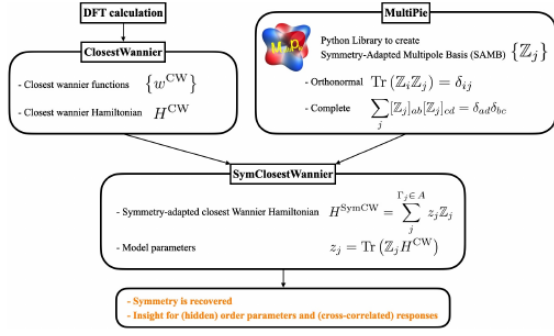


図 1: SymClosestWannier の計算手順。closest Wannier 模型を完全多極子基底へ射影することで、対称性を満たす強束縛 Hamiltonian と模型パラメータを得る。

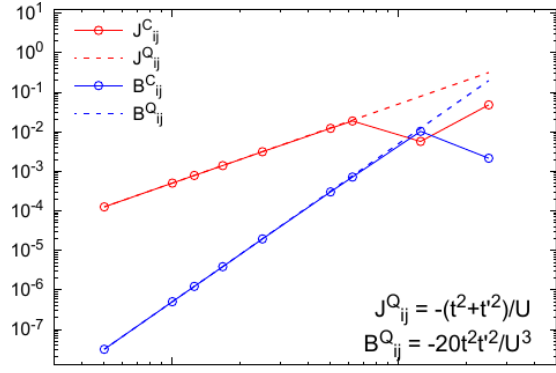


図 2: 二副格子 Hubbard 模型における双線形・双二次相互作用。SCE-DLM による結果は、強相関極限の摂動論と良く一致する。

erant magnet EuAl_4 ", Physical Review B **113**, L100406 (2026 年 3 月 11 日)

Tatsuto Hatanaka, Juba Bouaziz, Takuya Nomoto, and Ryotaro Arita, "Calculation of the Biquadratic Spin Interactions Based on the Spin Cluster Expansion for *Ab initio* Tight-binding Models", Journal of the Physical Society of Japan **94**, 124709 (2025 年 12 月 15 日)

Yuki Sato, Soma Nagahama, Shunsuke Kitou, Hajime Sagayama, Ilya Belopolski, Ryutaro Yoshimi, Minoru Kawamura, Atsushi Tsukazaki, Naoya Kanazawa, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, Taka-hisa Arima, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura, "Superconductivity and suppressed monoclinic distortion in FeTe films enabled by higher-order epitaxy", Nature Communications **16**, 10913 (2025 年 12 月 5 日)

Rinsuke Yamada, Max T. Birch, Priya R. Baral, Shun Okumura, Ryota Nakano, Shang Gao, Motohiko Ezawa, Takuya Nomoto, Jan Masell, Yuki Ishihara, Kamil K. Kolincio, Ilya Belopolski, Hajime Sagayama, Hironori Nakao, Kazuki Ohishi, Takashi Ohhara, Ryoji Kiyonagi, Taro Nakajima, Yoshinori Tokura, Taka-hisa Arima, Yukitoshi Motome, Moritz M. Hirschmann, and Max Hirschberger, "A metallic p-wave magnet with commensurate spin helix", Nature **646**, 837 (2025 年 10 月 22 日)

Rikuto Oiwa, Akane Inda, Satoru Hayami, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, and Hiroaki Kusunose, "Symmetry-adapted closest Wannier modeling based on complete multipole basis set", Physical Review B **112**, 035116 (2025 年 7 月 7 日)

Juba Bouaziz, Takuya Nomoto, and Ryotaro Arita, "Spin models and cluster multipole method: Application to kagome magnets", Physical Review B **112**, 014406 (2025 年 6 月 12 日)

Kosuke Karube, Yoshichika Onuki, Taro Nakajima, Hsiao-Yi Chen, Hiroaki Ishizuka, Motoi Kimata, Takashi Ohhara, Koji Munakata, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, Taka-hisa Arima, Yoshinori Tokura, and Yasujiro Taguchi, "Giant Hall effect in a highly conductive frustrated magnet GdCu_2 ", npj Quantum Materials **10**, 55 (2025 年 6 月 6 日)

Mayukh Kumar Ray, Mingxuan Fu, Youzhe Chen, Taishi Chen, Takuya Nomoto, Shiro Sakai, Motoharu Kitatani, Motoaki Hirayama, Shusaku Imajo, Takahiro Tomita, Akito Sakai, Daisuke Nishio-Hamane, Gregory T. McCandless, Michi-To Suzuki, Zhijun Xu, Yang Zhao, Tom Fennell, Yoshimitsu Kohama, Julia Y. Chan, Ryotaro Arita, Collin Broholm, and Satoru Nakatsuji, "Zero-field Hall effect

emerging from a non-Fermi liquid in a collinear antiferromagnet $V_{1/3}\text{NbS}_2$ ”, Nature Communications **16**, 3532 (2025 年 4 月 18 日)

2) 学会講演

国際会議・国際研究会

- The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025, 2025 年 12 月 19 日

Takuya Nomoto: Systematic Exploration of Stable and Metastable Magnetic Structures via Cluster Multipole Theory

- Workshop: Topology Meets Correlation: Toward Functional Quantum Materials, 2025 年 9 月 5 日

Takuya Nomoto: A brief review of surface superconductivity in PtBi_2

国内研究会

- 山田研究会「量子液晶概念を基盤とした新奇物性科学の若手学際研究」, 2025 年 11 月 18 日

野本拓也: Oriented SSG による磁気構造生成と磁気構造予測ベンチマーク

高エネルギー物理実験研究室

1. 研究活動の概要

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

1) Belle 実験、Belle II 実験

高エネルギー加速器研究機構で行われている、世界最高輝度の電子・陽電子衝突型加速器 Super-KEKB を用いた国際共同実験 Belle II に参加している。Belle II 実験は、ルミノシティフロンティアの衝突型加速器実験であり、Super-KEKB 加速器で生成された大量の B 中間子対およびタウ粒子対の崩壊を、衝突点を取り囲むように設置された粒子検出器 Belle II で観測する。Belle II 実験は、2018 年の実験開始から少しずつ性能を上げ、2026 年 3 月には世界最高ルミノシティ $\mathcal{L} = 5.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成している。

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。本研究室では、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。本年度は、昨年度に引き続き SiPM の放射線損傷を緩和するためのアニーリング手法の開発を進め、その中で特にアニーリングによる光子検出効率への影響について調べた。また、新しい光検出器の検討に加え、その信号読み出し回路の開発も行っている。本年度は、新しい光検出器としてマルチチャンネル SiPM と、その読み出し基板（昨年度開発したもの）を 4 つ組合せて、ビームテストに向けた ARICH システムの構築を行なった。

Super-KEKB 加速器では、Sudden Beam Loss と呼ばれる突然ビームが失われて Belle II 検出器やビーム衝突点付近の超伝導電磁石に大きな被爆を生じさせる事象が問題があったが、調査が進んで解消しつつある。一方で、入射ビームを Super-KEKB リングに合流させるためのキッカー電磁石が誤爆にすることにより大きなビームロスを生じさせる事象が、新たな問題になっている。本研究室では、この問題に取り組むために、キッカー電磁石のパルス電源として使用されるサイクロトロン管の安定性を調べ、パルスのタイミングのドリフトが見られることが分かった。現在、ドリフトを抑えるために、パルスのタイミングのフィードバックシステムを開発を進めている。

2) ATLAS 実験

ATLAS 実験は、スイスの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 13.6 TeV で陽子と陽子を衝突させ、生成されるヒッグス粒子の性質を調べたり、超対称性理論などの標準模型を超えた新物理の探索を行っている。LHC 加速器は 2022 年から Run3 運転を行っており、2025 年末までに 300fb^{-1} のデータが ATLAS 検出器で取得された。さらに 2026 年夏には長期シャットダウンに入り、2030 年からルミノシティ（ビーム輝度）を 5 倍～7.5 倍に増大した高輝度 LHC (HL-LHC) として運転を再開、最終的な取得データ量を現行 LHC 加速器の 10 倍程度として精密測定を可能にする予定である。

本研究室は、ATLAS 検出器最内層で飛跡検出を行うシリコン・ピクセル検出器のオペレーション、および開発に参加している。オペレーションの観点では、物理データ取得に必須となる検出器のパラメータ微調整、データ品質モニタリングツールの改良に取り組んだ。開発の観点では、HL-LHC での実験に

用いられる新型ピクセル検出器の量産、品質試験に貢献している。ATLAS 実験で使用される予定の検出器モジュール約 10,000 個のうち、日本には 2,800 個の製作が割り当てられている。2024 年度に実機として用いられるモジュールの量産を開始し、2025 年度末までに約 1,000 個のモジュールに対して機械的・電氣的な各種検査を行い、その試験結果がデータベースに登録された。

3) T2K 実験

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

CP 対称性の破れを発見するためには、統計誤差とともに系統誤差も大きく削減していく必要があり、系統誤差の一つであるニュートリノと物質との相互作用の不定性の削減を目指した、ニュートリノ前置検出器の研究開発に参加している。これまで取り組んできた前置検出器 ND280 用新型ターゲット兼飛跡検出器 SuperFGD の研究開発については、検出器がインストール・運用開始されて一段落つき、本年度は昨年度に引き続き、ND280 とは別の検出器 WAGASCI / Baby MIND 検出器の研究開発に取り組んだ。WAGASCI / Baby MIND 検出器は、ターゲット部が水とプラスチックシンチレータで構成されるニュートリノ検出器であり、主にニュートリノと水の相互作用を測定するための検出器である。本年度は、WAGASCI 検出器で収集されたデータの健全性を調べる研究を行なった。

4) 宇宙線ミュオンを用いた大規模構造物の透視

地上に飛来する宇宙線ミュオンを用いて大規模な物体を透視する研究を進めている。これまで高エネルギー加速器研究機構および筑波大学と共同で、原子炉の透視を行う研究を進めてきた。国際廃炉研究機構および東京電力が行なっている福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの一つとして、溶融したと考えられる一号機から三号機の原子炉の炉心の核燃料の状態の調査に協力し、これまでに、福島第一原発 1 号機および 3 号機の炉心の状態の調査を行ない、一連の調査を行ってきた。また、その後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きた。現在は、茨城県東海村、J-PARC、および茨城大と共同で、東海村の古墳（舟塚 2 号墳）の透視を行うプロジェクトを行っている。本年度は、古墳を透視するためのミュオン検出器の二号機を舟塚 2 号墳に設置し、昨年度設置した初号機と合せて 2 方向からの古墳の観測を開始した。また、ミュオンの運動量情報を用いたミュオンの透視を行うシステムの開発も行なっており、本年度は、ミュオンの運動量測定に用いる永久磁石の小型の試作機を製作し、ミュオンの通過位置を高精度で測定するミュオン検出器の開発も進めた。

2. 研究業績

1) 論文

K. Špenko, I. Adachi, R. Dolenec, S. Dey, A. Hvala, T. Iijima, S. Iwata, G. Ghevondyan, R. Giordano and H. Kakuno, *et al.*,

“Operation and performance of the Belle II Aerogel RICH detector”

Nucl. Instrum. Meth. A **1087** (2026), 171430

- S. Kurokawa *et al.*, Belle II ARICH Group,
 “Studies for the upgrade of Belle II Aerogel RICH”
 Nucl. Instrum. Meth. A **1087** (2026), 171398
- S. Kurokawa, H. Kakuno, S. Nishida, M. Shoji, A. Lozar and S. Korpar,
 “Development and performance evaluation of readout systems for Belle II ARICH upgrade”
 Nucl. Instrum. Meth. A **1080** (2025), 170695
- S. Abubakar *et al.*, T2K and NOvA collaboration
 “Joint neutrino oscillation analysis from the T2K and NOvA experiments”
 Nature **646** (2025) no.8086, 818-824
- K. Abe *et al.*, T2K collaboration
 “Measurement of muon neutrino induced charged current interactions without charged pions in the final state using a new T2K off-axis near detector WAGASCI-BabyMIND”
 Phys. Rev. D **112** (2025) no.11, 112020
- S. Abe, H. Alarakia-Charles, I. Alekseev, C. Alt, T. Arai, T. Arihara, S. Arimoto, A. M. Artikov, Y. Awataguchi and N. Babu, *et al.*
 “Introducing a Markov chain-based time calibration procedure for multi-channel particle detectors: application to the SuperFGD and ToF detectors of the T2K experiment”
 JINST **20** (2025) no.10, P10030
- A. Abe *et al.*, T2K collaboration
 “Testing T2K’s Bayesian constraints with priors in alternate parameterisations”
 Eur. Phys. J. C **85** (2025) no.12, 1414
- K. Abe *et al.*, T2K collaboration
 “Results from the T2K Experiment on Neutrino Mixing Including a New Far Detector μ -like Sample”
 Phys. Rev. Lett. **135** (2025) no.26, 261801
- K. Abe *et al.*, T2K collaboration
 “First measurement of neutron capture multiplicity in neutrino-oxygen neutral-current quasielasticlike interactions using an accelerator neutrino beam”
 Phys. Rev. D **112** (2025) no.3, 032003
- K. Abe *et al.*, Hyper-Kamiokande collaboration
 “Sensitivity of the Hyper-Kamiokande experiment to neutrino oscillation parameters using accelerator neutrinos”
 Eur. Phys. J. C **86** (2026) no.2, 170
- K. Abe *et al.*, T2K collaboration
 “First Measurement of the Electron-Neutrino Charged-Current Pion Production Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector”
 Phys. Rev. Lett. **135** (2025) no.15, 151802

K. Abe *et al.*, T2K collaboration

“First Differential Measurement of the Single π^+ Production Cross Section in Neutrino Neutral-Current Scattering”

Phys. Rev. Lett. **135** (2025) no.17, 171803

K. Abe *et al.*, T2K collaboration

“Signal selection and model-independent extraction of the neutrino neutral-current single π^+ cross section with the T2K experiment”

Phys. Rev. D **112** (2025) no.7, 072008

S. Abe, I. Alekseev, T. Arai, T. Arihara, S. Arimoto, N. Babu, V. Baranov, L. Bartoszek, L. Berns and S. Bhattacharjee, *et al.*

“Characterization of the optical model of the T2K 3D segmented plastic scintillator detector unit cube”

Nucl. Instrum. Meth. A **1080** (2025), 170757

G. Aad *et al.*, ATLAS collaboration

“Characterising the Higgs boson with ATLAS data from the LHC Run-2”

Phys. Rept. **1116** (2025), 4-56

G. Aad *et al.*, ATLAS collaboration

“The quest to discover supersymmetry at the ATLAS experiment”

Phys. Rept. **1116** (2025), 261-300

G. Aad *et al.*, ATLAS collaboration

“Search for displaced leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV and 13.6 TeV pp collisions with the ATLAS detector”

Phys. Rev. D **112** (2025) no.1, 012016

G. Aad *et al.*, ATLAS collaboration

“Transforming jet flavour tagging at ATLAS”

Nature Commun. **17** (2026) no.1, 541

2) 学会講演

● 日本物理学会 第80回年次大会 2025年9月16～19日（広島大学）

鎌田明優, 角野秀一 ほか

「T2K 実験前置検出器 WAGASCI および Wall MRD の取得データの評価」

● 日本物理学会 2026年春季大会 2026年3月23～26日（オンライン開催）

菊田慎司, 角野秀一 ほか

「Belle II/SuperKEKB 実験 入射キッカー電磁石出力タイミング変動の解析」

国際会議

● The 12th international workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2025) 2025年9月15日-19日（Mainz, Germany）

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

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

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程と分光研究

静電型イオン蓄積リングは、静電場のみを用いて分子イオンの軌道制御を行い、分子イオンをリング上に周回させることで長時間蓄積可能な装置である。本装置の強みは周回イオン種の電荷や質量に関する制限がなく蓄積可能で、周回イオンの飛行時間差を用いることで高精度な質量選別もでき、周回中に解離あるいは中性化した分子を高効率に検出できるという点にある。これらの強みを生かして、本学に設置された TMU E-ring を用いて、これまで分子イオンやクラスターイオンの内部エネルギーの緩和、すなわち冷却過程の研究を行っている。

1-a) 分子クラスター正イオンの解離速度定数の決定 分子クラスターの崩壊過程を記述するパラメータの特定は、極めて困難である。特に、速度定数における頻度因子の決定は最も困難な課題の一つとなっている。実験における主な課題は、崩壊するクラスターが普遍的に広範な内部エネルギー分布を持つ点にある。このエネルギーの不均一性により、単一の統計モデルに基づく $1/t$ 型の減衰や、単純なアレニウスプロットの適用が困難となる。また理論面では、単一原子の蒸発と、回転自由度を有するフラグメントの放出とでは、頻度因子に顕著な差が生じることが示唆されている。近年、 C_{60}^+ の熱電子放出速度に関する研究において、広範なエネルギー分布下でも頻度因子を決定できる手法が提案された。そこで本研究では、この手法を三量体（トリマー）放出が知られている炭素クラスター正イオンに適用し、頻度因子が大幅に増大することを実証する。本研究の着手にあたり、まずは TMU E-ring を用いて炭素クラスター正イオンの反応速度定数を網羅的に測定し、精密測定に適した対象候補を選定した。現在、この予備実験データを基に、スウェーデンの極低温静電型イオン蓄積リング DESIREE を用いて本実験が進行中である。

1-b) 分子負イオンの電子脱離速度定数の決定 一般に電子脱離の反応速度定数は蛍光放出よりも数桁大きいので、両者が競合することは稀である。しかし、 C_2^- の電子励起状態 $B^2\Sigma_u^+(v=5)$ は電子脱離閾値に極めて近接しているため、例外的に電子脱離と蛍光放出の競合が生じる。近年我々は、 C_2^- の $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移における光誘起電子脱離スペクトルを測定し、この競合領域における電子脱離速度の回転準位依存性を導出した。その結果、当該領域における電子脱離速度は、エネルギーに対してべき乗則に従うのではなく、指数関数的に増加することを明らかにした。本研究では、この現象をより詳細に理解することを目的とし、 C_2^- の同位体 ($^{12}C^{13}C^-$, $^{13}C_2^-$) に対しても同様の測定を試みた。同位体置換によって振動準位がシフトすることで、より電子脱離閾値に近接したエネルギー領域での速度定数の評価が可能となる。現在、測定は完了しており、詳細な解析を進めている。

2) 多価イオンの電荷移行反応

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

ン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance, ECR) 型多価イオン源を用いて様々な原子の多価イオンビームを生成し、衝突ダイナミクスと原子分光という二つの視点での研究を推進している。

2-a) EUV 領域における解離フラグメント多価原子イオンからの発光断面積 分子標的と多価イオンの衝突において多電子捕獲によって分子が解離する過程の研究例は少なくない。二原子分子標的の場合、解離した2つの原子イオンの同時計測によって価数分布と運動エネルギー放出 (Kinetic Energy Release, KER) 分布の測定が行われているが、多価原子フラグメントイオンからの発光に関する報告は当研究室が2017年に発表したもの以外は見当たらない。今年度は8-13 価の Kr イオンと N_2 , O_2 , および NO 標的の衝突における EUV 領域での発光を観測し、発光断面積が既知の発光線の観測によって分光観測系の感度補正を行うことで、フラグメント原子イオンからの発光断面積の絶対値についても検討した。2-4 価の N および O 原子イオンの $n = 2 - 3$ および $n = 2 - 4$ の発光が観測され、発光断面積は $10^{-17} - 10^{-16} \text{ cm}^2$ と予想以上に大きく、入射イオンの価数に対する依存性も観測された。これらの高励起多価フラグメント原子イオンの生成機構に関する知見がこれまでに全く無いため、系統的な研究を進めると共に理論的な考察を進めて行く予定である。

2-b) He 様準安定状態イオンの電荷移行衝突における軟 X 線発光スペクトル ECR イオン源の内部では 10^6 K 程度の電子温度のプラズマが形成されているため、引き出されたイオンには励起状態が含まれている。特に He 様イオンについては寿命の長い $1s2s \ ^3S_1$ 状態が数%程度含まれていることが知られている。この準安定状態の割合については過去に2つの論文が報告されているものの、詳しく追試験された様子が見られず、準安定状態のイオンの衝突過程に関する報告でも、その値については余り言及されてこなかった。イオン源の運転条件によって引き出されるイオンの価数分布は大きく異なることから、準安定状態の割合も条件によって異なると考えられるが、それを示した実験的な報告は見られない。そこで、準安定状態が標的気体と衝突するときに発光する軟 X 線領域の発光スペクトルを観測し、その発光強度から準安定状態の割合を調べることを目標にして、シリコンドリフト検出器を用いて C, N, および O の He 様イオンと He 標的での発光スペクトルを観測した。まずは、発光断面積の理論値がある $^{13}\text{C}^{6+}$ -He 衝突での $\text{C}^{5+} \ 1s-2p$ および $1s-3p$ のスペクトルから検出効率を求め、各スペクトルにおける準安定状態の割合 f と発光断面積 σ の積 $f \cdot \sigma$ を系統的に求めた。今後はイオン源の運転条件に対する $f \cdot \sigma$ の変化から、準安定状態の割合について議論できるような測定を予定している。

2-c) 偏向電場型分析器を用いた電荷移行断面積の測定 地球磁気圏において地球大気由来の分子イオン (N_2^+ , O_2^+ , NO^+) が希薄な中性水素原子と衝突することで消失する過程が「あらせ」衛星によって観測されている。この現象の解析のためには一価分子イオンと水素原子の電荷移行断面積が必要であるが、過去に測定例は見つからなかった。そこで、水素原子と同じイオン化ポテンシャルをもつ CH_4 を用いた測定を行っている。これまでに N_2^+ と O_2^+ に関する測定が済んでいたので、今年度は NO^+ を用いた測定を行った。10-20 keV の衝突エネルギー範囲において、 N_2^+ と O_2^+ は高エネルギーほど断面積が低下する傾向を示していたが、 NO^+ の衝突エネルギー依存性は逆となり、近共鳴電荷移行の単純なモデルでは理解できないことが判明した。また、 CH_4 分子標的の幾何学的サイズを無視して良いという根拠が明白ではなかったため、イオン化ポテンシャルに近い Kr を用いた測定も行った。その結果、幾何学的サイズの影響は見られるものの、十分に小さいと言えることが判った。

2-d) 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数据を取得する共同研究を東北大・電通大・核融合研と進めている。理論シミュレーションによる予想によれば、可視・赤外発光にはランタノイドの寄与が大きいとされているため、これまでに3-4 価の Er に関する電荷交換分光スペクトルを観測したが、La, Ce および Pr については有意な結果を得ることができなかった。これまでは

純金属をプラズマに挿入することで金属多価イオンを生成していたが、今年度は有機金属錯体の使用を試みた。Nd(C₅H₅)₃ の粉末を用意して室温で昇華した蒸気をプラズマチェンバーに導入して Nd 多価イオンの生成を試みたが、衝突分光実験に十分なイオンビーム強度が得られなかったため、試料を加熱する機構を開発する予定である。

3) 低温気体中におけるイオン移動度

液体窒素によって冷却した移動管に He または H₂ 気体を 20-80 Pa 程度の圧力で満たし、電子衝撃型イオン源で生成した原子または分子イオンを 5-20 eV の運動エネルギーで入射して、熱化したイオンの移動速度を測定した。H₂ 気体中では H₃⁺ の到着時間スペクトルが 2 つに分裂して観測され、正三角形の電子基底状態以外に直線型の電子励起状態が観測された可能性があると考えて様々な条件での測定を行ったが、複数の H₂ 分子が H₃⁺ に結合して生成したクラスターイオンの影響と考えるのが最も自然であるという結論となった。この結論を裏付けるために、H₂ 気体ではなく He 気体中での H₃⁺ および同位体である D₃⁺ について移動速度の測定を行い、移動速度から求めた実効的な運動量移行断面積である衝突積分の値が 2 つの分子イオンでほぼ一致することを見いだした。また、HeH⁺ および HeD⁺ についても測定を行い、この系では非常に顕著な衝突積分の違いが観測されることを明らかにした。HeH⁺ と HeD⁺ では、He 気体分子との粒子間ポテンシャルは殆ど同じと考えられるが、質量の違いによって分子イオンの回転定数が異なることから、衝突による回転励起の様子に大きな違いがみられて、それが衝突積分に反映するものと考えられる、このように分子イオンの回転励起が移動度に反映することを判りやすい形で示した例はなく、過去に報告した一時的回転励起による移動度の低下を裏付ける結果とも言える。一方、H₃⁺ と D₃⁺ の衝突積分の一致は、He 気体分子との粒子間ポテンシャルが同位体には殆ど依存しないことと、粒子間ポテンシャルの異方性が小さく衝突による回転励起が殆ど起こらないことを示している。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Nishimura, K. Shimada, L. Liu, J. Wang, and H. Tanuma, “Transfer excitation of He⁺ in collisions of C⁴⁺, N⁵⁺, and O⁶⁺ with He”, *Phys. Rev. A* **113** (2026) 022808.

S. Kodangil, M. Tanaka, D. Kato, G. Gaigalas, H. Tanuma, and N. Nakamura, “Experimental measurement of transition probabilities of neutral and singly ionized europium using Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)”, *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.* **348** (2026) 109692.

Priti, M. Goto, T. Oishi, H.A. Sakaue, I. Murakami, N. Nobuyuki, H. Tanuma, M. Tanaka, G. Gaigalas, and D. Kato, “Measurements of optical emission from singly ionized Er ions at LHD for laboratory assessment of atomic data relevant to opacity of kilonovae”, *J. Fusion Energy*, **44** (2025) 65.

A. Singh, A. Iguchi, Z. Golpariani, T.C. Bernaards, A. Fujii, H. Tanuma, T. Azuma, K. Mizuse, S. Kuma, and A. Vilesov, “Infrared Spectroscopy of radical-cation clusters (NH₃)_{n=4-6}⁺”, *J. Phys. Chem. A* **129** (2025) 9721.

A. Singh, A. Iguchi, T.C. Bernaards, Z. Golpariani, K. Mizuse, A. Fujii, H. Tanuma, T. Azuma, S. Kuma, and A. Vilesov, “Infrared Spectroscopy of radical cation clusters (NH₃)₂⁺ and (NH₃)₃⁺”, *J. Phys. Chem. A* **129** (2025) 2472.

2) 学会講演

● 第 13 回イオン移動度研究会 2025 年 4 月 19 日 (高知工業高等専門学校)

宇井 諒, 今泉 咲希, 木村 瑠亜, 永野 嵩聖, 田沼 肇: 「移動管内で生成したクラスターイオンの移動度の謎 -ほぼ解決編-

● 第 50 回原子衝突学会年会 2025 年 8 月 18 日~20 日 (東京都立大学)

板橋 美和: 「地球磁気圏における分子イオン消失過程に関連した電荷移行断面積の測定」

木村 瑠亜: 「77.3 K のヘリウムガス中における H_3^+ および D_3^+ の移動度測定」

西村 勇輝: 「多価イオンの衝突によりイオン化された標的からの発光の分光測定」

永野 嵩聖: 「77.3 K におけるヘリウムガス中の HeH^+ および HeD^+ のイオン移動度の同位体効果」

田沼 肇: 「クラスターの移動度がサイズに依存しない理由」

大関 勇仁: 「多価 Ar イオン衝突における EUV 発光」

山中 真吉: 「Tokyo-EBIT を用いた H-like 及び He-like 鉄イオンの電荷交換 X 線スペクトル」

● 日本物理学会第 80 回年次大会 2025 年 9 月 16 日~19 日 (広島大学・東広島キャンパス)

板橋 美和, 西 雅, 田沼 肇: 「地球磁気圏における分子イオン消失過程理解のための電荷移行断面積の測定」

木村 瑠亜, 永野 嵩聖, 田沼 肇: 「低温ヘリウム気体中における H_3^+ および D_3^+ イオンの移動度測定」

永野 嵩聖, 木村 瑠亜, 田沼 肇: 「低温ヘリウム気体中における HeH^+ および HeD^+ イオンの移動度の同位体効果」

● 「原子分子素過程研究とプラズマ分光計測の学際的展開」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」 合同研究会 2025 年 12 月 17 日~19 日 (核融合科学研究所)

田沼 肇: 地球磁気圏における分子イオンと水素原子の電荷移行過程理解のための断面積測定実験

国際会議

● 22nd International Conference on Atomic Processes in Plasmas (APiP 2025) 2025 年 7 月 22~25 日 (Tokyo Metropolitan Univ., Japan)

Shinkichi Yamanaka, Hajime Tanuma, and Nobuyuki Nakamura: Charge Exchange X-ray Spectra of H-like and He-like Iron at Tokyo EBIT

● 34th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2025) 2025 年 7 月 29 日~8 月 5 日 (Sapporo Convention Center, Japan)

Miwa Itabashi, Miyabi Nishi, and Hajime Tanuma: Charge transfer cross-section measurements for understanding molecular ion loss processes in the Earth's magnetosphere

Yuki Nishimura, Yuto Ozeki, Kousuke Kamezaki, and Hajime Tanuma: Photon emission from ionized target atoms in collisions of multiply charged ions in the EUV and visible regions

Ryo Ui, Saki Imaizumi, Rua Kimura, Shusei Nagano, and Hajime Tanuma: Ion mobility of $\text{H}_3^+(\text{H}_2)_n$ ($n \leq 3$) in H_2 at 77 K

Shimpei Iida, Susumu Kuma, Shota Masuda, Masaaki Baba, Hajime Tanuma, Haruo Shiromaru, and Toshiyuki Azuma: Spectroscopic investigation of electron detachment of C_2^- using the TMU E-ring

● XXIV International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL 2025) 2025 年 8 月 7 日～10 日 (Kunibiki Messe, Matsue, Japan)

Rua Kimura, Shusei Nagano, and Hajime Tanuma: Mobility measurements of H_3^+ and D_3^+ ions in He gas at 77.3 K

Shusei Nagano, Rua Kimura, and Hajime Tanuma: Isotope effect in mobility of HeH^+ and HeD^+ ions in He gas at 77.3 K

● Workshop on Interstellar Matter 2025 (ISM 2025) 2025 年 11 月 12 日～14 日 (Hokkaido Univ., Japan)

Hajime Tanuma, Ryo Ui, Rua Kimura, and Shusei Nagano: Ion mobility measurements for H_3^+ , D_3^+ , HeH^+ , and HeD^+ in He gas at 77.3 K

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、(1) X 線を観測手段とした太陽系、星形成領域、白色矮星、銀河団等の宇宙における多様な高エネルギー現象の研究と (2) 宇宙観測のための衛星に搭載する X 線望遠鏡や X 線マイクロカロリメータ等の装置開発の 2 つを柱として活動を行っている。今年度、知のみやこ助教として谷口氏が着任し、本研究室に所属しつつ独立した研究を進めているためその成果についても記す。

1) X 線天文衛星 XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) の運用と科学観測

XRISM は日本のフラッグシップとなる X 線天文衛星であり、2023 年 9 月に打ち上げられた。搭載装置の一つである Resolve は X 線マイクロカロリメータであり、優れた分光能力を特徴とする。開発には本研究室が大きく貢献しており、軌道上で順調に運用が続けている。Resolve の冷却デューワーの蓋は開放できておらず、 <2 keV の X 線は吸収されて観測が難しい状況である。そこで冷凍機動作時の振動で開ける運用を試みたが残念ながら蓋は開放されなかった。一方で優れた分光性能を持続中であり、コンパクト天体や銀河団、超新星残骸などについて Nature 級の数多くの科学成果を創出している。石崎、江副、石川らによる Resolve 装置論文も出版された。

宮本、石田らはウォルフライエ星と O 型星の連星である WR140 の Resolve スペクトルを解析した。検出した Fe 等の輝線のドップラー速度情報から、星風衝突による衝撃波面からの放射モデルを仮定して放射領域に制約をつけた。He-like イオンが H-like イオンに比べて衝撃波の上流に存在することを示唆する。これは衝撃波の上流ほど高温で電離度が高いという従来の描像とは異なるもので、プラズマが電離平衡に達していないことを示唆する新たな成果となった。図 1 に示す。

管野、江副らは広視野 CCD で広がった放射に世界最高級の感度を誇る XRISM Xtend のデータに着目し、2024 年 8 月に生じた X クラスの太陽フレアに伴う太陽風電荷交換 X 線を解析した。そして C から Fe までの様々な元素からの輝線検出に成功し、放出された太陽風プラズマの温度に制約を付けた。過去の観測例と比較すると高強度のフレアほどプラズマ温度が高く、コロナ加熱が活発になるためと考えられる。さらに電離温度が電子温度よりも低く電離非平衡であることや Inverse FIP (First Ionization Potential) 効果の兆候などを見出した。これらは X 線観測が太陽風プラズマの性質を調べる手段となることを示しており、今後の観測への応用が期待できる。

Resolve では蓋が閉まっているため観測が難しい <2 keV の天体解析のため、「すざく」衛星や XMM-Newton 衛星を用いた彗星からの広がった電荷交換 X 線データの解析も進めた。森本、世良、沼澤、江副らは彗星周辺に広がる希薄な大気であるコマの化学組成を X 線輝線比から制約し、今後の X 線マイクロカロリメータを用いた観測の先鞭を付けた。このほかにも小淵、石崎らは Resolve で観測されたブラックホール連星のデータ解析を進めた。

2) 地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X (GEOspace X-ray imager) の開発

太陽風プラズマと地球の超高層大気である外圏の衝突による電荷交換反応を用いて地球磁気圏の可視化を狙う超小型衛星であり、都立大が中心となって協力機関と共に開発を進めてきた。従来の X 線天文衛星「すざく」並の広がった放射への感度を誇る広視野望遠鏡と CMOS カメラを組み合わせた独自の超小型 X 線撮像分光装置を搭載する。

江副、石川、沼澤らが中心となり、学生や協力機関と共に、観測装置に用いる望遠鏡用の微細穴加工を施した Si 基板の製作と評価、望遠鏡と CMOS カメラおよび可視光遮光フィルターを固定するハウジングの設計と構造解析などが進んだ。図 2 に示す。

宮内や小笠原らは望遠鏡の加工に用いるアニールと変形プロセスの実施と研究を進めた。石牟礼、竹内、沼澤らは微細穴からなるため正確な構造解析が困難な望遠鏡について、打ち上げ時の環境を模擬する振動試験を実施した。本学の日野キャンパスの装置を借用してシステムデザイン学部の方々に協力を頂いて、破損なく無事に試験を突破した。これは学内連携の意味でも意義深い。

さらに過去の X 線天文衛星データや数値シミュレーションを用いたサイエンス検討も進め、国際会議も主催した。会議開催においては本学の国際共同研究支援の資金を活用した。

3) 次世代観測技術の開発と将来月面探査検討

XRISM や GEO-X の先の衛星に向けた新たな観測技術として、MEMS (マイクロマシン) 技術に応用したロブスターアイ光学系の開発を進めた。GEO-X に採用した Wolter I 型光学系を集光能力をやや落とす代わりに広視野に拡張したものであり、重力波源を探る全天 X 線モニターや太陽系探査衛星などに幅広く応用できる。四角穴が並んだ Angell 配置が一般的だが、石川、江副らは 2 枚の基板を用いてスリットが直行する Schmidt 型を開発してきた。より正確な微細穴加工が可能であり側壁評価も容易である。福島らは試作品の X 線結像性能を JAXA 宇宙研の 30 m ビームラインを用いて調べた。その結果、鏡の一部に歪みが生じていることが分かったため、これを解消する新たなデザインを検討した。

Si 基板を高温塑性変形して製作する角度分解能の良い全反射鏡の製作も進めた。沼澤、世良、松村、石田らは XRISM 衛星を凌駕する 1 分角以下の角度分解能を目指し、変形時の治具の噛み合わせを形状測定装置で定量的に評価することで新たな変形条件の指針を得た。同時に複数枚の Si 基板をカーボンシートを挟んで変形する一括変形も試して基板の貼りつきなく取り出すことに成功した。衛星搭載には 100~1000 枚オーダーの鏡が必要であり大量生産に役立つ。

この他にも単結晶 Si 基板を曲げたブラッグ反射集光系の開発や MEMS Wolter I 型光学系の性能向上のための新たな条件出しにも取り組んだ。内野らは光学系評価に用いる JAXA 宇宙研の X 線ビームラインへの二結晶分光器の導入をリードした。

技術開発と並行して日本も参加する月面探査アルテミス計画を念頭に置いて、GEO-X 観測装置をベースとした月面 X 線探査のシミュレーションの結果もまとめた。図 3 に示す。戸井田、江副、石川、沼澤らは太陽 X 線を入射光として月面で散乱される X 線を広視野で撮像分光することで月面の化学組成を定量的に調べることが可能であることを示した。今後の月の起源や資源探索に資することが期待できる。

4) 太陽双子星を用いた太陽系大移動の研究

谷口らは太陽双子星と呼ばれる、太陽と非常に似た性質を持つ恒星に着目した研究を推進した。まず、Gaia 衛星 DR3 によって公開された GSP-Spec 大規模カタログのマイニングにより、高信頼度の太陽双子星サンプルとしては世界最大サイズのサンプル (6,594 天体) を構築した。続いて、本サンプル中の太陽双子星の年齢分布から、太陽系が過去に経験した「大移動」において、他の多数の太陽双子星もともに移動した可能性が高いことを示唆した (図 4)。本成果は 2 報の査読論文として出版され、本学からプレスリリースも行った。

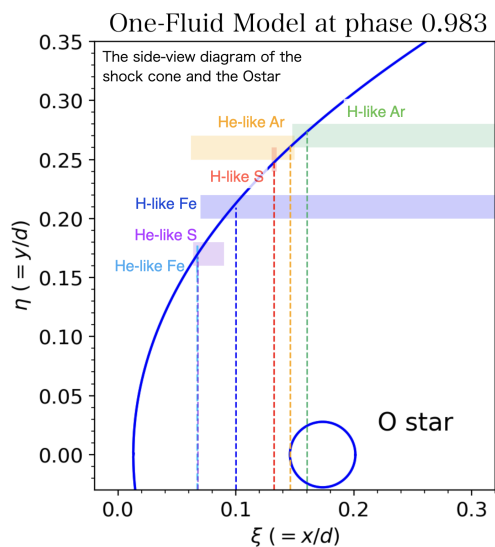


図 1: XRISM Resolve の WR140 スペクトル解析に基づく各イオンの推定される放射領域。弓形の実線がウォルフライエ星と O 型星の星風衝突による衝撃波面、丸が O 型星の位置を表す。色付きの四角は各イオンの推定される放射領域を示す。

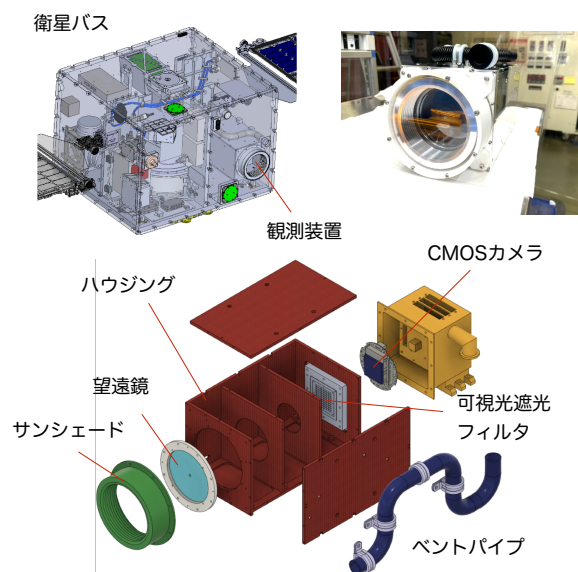


図 2: GEO-X 衛星本体の透過図と超小型 X 線撮像分光装置の分解図と開発品の写真。

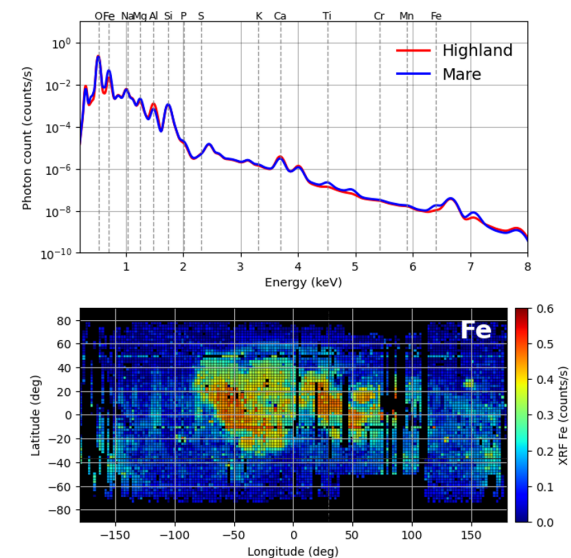


図 3: 月面からの蛍光 X 線のスペクトルシミュレーションと Fe K 輝線のイメージシミュレーション。上図の色の違いは月面の高地と低地からのもの。下図は月面のマップで色の違いは輝線強度に対応する。

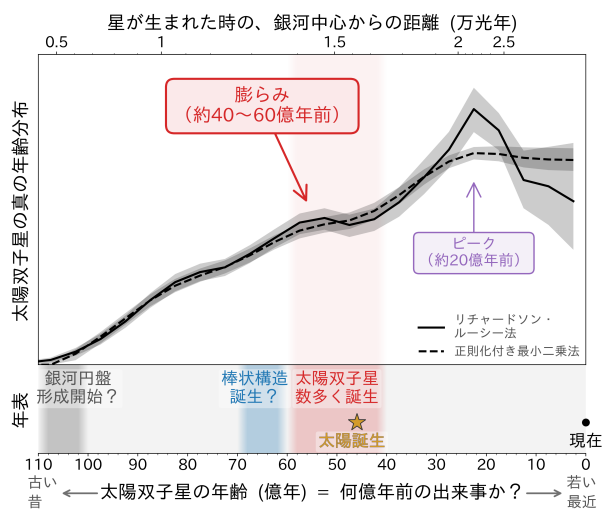


図 4: 大規模サンプルにより得られた太陽双子星の年齢分布と提案したシナリオ。

2. 研究業績

1) 論文

(査読あり)

XRISM collaboration, "A fast starburst wind consumes most of the energy from supernovae", *Nature*, **651** 909-913, 2026

XRISM collaboration, "Disentangling Multiple Gas Kinematic Drivers in the Perseus Galaxy Cluster", *Nature*, **650** 309-313, 2026

XRISM collaboration, "Chlorine and Potassium Enrichment in the Cassiopeia A Supernova Remnant", *Nature Astronomy*, **10** 144-153, 2026

XRISM collaboration, "Dynamics of AGN feedback in the X-ray bright eastern and southwestern " arms" of M87, mapped by XRISM", *A&A*, **707**, id.A124, 2026

XRISM collaboration, "A XRISM/Resolve View of the Dynamics in the Hot Gaseous Atmosphere of M87", *ApJ*, **998**, id210, 2026

Toida, D. Ishi, Y. Ezoe, M. Numazawa, K. Ishikawa "Numerical simulation of light-element geochemistry of the lunar surface using a compact and lightweight XRF imaging spectrometer", *Earth, Planets and Space, Express Letter*, **78**, id56, 2026

H. Suzuki, Y. Ezoe, *et al.*, "XRISM observations of solar flare X-ray emission reflected in the Earth's atmosphere, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, 1301-1312, 2025

XRISM collaboration, "XRISM/Resolve view of Abell 2319: Turbulence, sloshing, and ICM dynamics" *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, 1278-1289, 2025

XRISM collaboration, "XRISM Constraints on Unidentified X-Ray Emission Lines, Including the 3.5 keV Line, in the Stacked Spectrum of 10 Galaxy Clusters", *Astrophys. J. Letters*, **994**, 28, 2025

XRISM collaboration, "Comparing XRISM Cluster Velocity Dispersions with Predictions from Cosmological Simulations: Are Feedback Models Too Ejective ?", *Astrophys. J. Letters*, **993**, 11, 2025

XRISM collaboration, "Stratified wind from a super-Eddington X-ray binary is slower than expected", *Nature*, **646**, 57-61, 2025

R.Kelley, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, K. Ishikawa, *et al.*, "The Resolve instrument onboard The X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)" , *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042026, 2025

M. A. Leutenegger, Y. Ishisaki, *et al.*, "Core line spread function calibration of the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission Resolve X-ray calorimeter spectrometer", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042026, 2025

Y. Ishisaki, Y. Ezoe, K. Ishikawa, *et al.*, "Resolve instrument onboard XRISM: Design, integration, and instrument test results", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042023, 2025

- K. Sato, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, K. Ishikawa, *et al.*, "Pre- and post-launch operation of the Resolve soft X-ray spectrometer onboard the XRISM satellite", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042020, 2025
- M. Sawada, Y. Ishisaki, *et al.*, "Strategies for the in-orbit gain tracking using the modulated X-ray sources for the Resolve microcalorimeter spectrometer on the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042019, 2025
- M. E. Eckart, Y. Ishisaki, *et al.*, "Energy gain scale calibration of the XRISM Resolve microcalorimeter spectrometer: ground calibration results and on-orbit comparison", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042018, 2025
- F. S. Porter, Y. Ishisaki, *et al.*, "In-flight performance of the XRISM/Resolve detector system", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042016, 2025
- Y. Maeda, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, K. Ishikawa, *et al.*, "Initial in-orbit operation of the soft x-ray spectrometer Resolve onboard the XRISM satellite", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042014, 2025
- M. Sawada, Y. Ishisaki, *et al.*, "Absolute timing calibration of the Resolve microcalorimeter spectrometer on the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042011, 2025
- M. Mizumoto, Y. Ishisaki, *et al.*, "High-count rate effects in event processing for XRISM/Resolve X-ray microcalorimeter: I. Ground test", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042005, 2025
- Y. Mochizuki, Y. Ishisaki, *et al.*, "Optimization of X-ray event screening using ground and in-orbit data for the Resolve instrument onboard the XRISM satellite", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **11**, 042002, 2025
- XRISM collaboration, "Delving into the depths of NGC 3783 with XRISM: II. Cross-calibration of X-ray instruments used in the large, multi-mission observational campaign", *Astronomy & Astrophysics*, **702**, A147, 2025
- XRISM collaboration, "Constraining gas motion and non-thermal pressure beyond the core of the Abell 2029 galaxy cluster with XRISM", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, S242, 2025
- XRISM collaboration, "Thermal and Kinematic Properties of Ejecta in SN1987A revealed by XRISM", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, S193, 2025
- XRISM collaboration, "Evidence for Charge Exchange Emission in Supernova Remnant N132D from XRISM/Resolve Observations", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, S188, 2025
- M. Mizumoto, Y. Ishisaki, *et al.*, "High-count-rate effects in event processing for the XRISM/Resolve X-ray microcalorimeter. II. Energy scale and resolution in orbit", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, S39, 2025
- M. Tashiro, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, K. Ishikawa, *et al.*, "X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **77**, S1, 2025

XRISM collaboration, "Kinematic Evidence for Bipolar Ejecta Flows in the Galactic Supernova Remnant W49B", *Astrophys. J. Letters*, **988**, 55, 2025

XRISM collaboration, "Structured ionized winds shooting out from a quasar at relativistic speeds", *Nature*, **641**, 1132, 2025

XRISM collaboration, "XRISM forecast for the Coma Cluster: stormy, with a steep power spectrum", *Astrophys. J. Letters*, **985**, 20, 2025

R. Minematsu, Y. Ezoe, *et al.*, "Development of a Structural Thermal Model for a Water-Based Propulsion System on the GEO-X Mission", *Proc. IEEE Aerospace Conference*, 8.0803(2022), 2025

Taniguchi, Daisuke ; de Laverny, Patrick ; Recio-Blanco, Alejandra ; Tsujimoto, Takuji ; Palicio, Pedro A., "Solar twins in Gaia DR3 GSP-Spec I. Building a large catalog of Solar twins with ages", *Astronomy & Astrophysics*, **707**, A260, March 2026, DOI: 10.1051/0004-6361/202658913

Tsujimoto, Takuji ; Taniguchi, Daisuke ; Recio-Blanco, Alejandra ; Palicio, Pedro A. ; de Laverny, Patrick, "Solar twins in Gaia DR3 GSP-Spec II. Age distribution and its implications for the Sun's migration", *Astronomy & Astrophysics (Letter to the Editor)*, **707**, L11, March 2026, DOI: 10.1051/0004-6361/202658914

Hattori, Kohei ; Taniguchi, Daisuke ; Tsujimoto, Takuji ; Matsunaga, Noriyuki ; Sameshima, Hiroaki ; Elgueta, Scarlet S. ; Otsubo, Shogo, "Discovery of WINERED-HVS1: A Metal-rich Hypervelocity Star Candidate Ejected from the Galactic Center", *The Astrophysical Journal*, **989**, 142, August 2025, DOI: 10.3847/1538-4357/ade78a

Thorsbro, B. ; Khalidy, S. ; Rich, R. M. ; Schultheis, M. ; Taniguchi, D. ; Amarsi, A. M. ; Kordopatis, G. ; Nandakumar, G. ; Nishiyama, S. ; Ryde, N., "Supergiant GCIRS 22 in the Milky Way nuclear star cluster: Revised alpha abundances", *Astronomy & Astrophysics*, **704**, A62, December 2025, DOI: 10.1051/0004-6361/202556618

Petralia, Ilaria ; Minniti, Dante ; Fernández-Trincado, José G. ; Matsunaga, Noriyuki ; Taniguchi, Daisuke ; Saroon, Sasi ; Garro, Elisa R. ; Sameshima, Hiroaki ; Otsubo, Shogo ; Sarugaku, Yuki ; Takeuchi, Tomomi, "Kinematical and dynamical properties of recently discovered bulge and disc star clusters with WINERED", *Astronomy & Astrophysics*, **707**, A83, March 2026, DOI: 10.1051/0004-6361/202556123

(査読なし)

R. Fuse, Y. Ezoe, *et al.*, "GEO-X Mission: Demonstration for Deep Space Access via Rideshare Launch by Micro-Satellite", *Proc. ISTS*, 2025-k-6-1, 2025

2) 学会講演

● 宇宙科学と OTV 2025 2025 年 05 月 9 日 (日本橋、ハイブリッド)

江副 祐一郎 : X 線による太陽系探査と高軌道 OTV への期待 (招待講演)

● JpGU 2025 2025 年 05 月 25~30 日 (幕張メッセ)

Y. Ezoe, et al., : Status of GEO-X mission (GEOspace X-ray imager)

● 宇宙科学シンポジウム 2025 年 7 月 31 日～8 月 1 日（宇宙航空研究開発機構 相模原キャンパス）

江副 祐一郎ほか：「太陽系 X 線探査と GEO-X ミッション」

沼澤 正樹、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「シリコン高温塑性変形技術を用いた次世代 X 線光学系の開発」

伊師 大貴、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「原子層堆積技術を用いた薄膜積層による軽量・大面積 X 線望遠鏡の開発」

● SGEPS 将来計画会合 2025 年 9 月 8 日（オンライン）

江副 祐一郎：「Status of GEO-X mission (GEOspace X-ray imager)」

● 日本天文学会 2025 年秋季年会 2025 年 9 月 9～11 日（海峡メッセ下関）

江副 祐一郎ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X の現状 IX」

沼澤 正樹、江副 祐一郎ほか：「Si 高温塑性変形技術を用いた薄板型 X 線光学系における反射鏡基板の“多重一括”変形の試作」

宮本 明日香、石田 学ほか：「XRISM Resolve による大質量星の星風衝突衝撃波の輝線放射領域の特定」

森本 大輝、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X 搭載望遠鏡の熱サイクル耐性評価」

小笠原 勇翔、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X 搭載望遠鏡の高温塑性変形プロセスの改善」

菅野 大二郎、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Xtend を用いた 2024 年 8 月磁気嵐時における太陽風電荷交換 X 線イベントの解析」

世良 直也、江副 祐一郎ほか：「Si 高温塑性変形技術を用いた薄板型 X 線光学系のための光線追跡シミュレータの開発と Jaccard 係数による評価」

福島 優、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「マイクロマシン技術を用いた Schmidt 配置 Lobster eye 光学系の X 線性能評価」

清水太翔、江副 祐一郎、石川 久美ほか： 「“地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X 搭載 CMOS カメラのベントパイプ遮光試験」

● 応用物理学会 2025 年秋季年会 2025 年 9 月 7～10 日（名城大学）

伊師 大貴、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X の現状 IX」

● Comet Interceptor Science Team meeting 2025 年 9 月 17 日（東京大学）

江副 祐一郎：「彗星 X 線観測とのシナジー」(招待講演)

● SGEPS 第 158 回 2025 年秋学会 2025 年 11 月 23～27 日（神戸大、ハイブリッド）

江副 祐一郎ほか：「地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状」

● 第 69 回 宇宙科学技術連合大会 2025 年 11 月 25～29 日（北海道大）

布施 綾太、江副 祐一郎ほか：「超小型探査機による地球磁気圏観測と深宇宙アクセスを実証する GEO-X ミッション」

● 天の川銀河研究会 2025 年 11 月 26～28 日（鹿児島大学）

谷口 大輔：「Gaia GSP-Spec を用いた大規模な太陽双子星カタログの構築」

● Optics and Photonics Japan 2025 年 12 月 9～11 日（あわぎんホール）

石川 久美、江副 祐一郎ほか：「微細加工技術を用いた宇宙用広視野光学系の開発」

沼澤 正樹、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「シリコン高温塑性変形技術を用いた宇宙 X 線望遠鏡の開発」

伊師 大貴、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「シリコン高温塑性変形技術を用いた湾曲ブラック結晶による宇宙 X 線偏光・分光計の開発」

● 宇宙理学研究センター研究会 2025 年 12 月 23 日（東京都立大）

江副 祐一郎：「宇宙物理実験研究室の紹介」

森本 大輝、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X 搭載望遠鏡の熱サイクル耐性評価」

内野 翔、石田 学ほか：「Si(111) 結晶を用いた宇宙科学研究所 X 線ビームライン用二結晶分光器の立ち上げ」

菅野 大二郎、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Xtend を用いた 2024 年 8 月磁気嵐時における太陽風電荷交換 X 線イベントの解析」

世良 直也、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「XMM-Newton 衛星で観測した C/2000 WM1 (LINEAR) の空間組成解析」

松村 温斗、石田 学ほか：「シリコン高温塑性変形技術を用いた X 線反射鏡基板の鏡面精度向上の研究」

● WINERED 研究会 2025 年 2 月 5～6 日（京都産業大学）

谷口 大輔：「観測的な課題整理」

● 太陽圏連シンポジウム 2026 年 2 月 16～18 日（京都大）

菅野 大二郎、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「XRISM 搭載 Xtend を用いた 2024 年 8 月の X クラスフレアに伴う CME の太陽風電荷交換 X 線プラズマ診断」

● 日本天文学会 2026 年春季年会 2026 年 3 月 4～7 日（京都産業大）

石崎 欣尚、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の現状」

宮本 明日香、石田 学ほか：「XRISM Resolve による WR 140 の星風衝突衝撃波の輝線放射領域の特定 2」

世良 直也、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「XMM-Newton 衛星で観測した C/2000 WM1 (LINEAR) の空間組成解析」

谷口 大輔ほか：「Gaia DR3 GSP-Spec を用いた大規模な太陽双子星カタログの構築」

● 高エネルギー宇宙物理連絡会研究会 2026 年 3 月 9～11 日（大阪大）

宮本 明日香：「X-ray study of emission lines from wind collision shocks in the massive star binary WR 140 with high resolution spectroscopy」

竹内 優人、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X 搭載望遠鏡の振動耐性評価」

● 学内先端研究発表会 2026 年 3 月 10 日（オンライン）

江副 祐一郎：「X 線で見える宇宙と太陽系の姿」(招待講演)

● 第 73 回 応用物理学会春季学術講演会 2026 年 3 月 15～18 日（東京科学大）

沼澤 正樹、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「シリコン高温塑性変形技術を用いた宇宙 X 線望遠鏡の開発」

● 精密工学会春季大会学術講演会 2026 年 3 月 17～19 日（埼玉大）

江副 祐一郎：「微細加工技術を用いた世界最軽量 X 線望遠鏡を宇宙へ」(キーノートスピーチ)

● 日本物理学会 2026 年春季大会 2026 年 3 月 23～26 日（オンライン）

石崎 欣尚、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の現状」

菅野 大二郎、江副 祐一郎、石川 久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Xtend を用いた 2024 年 8 月太陽フレアに伴う太陽風電荷交換 X 線イベントの解析」

国際会議

● International Conference on X-ray Optics and Applications 2025 2025 年 04 月 22～24 日 (Yokohama, Japan)

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

M. Numazawa, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: Development of silicon foil X-ray mirrors using hot plastic deformation process

● International Symposium on Space Technology and Science 2025 年 7 月 12-18 日 (Tokushima, Japan)

R. Fuse, Y. Ezoe, et al.: GEO-X Mission: Demonstration for Deep Space Access via Rideshare Launch by Micro-Satellite

● XRISM International Conference 2025 2025 年 10 月 20~24 日 (Kyoto, Japan)

A. Miyamoto, M. Ishida, et al: Identifying emission regions of wind collision shocks in WR 140 with XRISM Resolve

D. Ishi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: A systematic search for geocoronal solar wind charge exchange events with XRISM/Xtend

D. Ishi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: Modeling Soft X-ray Emission from Solar Wind Charge Exchange in Geospace Observed by Suzaku

Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: The GEOspace X-ray imager (GEO-X) mission

M. Numazawa, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: Jupiter' s X-ray emission: Suzaku observations and prospects for XRISM

D. Morimoto, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: Investigation of the Chemical Composition of the Coma of Comet 8P/Tuttle with Suzaku

D. Kanno, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: XRISM Xtend observation of a solar wind charge exchange event during the August 2024 geomagnetic storm

N. Sera, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: XMM-Newton spectroscopy of a bright comet LINEAR and future prospects with XRISM Resolve

● CX Science and future missions Workshop 2025 年 10 月 27 日 (Kanagawa, Japan)

Y. Ezoe: Opening Remark

Y. Ezoe, M. Numazawa: GEO-X mission (GEOspace X-ray imager)

D. Ishi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: A systematic search for geocoronal solar wind charge exchange events with XRISM/Xtend

K. Ishikawa, D. Ishi: Suzaku study of SWCX events

D. Kanno, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: XRISM Xtend observation of a Solar Wind Charge Exchange event during the August 2024 geomagnetic storm

● IEEE Aerospace Conference 2026 年 3 月 7-14 日 (Montana, USA)

R. Minematsu, Y. Ezoe, et al.: Development of a Structural Thermal Model for a Water-Based Propulsion System on the GEO-X Mission

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、弱い外力に対して大きな応答を示す現象や物質のことをいう。ソフトマターは、階層的な構造を有しており、分子が結合した構造を作り、さらにその構造がより大きな構造（高次構造）を作る。この階層性のため、熱エネルギー程度のエネルギーで様々な転移を起こし、時間スケールが長いために非平衡になりやすい。我々の研究室では、ソフトマターの相転移ダイナミクスや非平衡系に興味を持って、泡沫や粉体の研究を行っている。細胞内液体液体相分離やタンパク質の線維化などの生体系の物理学的機構の解明を目指して、東京大学薬学部、都医学研、都立大数理・化学・生命科学・応用化学科と共同研究を行っている。

1) 泡沫の状態間転移

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

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

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

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

2) シリコンオイルコーティングされた粉体系

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

3) 高エントロピー合金の数値シミュレーション

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

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

4) アルツハイマー病のメカニズム解明

アルツハイマー型認知症などの神経変性疾患は、加齢により発症しやすくなる。そのため、世界的に寿命が延びるにつれて、また、特定の遺伝子を持っていなくても発症するため、患者の数も急増しており、世界中で盛んに研究が行われている。アルツハイマー型認知症は、アミロイド β やタウタンパク質という物質が順番に固まり（線維化）、その線維が神経細胞の中を広がりながら細胞を壊していくことで発症する。また、パーキンソン病では、 α -シヌクレインという別のタンパク質が同じように固まり、神経細胞を壊してしまう。このように、神経変性疾患には

- 特定のタンパク質が変性して固まる（線維化）
- その線維が神経細胞を通じて、脳内に広がる（伝播）
- 線維が神経細胞を壊す

という3つの共通した特徴がみられる。一般的に、異なる物質でも同じような現象が起こる場合、その背後には「物理的な共通の仕組み」があることが多い。この仕組みを解明することで、病気の進行をコントロールする新たな方法が見つかる可能性がある。そこで、本研究では、神経変性疾患に共通する隠れた物理的な仕組みを明らかにし、治療法や予防法の開発に貢献することを目指す。これまでに都医学研の野中教授、長谷川教授、東京大学薬学部の富田教授、堀准教授らと協力し、タウタンパク質の線維化メカニズムを研究してきた。高分子と天然変性タンパク質の共通点に注目し、高分子物理の視点をタウタンパク質の線維化にも応用できるのではないかと考え、内部構造を調べるX線小角散乱（SAXS）やタンパク質の線維化を測定するチオフラビン蛍光強度観察（ThT）を用いて、線維化挙動を調べている。

5) コロイドガラスのエイジング機構の解明

コロイドガラスとは液体に固体微粒子が分散した系の中でも微粒子の込み合いによって運動が阻害されている物質形態の総称である。セラミックスやセメントの前駆体、医薬品、細胞内等、様々な工業応用や自然での発現が見られる。非平衡であるため、時間がたつにつれ内部構造が劣化することが知られている。材料劣化に繋がるため、メカニズムの解明は急務である。ソフトマター研究室の柳島グループでは本課題に対して二つのアプローチで取り組んでいる。

- 数値実験で「理想的」なガラス構造を創造、物理的メカニズムや構造特性の特定を試みる。
- 電場等を使ったコロイドガラスの積層実験を通じて、構造的変質が起こりやすい構造的特性を単粒子レベルで探求。

実験では共焦点顕微鏡観察により一つずつの粒子の運動を追跡する技術を採用しているため、数値実験との直接比較が可能となる。実験とシミュレーション双方を平行して行うことで、より実用的なコロイドガラスやガラス膜のデザイン指針が期待される。本研究は Merin Jose 特任助教との共同研究である。

6) コロイド結晶の形成過程制御とメカニズム解明

コロイド分散液は粒子密度を適度に上げると結晶化することが知られる。しかし、乱雑な過冷却液体状態が秩序だった結晶相に転移するダイナミクスは未だ完全に理解されていない。特に表面や外場の影響を受けずに自由に結晶が生まれるコロイド結晶（均一核形成）の多結晶性（結晶が異なる方向を向いているモザイク状の「粒界」形成）の発現を扱った研究は皆無である。本研究では近年開発された新しい解析法を使って粒界が形成されるプロセスを初めて確認して、結晶が成長するとともに粒界が生まれるスピードの計測、更には新しい秩序変数に基づく並進秩序と隣接粒子の配向秩序の結合を解析して、結晶成長中起こる新たな秩序化のかたちを定義することができた。今後は斥力だけの「剛体球系」だけではなく、引力が働く系や結晶形態が異なる長距離斥力が働くコロイド系での結晶化課程を精査することにより、可視化されてきた結晶化メカニズムの不偏性を考察していく。本研究はRadboud大学のRoel Dullens教授と共同で行われている。

7) DNA の”ねじれ”のトポロジーを取り入れた動力学の理論

DNA の”ねじれ”変形や曲げ変形は細胞内において重要な役割を果たすが、その変形や構造は幾何学の文脈での理解が試みられてきた。DNA のような鎖の”ねじれ”は鎖の中心軸周りのねじれ (twist) と鎖の中心軸自体のねじれ (writhe) とで記述され、twist と writhe の巻き数の和はリンキングナンバーと呼ばれ、鎖を切断しない限り保存されるトポロジカル不変量である。我々は、このような DNA の”ねじれ”構造の幾何学とその力学に着目し、粗視化分子動力学と解析理論とを用いて、DNA の”ねじれ”変形において支配的となる運動モードを調べている。

8) 細胞内相分離の分子配向の効果を取り入れた理論

細胞内における多くのタンパク質は結晶だが、いくつかのタンパク質は秩序領域を持たないことが知られている。このような無秩序領域が凝集することで、液滴を形成する現象（細胞内相分離）は真核細胞の中でも普遍的に見られる現象であり、一次転移として考えられてきた。今まで、細胞内相分離はタンパク質間の等方的な引力によって引き起こされると信じられてきたが、実験研究から、 π - π stacking など方向を揃える相互作用も細胞内相分離を導く相互作用となることが知られている。

そこで、我々は、分子配向の効果を取り入れた三成分系（タンパク質の等方成分、異方成分、溶媒）の相分離の場の理論モデルを構築し、相図を描き、そのダイナミクスを調べた。その結果、三成分であることから、二つの相分離領域が現れ、これらが臨界点を通して融合するパラメータ領域が見られた。また、分子配向を取り入れたことにより、弱い一次転移由来の大きな密度ゆらぎにより、典型的な一次転移に比べて、速い液滴形成が起こりうることを明らかにした。

2. 研究業績

1) 論文

R. Ishikawa, K. Takae, R. Kurita, ”Cooperative ion conduction enabled by site percolation in random substitutional crystals”, *Phys. Rev. Mater.*, **9**, (2025) 115401.

K. U. Kobayashi, K. Jinbo, M. Muto, R. Kurita, ”Humidity-Responsive Jetting for Flowability Assessment of Fine Powders”, *Mater. Des.*, **260**, (2025) 114951.

T. Takahashi, T. Nonaka, R. Ohtani, M. Hasegawa, Y. Hori, T. Tomita, R. Kurita, ”Hindering Tau Fibrillization by Disrupting Transient Precursor Clusters”, *Neurosci. Res.*, **220**, (2025) 104968.

Y. Furuta, R. Kurita, "Colloidal aggregation dynamics in curing systems unified by the number of cluster bonds", *J. Mol. Liq.*, **437B**, (2025) 128342.

A. Kaneda, R. Kurita, "Absorptive limits of foams governed by kinematic coupling between solution and bubbles", *J. Colloid Interface Sci.*, **695**, (2025) 137746.

M. Endo, R. Kurita, "Critical-like behavior in foam dynamics: Transition from slip to scraping", *Phys. Rev. Res.*, **7**, (2025) 023013.

Y. Albert Darmawan, T. Yanagishima, T. Fuji, T. Kudo, "Proposed Method for Label-Free Separation and Infrared Spectroscopy of Carbonyl-Containing Micro- and Nanoparticles Using Mid-Infrared Optical Force" *Anal. Chem.*, **97**, (2025) 27, 14658–14665.

H. Yokota, "Coalescence of two critical points and accelerated phase dynamics in orientational ternary mixtures" *Phys. Rev. E*, **113**, (2026) 035405.

2) 著書

栗田「塗り広げと気泡の発生」, コンバーテック vol.625, No.53 p78-81, 2025 年

3) 学会講演

● 第 4 4 回認知症学会 2025 年 11 月 21 日 - 23 日 (新潟朱鷺メッセ)

向井 優里彩, 高橋 知未, 野中 隆, 長谷川 成人, 栗田 玲「 α シヌクレイン凝集における振盪の役割の解明」第 44 回認知症学会, 2025 年 11 月 21 日

高橋 知未, 野中 隆, 大谷 麗子, 堀 由起子, 富田 泰輔, 栗田 玲「タウタンパク質の凝集過程における前駆体の存在と役割」第 44 回認知症学会, 2025 年 11 月 22 日

● 第 12 回ソフトマター研究会 2025 年 11 月 4 日 - 6 日 (京都大学)

樋口 孝太郎, 栗田 玲「相互作用のある粉体ブロックのレオロジー測定」第 13 回ソフトマター研究会, 2025 年 11 月 5 日

玉木 健登, 栗田 玲「泡沫の動的構造変化に基づく液体浸透メカニズム」第 13 回ソフトマター研究会, 2025 年 11 月 5 日

横田 宏, 「分子配向に誘起される細胞内相分離のダイナミクス」第 13 回ソフトマター研究会, 2025 年 11 月 5 日

● 第 89 回固体イオニクス研究会 2025 年 6 月 5 日

石川 陸矢, 高江 恭平, 栗田 玲「カチオン固溶体型イオン結晶におけるサイトパーコレーションによるイオン伝導」第 89 回固体イオニクス研究会, 2025 年 6 月 5 日

● 京大化研セミナー：ソフトマター研究の新潮流 2025 年 6 月 3 日

栗田 玲「アルツハイマー型認知症に対する物理学的アプローチ」[招待講演] 京大化研セミナー：ソフトマター研究の新潮流, 2025 年 6 月 3 日

● 大阪大学産業科学研究所ナノテクノロジーセンター 2025 年度若手セミナー・2026 年 1 月 23 日・

柳島 大輝「物性均一化で挑む超安定ガラス作成法の開拓」[招待講演] 大阪大学産業科学研究所ナノテクノロジーセンター 2025 年度若手セミナー・2026 年 1 月 23 日・

● 日本物理学会 2026 年春期大会・2026 年 3 月 23 日-26 日 (オンライン開催)

横田宏「細胞内相分離のダイナミクスにおける配向と密度ゆらぎの役割」日本物理学会 2026 年春期大会・2026 年 3 月 23 日-26 日

● 日本物理学会第 80 回年次大会・2025 年 9 月 16 日-19 日 (広島大学)

横田宏「分子配向を取り入れた細胞内相分離ダイナミクスのシミュレーション」日本物理学会第 80 回年次大会・2025 年 9 月 16 日-19 日

● 第 74 回高分子学会年次大会・2025 年 5 月 19 日-23 日

小西隆士, 横田宏, 宮本嘉久「延伸したポリトリメチレンテレフタレートの ガラス転移温度付近での結晶化過程 III」日本物理学会第 80 回年次大会・2025 年 9 月 16 日-19 日

国際会議

R. Ishikawa, K. Takae, and R. Kurita “Ionic conduction in multicomponent ionic crystals” [poster] The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025, 2025 年 12 月 16 日

T. Takahashi, T. Nonaka, R. Ohtani, M. Hasegawa, Y. Hori, T. Tomita, R. Kurita “Precursor for tau fibrillization” [poster] The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025, 2025 年 12 月 17 日

Y. Mukai, T. Takahashi, T. Nonaka, R. Kurita “Role of Shaking in α -Synuclein Fibrillization” [poster] The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025, 2025 年 12 月 17 日

R. Ishikawa, K. Takae, and R. Kurita “Ionic Conduction by Site Percolation in NaCl-type Random Substitutional Ionic Crystal” [poster] 2025 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2025 年 9 月 17 日

R. Kurita and M. Endo “Scraping behaviors of a foam on a substrate” [oral] The 9th Asia-Pacific Rim Conference on Rheology, 2025 年 7 月 23 日

H. Yokota, “Coalescence of two critical points and accelerated phase dynamics in orientational ternary mixtures” [oral] International Workshop on Computational Soft-Matter 2026, 2026 年 3 月 5 日.

Hirokazu Komatsu, Hiroshi Yokota, Dai Oikawa and Hiroyuki Nakajima, “The Deficiency Zero Theorem for Chemical Reaction Networks with Generalized Mass Action Kinetics and Time Delays of Cumulative Distribution Type” [oral] SICE FESTIVAL 2025 with Annual conference, 2025 年 9 月 9 日.

Hiroshi Yokota, “Phase separation induced by molecular orientation in a ternary system: Toward understanding the kinetics of phase separation in cells” [oral] The 44th International Conference on Simulation Technology, 2025 年 9 月 1 日

Hiroshi Yokota, “Topology-dependent dynamics of DNA involving “torsion” through molecular dynamics simulation” [oral] The Theory of Periodic Tangles and Their Interdisciplinary Applications,
2025 年 7 月 28 日

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、ポスドク1名、客員研究員1名、大学院生9名（博士後期1名と博士前期8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) ダイヤモンドネットワーク磁性体 $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ における磁気構造と異常 Hall 効果

立方晶 $\text{LnTr}_2\text{X}_{20}$ (Ln : 希土類, Tr : 遷移金属, X : Zn, Al, Cd) 化合物は、希土類イオンが16個の X 原子からなるカゴ構造に内包されることにより、多彩な強相関電子物性を示すことが知られている。その中でも $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ は、 Eu^{2+} イオンがダイヤモンドネットワークを形成する空間反転対称性を持つ立方晶磁性体であり、低温で反強磁性転移を示す。ダイヤモンドネットワークでは、最近接相互作用だけでなく、伝導電子を介した長距離の RKKY 相互作用の競合によってフラストレーションが生じるため、新奇磁気相やトポロジカルなスピン構造の舞台として興味が持たれている。我々は、本物質が 1.9 K において $H \parallel [100]$ で $H_{m1} = 1.7$ T および $H_{m2} = 2.8$ T にメタ磁性転移を示し、その中間に Phase II と呼ばれる磁場誘起相を持つことに注目して研究を進めた。

本年度は、まず単結晶試料を用いた電気輸送測定により、Phase II において電気抵抗率および Hall 抵抗率がともに顕著に増大し、しかも相内ではほぼ磁場に依存しないという特徴的な振る舞いを見出した (図 1)。さらに、この異常な Hall 応答は $H \parallel [100]$ のみならず、 $[0\bar{1}1]$ や $[1\bar{1}1]$ 方向でも観測され、中間相そのものは比較的広い角度範囲で安定に現れることが明らかとなった。この振る舞いは、 $4f$ 電子スキルミオン物質でしばしば見られる強い方向選択性とは異なっており、 $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ の Phase II が通常のスキルミオン格子とは異なるトポロジカルな磁気状態である可能性を示している。一方、粉末中性子回折および単結晶共鳴 X 線回折によるゼロ磁場磁気構造解析からは、磁気伝搬ベクトルが $q_m = (1, 0, 0)$ で与えられ、Eu モーメントがこの波数ベクトルに平行に配列した collinear な反強磁性構造が実現していることを明らかにした。この磁気構造は単純な J_1 - J_2 模型では記述しにくく、ダイヤモンドネットワーク上でより遠距離の RKKY 相互作用が重要な役割を果たしていることを示唆する。以上の結果は、 $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ が、フラストレートした相互作用を背景として、ゼロ磁場では collinear 反強磁性秩序をとり、磁場下では特異な Hall 応答を伴う新奇磁気相へ発展する有望な物質であることを示している。今後は、Phase II およびその高磁場側の磁気構造を直接決定することにより、異常 Hall 効果の起源とスピンテクスチャーの実体を明らかにしたい。

2) Eu 化合物における物質開発・新奇磁性相の探索およびフェルミ面研究

近年、繊維金属磁性体の MnSi や希土類化合物 EuPtSi 、 Gd_2PdSi_3 等の低温磁気相において、トポロジカル相である磁気スキルミオン状態が発見され、基礎物理及び、次世代の磁気メモリー材料としての応用的観点からも精力的に研究がなされている。一昨年度から引き続き我々の研究グループでは、磁性元素である Eu 及び Gd 元素を含む化合物系に注目して、スキルミオン相のみならず、新しい磁気相の探索を目的として多数の化合物育成と物性研究をすすめた。六方晶系 $\text{Eu}_2\text{Ga}_3\text{Ir}$ 、正方晶系 EuTr_2X_2 (Tr : 遷移金属元素, X : Si, Ge)、 $\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ 、 EuIr_2In_8 、 EuGa_6 、 GdGa_6 、 EuGa_4 等について単結晶育成を行い、磁気特性測定から、低温の磁気相図の作成を行ってきた。今年度は、正方晶 EuSnP の磁気特性研究および、その非磁性参照物質である SrSnP の電子状態の研究を行った。興味のポイントとしては、磁性イオンである Eu サイトに反転対称点を持たず、他の Eu との間に反転中心を持つ。これにより、Eu が反強磁性などの磁気転移を示した場合、結晶全体として反転対称性を失うことになり、磁気秩序状態における特徴的な交差応答現象が期待できる。本研究では、高純度結晶育成により、まずこの物質の磁場-温

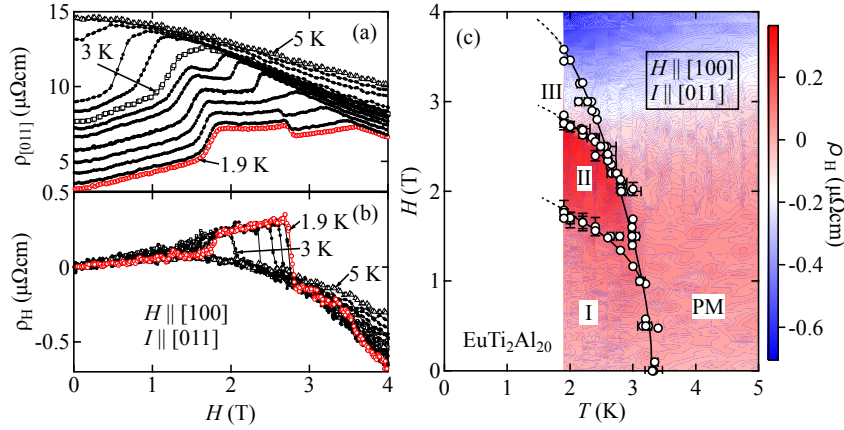


図 1: $H \parallel [100]$ における $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ の電気輸送特性と磁場-温度相図. (a) 電気抵抗率 ρ_{011} , (b) Hall 抵抗率 ρ_H の磁場依存性, および (c) ρ_H のカラーマップと相図を示す. 磁場誘起相 Phase II では ρ_{011} と ρ_H がともに増大し, 相内ではほぼ一定値を保つことから, 異常 Hall 応答を伴う特異な電子状態が実現していることが分かる. 他に図の候補があれば変更してください.

度相図を明らかにした。また、非磁性参照物質である SrSnP については、はじめて de Haas-van Alphen 効果測定に成功した。図 2 (a)(b) は、それぞれ実験および第一原理計算から得られたフェルミ面の極値断面積の角度依存性である。第一原理計算との比較から、図 2 (c) に示すような準二次元電子状態に特徴的な円柱状フェルミ面を有していることを明らかにした (図 2)。このことは、異方的な伝導を示す特徴と整合する結果である。興味深い点として、準二次元的電子状態を示す円柱状フェルミ面の形状を反映した山地効果を観測したことである。これは、円柱フェルミ面の軸方向に対して磁場印加方向を傾けることで、フェルミ面の極地断面積が交差現象を起こすことに起因している。図 2 (a) における α および α' において矢印で示した点が、ちょうどその交差点に相当する。このような山地効果の観測は、酸化物などの二次元性のつよい構造では知られているが、金属間化合物で観測された例としては稀である。

3) SmTr_2Ge_2 (Tr : 遷移金属) における Sm イオン結晶場準位の系統的変化

正方晶 ThCr_2Si_2 型結晶構造は、多彩な強相関電子状態が発現する典型的な物質群の一つである (例えば、 CeCu_2Si_2 における非従来型重い電子超伝導や、 URu_2Si_2 における「隠れた秩序」と呼ばれる未解明の $5f$ 電子秩序状態など)。本結晶構造における物性探索により、Sm イオンの $4f$ 電子状態が、遷移金属元素 Tr の d 電子数とともに系統的に変化することを見出した。特に、 SmNi_2Ge_2 と SmCu_2Ge_2 の間において、Sm イオンの $4f$ 電子結晶場基底状態が入れ替わっており、これに伴い、両者の間で磁気異方性が逆転していることを発見した。これは、常磁性状態における有効磁気モーメントの異方性に現れており、Ni では結晶の ab 面を磁化容易面とする一方、Cu では c 軸を磁化容易軸とする Ising 性を示す。また、さらに興味深いことに、Ising 性を示す $Tr = \text{Cu, Ag}$ において、 c 軸長の希土類元素依存性が、ランタノイド収縮に一見反する振る舞いを示すことを見出した。3d、4d 電子バンドの占有が、Sm イオンの周りの電荷分布を大きく変化させ、その結果として形成された特異な結晶場ポテンシャルが、Ising 的異方性を持つ結晶場基底状態を安定化しているものと推測される。

結晶場基底状態の準位交差に伴う物性変化の詳細を明らかにするために、 $\text{Sm}(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_2\text{Ge}_2$ において x を変化させた単結晶を用いた基礎物性測定を進めた。磁気エントロピーや磁化率の x 依存性から、準位交差が $x(\text{仕込み}) \simeq 0.7$ 近傍で発現していることがわかってきた。準位交差近傍では、 $4f$ 電子結晶場基底状態が擬 4 重項となり、電気四極子や磁気八極子の自由度を持つことが期待される。様々な物理量を総合的に見ながら、この可能性を探る研究を進めた。

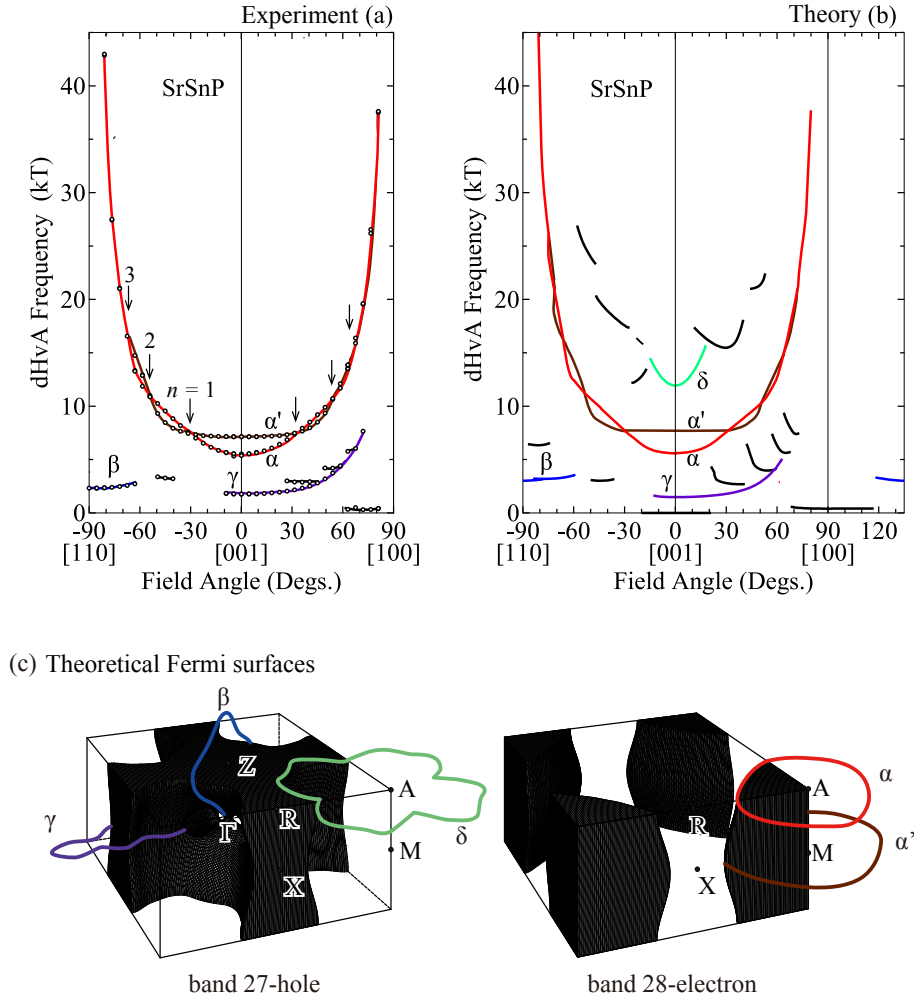


図 2: SrSnP におけるフェルミ面の極値断面積の角度依存性 ((a) 実験と (b) 第一原理計算からの結果)。 (c) 第一原理計算から得られたフェルミ面の形状。

2. 研究業績

1) 論文

R. Higashinaka, K. Sato, R. Ideura, M. Kawamata, and T. D. Matsuda: Emergent Anomalous Hall Effect in the Eu-Based Compound with a Diamond Network: The Centrosymmetric Cubic Antiferromagnet $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **95** (2026) 034707[7 pages]. DOI: 10.7566/jpsj.95.034707

M. Miyake, S. J. Sekiya, Y. Onuki, D. Aoki, Y. Homma, D. Li, T. Kida, Y. Narumi, M. Hagiwara, K. Kindo, F. Honda, H. Harima, R. Higashinaka, Y. Aoki, and T. D. Matsuda : Magnetic and Fermi Surface Properties of EuSnP with the First-Order Antiferromagnetic Transition and SrSnP with a Nearly Cylindrical Fermi Surface, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94** (2025) 064707[12 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.94.064707

I. Kawadaki, S. Fujimori, H. Yamagami, T. D. Matsuda, and Y. Onuki : Influence of Magnetic Ordering on Quasiparticle Spectral Functions: Comparison of Electronic State of CeCu_6 and CeRu_2Ge_2 , *J. Phys. Soc. Jpn.* **94** (2025) 084702[9 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.94.084702

K. Fujinuma, D. Takegami, H. Honda, D. Shiga, H. Kumigashira, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, M. Hedo, Y. Onuki, N. L. Saini, and T. Mizokawa : Dirac-like band dispersion at the pyrite-type CuSe_2 (100) surface revealed by soft-x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **112** (2025) 205416[9 pages]. DOI: 10.1103/8dkc-mr3v

Y. Dong, Y. Kishita, M. Ochi, R. Nakachi, R. Higashinaka, S. Hayami, Y. Wan, Y. Arai, S. Huh, M. Hashimoto, D. Lu, M. Tokunaga, Y. Aoki, T. D. Matsuda, and T. Kondo : Pseudogap and Fermi arc induced by Fermi surface nesting in a centrosymmetric skyrmion magnet, *Science* **388** (2025) 624[7 pages]. DOI: 10.1126/science.adj7710

M. Kawamata, R. Higashinaka, T. Matsumura, M. Andreev, K. Iwasa, H. Nakao, K. Hattori, and T. D. Matsuda : Collinear Magnetic Structure in the Diamond Network Magnet $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **95** (2025) 024701[7 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.95.024701

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 80 回年次大会 2025 年 9 月 16 日～19 日 広島大学 東広島キャンパス

東中隆二, 佐藤孝亮, 出浦涼青, 川又雅広, 大貫惇睦, 青木勇二, 松田達磨: Eu のダイヤモンドネットワークを有する空間反転対称性を持つ立方晶反強磁性体 $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ における異常ホール効果

三宅雅亮, 大貫惇睦, 本多史憲, 本間佳哉, 李徳新, 青木大, 木田孝則, 鳴海康雄, 萩原政幸, 金道浩一, 竹内徹也, 播磨尚朝, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: ドレッシェルハウス型スピントクスチャーをもつ $\text{EuIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ と $\text{SrIr}_4\text{In}_2\text{Ge}_4$ の物性研究

渡邊一誠, 鈴木寛人, 中村直貴, 大貫惇睦, 芳賀芳範, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: カイラル構造を持つ RIr_2P_2 ($\text{R} = \text{Sr}, \text{Eu}$) の単結晶育成の最適化と磁性及び輸送特性

大貫惇睦, 三宅雅亮, 本多史憲, 上床美也, 本間佳哉, 仲村愛, 青木大, 木田孝則, 鳴海康雄, 萩原政幸, 金道浩一, 竹内徹也, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 遷移金属を含まない EuAs_3 , EuSnP , EuAl_2 などの反強磁性体の圧力効果

市村大樹, 三宅雅亮, 大貫惇睦, 木田孝則, 鳴海康雄, 竹内徹也, 金道浩一, 李徳新, 青木大, 中島美帆, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 1 次の反強磁性転移をする SmPb_3 , EuSn_3 , GdPb_3 の特異な磁気温度相図

出浦涼青, 東中隆二, 川又雅広, 大貫惇睦, 青木勇二, 松田達磨: $\text{CeCr}_2\text{Al}_{20}$ 型構造を持つ化合物における異常ホール効果と新物質探索

川又雅広, 東中隆二, 三宅雅亮, 出浦涼青, 佐藤孝亮, 松村武, 二川雄太, 中尾裕則, 大貫惇睦, 青木勇二, 松田達磨: ダイヤモンド構造を有する $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ の共鳴 X 線散乱による低磁場相の磁気構造解析

肥後こころ, 東中隆二, 大貫惇睦, 松田達磨, 青木勇二: ThCr_2Si_2 構造を持つ SmTr_2Ge_2 ($\text{Tr} = \text{Fe} \sim \text{Cu}, \text{Rh} \sim \text{Ag}$) における結晶場効果と磁気異方性

後藤弘行, 肥後こころ, 川又雅広, 東中隆二, 大貫惇睦, 松田達磨, 青木勇二: $\text{Sm}(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_2\text{Ge}_2$ における結晶場基底状態の準位交差

關谷ジェイシャオン, 三宅雅亮, 大貫惇睦, 青木大, 本間佳哉, 播磨尚朝, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 層状化合物 SrSnP のフェルミ面特性研究

池永怜央, 市村大樹, 大貫惇睦, 青木大, 仲村愛, 播磨尚朝, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: LaCu_2Ge_2 をはじめとする正方晶 ThCr_2Si_2 型化合物の純良単結晶育成とフェルミ面の性質

川口翔馬, 石原滉大, 中村直貴, 大村瑠美, 千葉優馬, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨, 橋本顕一郎, 芝内孝禎: キラルな構造を有する超伝導体 IrGe_4 における非相反応答の観測

山内雅也, 川又雅広, 渡邊一誠, 増川修一, 大貫惇睦, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: カイラル構造をもつ IrGe_4 型化合物の高圧下結晶育成

松田達磨, 三宅雅亮, 田中なつみ, 仲村愛, 青木大, 大貫惇睦, 播磨尚朝, 東中隆二, 青木勇二: カイラル構造をとる B20 型化合物 PdGa のフェルミ面と軌道交差現象

菅野菜々子, Soonsang Huh, 川又雅広, 越智正之, 保井晃, 神田龍彦, 北村未歩, 堀場弘司, 岩澤英明, Yuyang Dong, 中島義啓, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨, 近藤猛: 角度分解光電子分光で調べるスキルミオン候補物質 $\text{Gd}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Ge}_2$ の電子構造

小原颯, 河井史, 木俣基, 松田達磨, 中村直貴, 野島勉, 山根悠, 下澤雅明, 井澤公一: カイラルな構造をもつ IrGe_4 の超伝導状態におけるスピン偏極検出の試み

国内研究会

● 学術変革領域研究 (A) 「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」トピカルミーティング「アシンメトリ量子物質の新展開: 多極子のスケールシームレス化に向けて」, 2025 年 6 月 11 日~13 日, 山梨県立図書館 多目的ホール

松田達磨: カイラル構造を持つ物質の電子状態の研究及び最近の物質探索について (招待講演)

● 東北大学金属材料研究所 大洗・アルファ合同研究会, 2025 年 9 月 3-5 日 水戸市 MYM ビル 10 階 会議室 3・4

松田達磨: カイラル構造を持つ金属間化合物のフェルミ面研究 (招待講演)

● 第 19 回 物性科学領域領域横断研究会, 2025 年 11 月 27-28 日, 東京大学物性研究所 6 階 第会議室 (柏キャンパス)

川又雅広: 共鳴 X 線散乱によるダイヤモンドネットワーク構造を有する $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ の磁気構造解析

三宅雅亮: 反転対称性の破れた物質を中心としたフェルミ面と物性研究

● 学術変革領域研究 (A) 「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」令和 7 年度 領域全体会議・成果報告会, 2026 年 1 月 6 日~8 日, 名古屋工業大学

松田達磨: カイラル構造等の特徴的結晶構造を持つ金属間化合物のフェルミ面と磁性研究

三宅雅亮, 田中なつみ, 中村直貴, 關谷ジェイシャオン, 大貫惇睦, 青木大, 仲村愛, 本間佳哉, 李徳新, 本多史憲, 上床美也, D. K. Bhoi, S. Xiaoling, 木田孝則, 鳴海康夫, 萩原政幸, 金道浩一, 竹内徹也, 岩佐和晃, 播磨尚朝, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 反転対称性の破れた物質を中心としたフェルミ面と物性研究

川又雅広, 東中隆二, 松村武, M. Avdeev, 中尾裕則, 岩佐和晃, 服部一匡, 松田達磨: ダイヤモンドネットワーク構造を有する $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ の磁気構造の研究

東中隆二, 佐藤孝亮, 出浦涼青, 川又雅広, 松田達磨: Eu のダイヤモンドネットワークを有する空間反転対称性を持つ立方晶反強磁性体 $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$ における異常ホール効果

国際会議

● 30th International Conference on Low Temperature Physics (LT30), 2025 年 8 月 9 日, Bilbao Exhibition Centre (Bilbao, Spain)

Yuji Aoki, Nazir Ahmad, Md Asif Afzal, Hiroyuki Mitamura, Masashi Tokunaga, Ryuji Higashinaka, and Tatsuma D. Matsuda: Search for Symmetry-Enforced Dirac Points via Magnetoresistance Quantum Oscillations in Non-Symmorphic Type-I Superconductor $\beta\text{-IrSn}_4$

● The 17th TOYOTA RIKEN International Workshop Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025), 2025 年 12 月 2 日～6 日, HORIBA Symposium Hall, International Science Innovation Building, Kyoto University (Kyoto, Japan)

R. Higashinaka, K. Sato, R. Ideura, M. Kawamata, and T. D. Matsuda: Anomalous Hall Effect in the Eu-Based Compound with a Diamond network: The Centrosymmetric Cubic Antiferromagnet $\text{EuTi}_2\text{Al}_{20}$

超伝導物質研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、超伝導体、熱電材料、異常熱膨張材料の研究を進めている。特に超伝導に関しては、新超伝導体の開発、元素置換や水素化、圧力効果を用いた物性研究、超伝導応用に関する研究を推進している。2025年度の主要業績をまとめる。

1) 超伝導体を用いた熱制御技術

巨大磁気熱抵抗効果 これまでの研究で、高純度 Pb 線が超伝導転移によって熱伝導率を大幅に変化させることを報告してきた。今年度の測定で、Pb 線の長さ方向に平行な磁場を印加した条件下では、非常にシャープな熱伝導率変化を示すことを見出した。通常の超伝導体では T_c 直下で急激に熱伝導率が変化するのではなく、今回観測された急激な変化は非常に稀である。現在その起源を探っているが、高純度金属の高熱伝導率と、クーパー対の形成による熱散乱（不純物効果に近いと考えている）の発生が本質ではないかと議論を進めている。また、 H_c 以上の強磁場領域の磁気熱抵抗も詳細に評価した。Pb は補償金属であり、高純度な単結晶試料では特定の結晶軸方向に対して磁場と垂直な電流が磁場の二乗に比例した磁気抵抗を生じさせることが知られている。本研究では、多結晶を用いているにもかかわらず、磁気熱抵抗および磁気抵抗が磁場の二乗に比例する振る舞いを観測した。得られた磁気熱スイッチング比は 9 T の磁場下で H_c 近傍の 450 倍 ($T = 3$ K) を超え、巨大な磁気熱抵抗効果が多結晶においても得られることを示した。(Rani et al., Mater. Today Electron. 2025)

熱ダイオードの開発 上記で述べた高純度 Pb 線の非常にシャープな磁気熱スイッチング（線の方向と平行の磁場下）を利用し、熱ダイオードの作製を試みた。常伝導金属 - 超伝導体接合を用いた熱ダイオードは理論的に提案されたが（イタリア・Giazotto グループ）、ナノスケールのジャンクションを対象としたシミュレーション実験が主流であり、バルクスケールの接合での実験的実証は行われていなかった。その要因の一つとして、超伝導転移温度（または臨界磁場）において大幅な熱伝導率変化が得られ、かつその変化が狭い温度域で生じさせることができる超伝導体が知られていなかったことが挙げられる。それらを満たすのが、高純度 Pb 線（並行磁場条件）だと考えた。2 K 以上では常伝導である高純度 Al 線を用い、Pb-Al 接合を作製し、全体の熱伝導率（有効熱伝導率 κ^* ）の温度依存性を順方向と逆方向の熱勾配下で測定した。順方向と逆方向で明らかな違いがみられ、その温度域での差 $\delta\kappa^*$ から整流比（TRR, Thermal Rectification Ratio）を見積もった結果、最大値で 1.75 の TRR を観測した。本結果はバルク超伝導体を用いた熱ダイオードの世界初の実験的検証である（Rani et al., Adv. Phys. Res. 2025）。さらに、高純度 Pb 線の熱伝導率の温度依存性における印加磁場方向異方性に着目し、接合無しの熱ダイオードの作製にも成功した（Mashiko et al., J. Phys. Mater. 2026）。ここで、Pb 線の一部を折り曲げることで、磁場平行領域と磁場垂直領域を接合無しの Pb 線試料に作り出した。Pb-Al 接合と同様の測定をしたところ、40 % 曲げ試料において TRR が 2 を超える高性能が得られた。今後、COMSOL 等による熱伝シミュレーションを行い、発現機構の詳細を研究するとともに、最適形状や最適材料の探索を行う。

熱発振器の開発 熱ダイオードとして開発した Pb-Al 接合を参考に、超伝導転移を利用した熱発振器の開発を行った。極低温での熱発振器は、例えば宇宙物理の観測に用いる TES（Transition Edge Sensor）などの精密熱量センサーの温度校正や、低温熱物性の交流化に有用である一方、高周波かつ平均温度の安定した精密熱発振は難しい。具体的には、交流電流とヒーターによる熱発振では平均温度が上昇して

しまい、その原因は加熱時と冷却時のメカニズムの違いが挙げられる。今回、磁気抵抗のより小さい高純度 Cu 線を常伝導体として利用し、Pb-Cu 接合を作製した。Pb は熱浴に接続し、交流磁場によって熱抵抗が振動する。直流ヒーターを Cu 領域に接続し、Cu 領域の温度をモニターした。Cu は磁気熱抵抗がなく、かつ高熱伝導率を有するため、Cu 領域内は空間的な温度均一性を維持した。各温度での臨界磁場（熱伝導率 - 磁場プロットにおける熱伝導変化の中間磁場）を交流磁場の中心に設定し、交流磁場を印加したところ、数十エルステッドのわずかな振幅で 200 mK を超える熱発振を実現した。また、温度の上昇と下降のメカニズムはどちらも同じため、平均温度は全く変化せず、印加する交流磁場形状に対応した熱振動が観測された (Rani et al., Mater. Today Adv. 2026)。現時点では疑似的な交流磁場を印加しており、2 Hz 以下の追従周波数のみ確認できているが、今後はより高周波な熱発振が可能かを見極め、宇宙応用や低温物性測定に生かせる素子として提案したい。

2) 新超伝導体開発と新機能の探索

TrZr₂ 系の異常熱膨張 我々の研究室では、2022 年に発見した CoZr₂ の一軸負熱膨張の研究を進展させ、2025 年度もいくつかの新しい発見があった。主な発見として、CoZr₂ を水素化した場合に遍歴強磁性相が発現し、そこで磁性起源の一軸負熱膨張が生じることを見出した (Watanabe et al., JACS 2026)。CoZr₂H_x の強磁性は以前から知られていたが、その温度域での負熱膨張は報告がなかった。現在、水素量を詳細に変化させた試料を作製し、磁性および熱膨張特性の変化の期限を探っている。また、元素置換効果でも興味深い成果が得られた。Co_{1-x}Ni_xZr₂ において、熱伝導率の温度依存性を詳細に評価した結果、CoZr₂ においては特定の温度域でプラトーが生じることがわかった (Watanabe et al., submitted)。この温度が理論計算や格子比熱測定から示唆された光学フォノンと一致することから、クラスレート物質などで見られた異常フォノンとの相関がみられたと考えている。さらに、新たに合成した Co_{1-x}Fe_xZr₂ において、c 軸熱膨張係数の絶対値が最大になる組成を見出し、そこでバルク超伝導が同時に観測されることがわかった。全置換した FeZr₂ は非超伝導体であるため、本研究で特定した組成は、将来的に熱サイクルに強い超伝導素子作製に重要なヒントを与えるものである。

Tr-Zr 系新超伝導体の開発 卒業研究のテーマとして、遷移金属ジルコナイド系の超伝導探索を行った。1 つ目のテーマは、超伝導体として知られる Pt₃Zr₅ の軽元素導入効果である。Pt₃Zr₅ には結晶学的な隙間サイトが存在し、Pt₃Zr₅H_x と Pt₃Zr₅B_x の新規合成と物性評価を行った。どちらも T_c は低下してしまっていたが、超伝導シグナルは維持しており、現在は T_c 低下の起源を探るため物性評価に加え分光測定を行っている。2 つ目のテーマとして、超伝導を示す CoZr₃ からヒントを得て、超伝導を示さない FeZr₃ への Ni 置換効果を検証した。Co は元素周期表にて Fe と Ni の間に存在する。Fe_{1-x}Ni_xZr₃ を新規合成したところ、中間組成でバルク超伝導が発現することがわかった。今後は超伝導のバルク性や結晶構造と物性の相関を解明し、新超伝導体として報告する予定である。

磁束トラップ状態の相分離系合金の超伝導 これまでの研究で、Sn-Pb ハンダなどの相分離系合金が選択的磁束トラップを示すことを報告し、それに起因した不揮発磁気熱スイッチングや異常発熱現象を報告してきた。2025 年度の研究では、様々な組成の Sn-Pb ハンダの磁束減少時の発熱現象の機構を解明する研究を行った。比熱測定時の異常発熱から、磁束トラップ量と発熱量の相関を見出し、Sn 量がより少ない方が発熱量が多いことがわかった。当初想定していた磁束トラップ量と発熱の直接的な相関は見られず、Sn 領域が小さい、すなわち Pb 領域が大きい場合がもっとも発熱することがわかった。このことから、磁束減少時に発生している発熱は、Pb 領域を中間状態を形成しつつ移動するジュール熱である可能性を提案した (Murakami et al., submitted)。また、Sn10-Pb90 ハンダにおいて、磁束トラップ

状態において超伝導臨界電流にどのような違いが出るかの研究も行った。液体ヘリウムちゅうでの通電測定を行い、磁束トラップ状態とゼロ磁場冷却状態で、明確な臨界電流の違いがみられることを報告した。このことは、あらかじめ磁束トラップをしている状態では、外部磁場の通り道がすでに形成されており、通電に対して不安定な中間状態を形成せずに磁場を受け入れられることが原因であると考えられ、磁束トラップを利用した超伝導特性の向上の可能性がある (Ichikawa et al., submitted)。今後、様々な組成・形状のハンダにおける臨界電流測定を行い、新たな超伝導応用の可能性を模索する。

3) 熱電材料の物性研究

ハイエントロピー型熱電材料 これまでの研究で、岩塩型構造を有するハイエントロピー (HE) 型金属カルコゲナイド系熱電材料について報告してきた。2025 年度の研究では、これまで検討してきた陰イオンサイトへの元素置換に加え、陽イオンサイトへの置換効果を検証した。AgBiSe₂ において陰イオンサイトに同族元素を置換することで熱電特性が向上したのに対し、AgBiSe_{0.8}S_{0.6}Te_{0.6} において陽イオンサイトの Bi に同族元素である Sb を置換すると、電気抵抗率が著しく上昇し出力因子が低下することが明らかになった。第一原理計算では、Sb 置換による電子散乱の増大は示されなかったが、フェルミエネルギー近傍において重いバンドの寄与が減少し軽いバンドの寄与が増大することが示された。このバンド構造の変化によってキャリアの移動度が低下し、電気抵抗率が上昇したと考えられる。一方、本研究を通じて、岩塩型 HE 型熱電材料における格子熱伝導率の低減率を簡便に見積もる手法を見出した。点欠陥散乱モデルの質量差寄与パラメータが格子熱伝導率の低減率と強い負の相関を示すことを明らかにし、置換元素として各サイトの平均質量との質量差が大きいものを選択することで、効果的に格子熱伝導率を低減できることを示した (Seshita et al., Jpn. J. Appl. Phys. 2025)。また、今年度からは HE 型熱電薄膜を対象とした研究も開始した。将来的には角度分解光電子分光 (ARPES) による詳細な電子構造の解明を目指しており、本年度はその基盤として α 軸配向した岩塩型 HE 型熱電薄膜の作製に成功した。現在は熱電特性の評価を進めており、バルクとの比較を含めた物性解明が期待される。

バンド端縮重に関する理論研究 熱電材料開発では、近年バンド端縮重という材料設計指針が注目を集めている。これは複数のバンド端が化学ポテンシャル近くに集まり、電荷輸送に同時に寄与する状態を指し、この指針により PbTe 系で $zT=2.5$ 、SnSe 系で $zT=3.0$ が達成されており、熱電変換効率も 1990 年代のものと比べ 2 倍程度となっている。しかしながら、こうした高性能熱電材料の電子構造は実験的に全く決定されておらず、バンド端縮重がなぜ性能向上に繋がるのか、どのような電子構造が熱電物質として最適かは統一的な見解が得られていない。そこで本年度は、線形応答理論により、マルチバンドの位置関係、有効質量、縮退度、緩和時間が熱電物性に与える影響を調べた。その結果、バンド間散乱があまり多くない場合、同じ極性のバンドのエネルギー差 ΔE が $\Delta E=0$ に近づくほど熱電性能が向上することが明らかになった。この性能向上はバンド端でのスペクトル伝導度の増加に起因する。したがって、バンド端縮重のように単にバンドを近づけるだけでなく、化学ポテンシャル付近のバンドの有効質量を増大させること、キャリアの緩和時間を増大させることも性能向上につながり、新たな材料設計指針となりうることを示した。また数値計算により、バンド端が化学ポテンシャルからおよそ 5kBT 以上離れると、そのバンドの寄与はほぼ無視できることが示された。また、電子と正孔が同時に伝導して性能を下げるバイポーラ効果を抑えるため、バンドギャップが 5kBT 以上の半導体材料が熱電物質として有望であることも明らかとなった (Hattori et al., submitted)。本研究の結果は、経験的に用いられてきたバンド端縮重に対して、定量的な設計指針を与えるものである。今後、角度分解光電子分光 (ARPES) や走査型トンネル顕微鏡 (STM) による電子状態評価と第一原理計算によるバンド計算を相補的に用いて、高効率な材料開発につなげたいと考えている。

2. 研究業績

1) 論文

- A. Seshita, A. Yamashita, T. Katase, Y. Mizuguchi, "Point defect scattering engineering for effective lattice thermal conductivity reduction in high-entropy-type thermoelectric material with rock salt structure", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64** (2025) 100904
- L. Tortora, A. Seshita, *et al.*, "Local Structure Displacements and Electronic Structure of Sb-Substituted Rock-Salt Type $\text{AgBi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Se}_{0.8}\text{S}_{0.6}\text{Te}_{0.6}$ System", *Materials*, **18** (2025) 2578
- L. Tortora, A. Seshita, *et al.*, "Local structure and anomalous chemical potential shift in the $\text{AgBiSe}_{2-2x}\text{Te}_x\text{S}_x$ system", *Phys. Rev. B*, **111** (2025) 094203
- P. Rani, Y. Watanabe, T. Shiga, Y. Sakuraba, H. Takeda, M. Yamashita, K. Uchida, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, "Huge anisotropic magneto-thermal switching in high-purity polycrystalline compensated metals", *Mater. Today Electron.*, **13** (2025) 100165
- I. Kubo, Y. Watanabe, S. Kawashima, T. Miyaji, Y. Mizuguchi, T. Nishizaki, J. Kitagawa, "Enhanced Tc in eutectic high-entropy alloy superconductors Hf-Nb-Sc-Ti-Zr", *J. Alloys Compd.*, **1044** (2025) 184531
- H. Senga, Y. Watanabe, F. Iwase, R. Masuda, D. Kawahara, T. Haruyama, T. Nishizaki, Y. Mizuguchi, J. Kitagawa, "Insight into high-entropy effect in body-centered cubic superconducting alloys", *Supercond. Sci. Technol.*, **39** (2026) 015008
- Y. Watanabe, K. Suzuki, T. Katase, A. Miura, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, "Uniaxial Negative Thermal Expansion in a Weak-Itinerant-Ferromagnetic Phase of $\text{CoZr}_2\text{Hf}_{3.49}$ ", *J. Am. Chem. Soc.*, **148** (2026) 7895-7904
- M. Mashiko, P. Rani, Y. Watanabe, Y. Mizuguchi, "Thermal rectification in jointless Pb solid wire", *J. Phys.-Mater.*, **9** (2026) 01LT01
- P. Rani, M. Mashiko, K. Hirata, K. Uchida, Y. Mizuguchi, "Magneto - Tunable Thermal Diode Based on Bulk Superconductor", *¥it Adv. Rhys. Res.*, **¥bf 4** (2025) e00080
- T. Shiga, Y. Mizuguchi, H. Fujihisa, "Anharmonic lattice dynamics study of phonon transport in layered and molecular-crystal indium iodides", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **59** (2026) 105303
- M. Russo, G. Tomassucci, F. Minati, M. Y. Hacisalihoglu, L. Tortora, A. Puri, H. Arima, Y. Mizuguchi, N. L. Saini, "Temperature-dependent X-ray absorption study of the anisotropic negative thermal expansion of Co and Fe-based TrZr_3 compounds", *Mater. Today Commun.*, **48** (2025) 113494
- M. Roppongi, Y. Cai, K. Ogawa, S. Liu, G. Zhao, M. Oudah, T. Fujii, K. Imamura, S. Fang, K. Ishihara, K. Hashimoto, K. Matsuura, Y. Mizukami, M. Pula, C. Young, I. Markovic, D. A. Bonn, T. Watanabe, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, G. M. Luke, K. M. Kojima, Y. J. Uemura, T. Shibauchi, "Topology meets time-reversal symmetry breaking in $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ superconductors", *Nat. Commun.* **16** (2025) 6573

J. Kitagawa, Y. Mizuguchi, T. Nishizaki, "High critical current densities of body-centered cubic high-entropy alloy superconductors: recent research progress", *Eur. Phys. J. B*, **98** (2025) 73

H. Arima, T. Murakami, P. Rani, Y. Mizuguchi, "Magneto-thermal switching using superconducting metals and alloys", *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **26** (2025) 2506978

2) 著書

島田竜之介, 水口佳一, 偶然から生まれた新超伝導体：学生実験が拓いた研究の最前線, 金属（アグネ技術センター）No.11（通巻 1270 号）, トピックス

3) 特許

特願 2025-164225 熱ダイオード及び熱ダイオードの製造方法 令和 7 年 9 月 30 日, 東京都公立大学法人 東京都立大学, 国立研究開発法人物質・材料研究機構, 水口佳一, プーナミラニ, 増子優幸, 内田健一

4) 学会講演

● 日本セラミックス協会 第 38 回秋季シンポジウム 2025 年 9 月 17~19 日（群馬大, 群馬）

室井孝太, 山下愛智, 山中慎大, 金子卓人, 大野直子, 水口佳一：「複数サイト置換したハイエントロピー型 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超伝導体の照射耐性」

瀬下 亜里, 山下 愛智, 片瀬 貴義, 水口 佳一：「ハイエントロピー型 AgBiSe_2 の熱電特性評価」

天笠晃樹, 山下 愛智, 室井孝太, 瀬下 亜里, 水口 佳一：「ハイエントロピー型金属カルコゲナイド系薄膜作製と熱電物性評価」

● Superconductivity Interdisciplinary Seminar 2025 2025 年 5 月 16-18 日（山岸園, 静岡）

瀬下 亜里：「ハイエントロピー型熱電材料の開発」

渡邊 雄翔：「遷移金属ジルコナイドの異常熱膨張の起源」

● 超伝導会合 SCF2025 2025 年 7 月 11-13 日（鳥取大他, 鳥取）

渡邊 雄翔：「 TrZr_2 系超伝導体におけるフォノン誘起型異常熱膨張」

● 第 22 回日本熱電学会学術講演会 2025 年 9 月 24-26 日（團十郎芸術劇場うらら, 石川）

瀬下 亜里, 山下 愛智, 水口 佳一：「点欠陥モデルを指標としたハイエントロピー型熱電材料における格子熱伝導率の制御」

● 日本物理学会 第 80 回年次大会 2025 年 9 月 16-19 日（広島大, 広島）

渡邊 雄翔, Ceren Tayran, Mehmet Cakmak, 片瀬 貴義, 臼井 秀知, 三浦 章, 山下 愛智, 水口 佳一：「 $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Zr}_2$ 系超伝導体の異常熱膨張とフォノン物性」

島田 竜之介, 瀬下 亜里, 渡邊 雄翔, 三浦 章, 水口 佳一：「 CuAl_2 型遷移金属ジルコナイド $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Zr}_2$ の超伝導特性と異常熱膨張」

● 4th Interdisciplinary Workshop on Quantum Materials, 2025 年 12 月 19（都立大, 東京）

Y. Watanabe, K. Suzuki, T. Katase, A. Miura, A. Yamashita, Y. Mizuguchi : 「Uniaxial negative thermal expansion in a weak-itinerant-ferromagnetic phase of $\text{CoZr}_2\text{Hf}_{3.49}$ 」

Rani Poonam : 「Development of thermal diode using bulk superconductor」

国際会議

● 30th International Conference on Low Temperature Physics (LT30) 2025 年 8 月 7-13 日 (Bilbao, Spain)

Y. Watanabe, C. Tayran, M. Cakmak, T. Katase, Md. R. Kasem, A. Yamashita, Y. Mizuguchi : Specific heat analyses and superconducting properties of transition-metalzirconides TrZr_2 exhibiting anomalous thermal expansion

T. Ichikawa, Y. Watanabe, T. Murakami, P. Rani, A. Yamashita, O. Miura, Y. Mizuguchi : Influence of trapped flux in Sn-Pb solder on the resistivity measurements of superconducting transition of Sn wire

Rani Poonam : Experimental observation of thermal diode based on bulk superconductor

● 10th Japan-Korea International Symposium on Materials Science and Technology 2025 年 7 月 28 ~31 日 (Tokyo, Japan)

K. Muroi, A. Yamashita, T. Kaneko, Y. Mizuguchi, N. Oono, T. Shibayama: Irradiation resistance of high-entropy $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductors with multiple sites substitution

K. Amagasa, A. Yamashita, K. Muroi, A. Seshita, Y. Mizuguchi : Fabrication of High-entropy-type metal chalcogenide thin films and evaluation of thermoelectric properties

● 38th International Symposium of Superconductivity 2025 年 12 月 2-4 日 (Nagasaki, Japan)

R. Shimada, A. Seshita, Y. Watanabe, A. Miura, Y. Mizuguchi: Superconducting properties and anomalous thermal expansion in a CuAl_2 -type transition metal zirconide $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Zr}_2$

M. Mashiko, P. Rani, K. Hirata, K. Uchida, Y. Mizuguchi : Thermal diode fabricated using bulk superconducting materials

● 41st International Conference on Thermoelectrics 2025 年 6 月 15-19 日 (Sendai, Japan)

A. Seshita, A. Yamashita, T. Katase, Y. Mizuguchi: Effects of high-entropy alloying with S and Te on thermoelectric properties of nonequilibrium cubic phase of $\text{AgBiSe}_{2-2x}\text{S}_x\text{Te}_x$

K. Amagasa, A. Seshita, A. Yamashita, Y. Mizuguchi : Correlation between configurational entropy of mixing and thermal expansion coefficient of cubic metal chalcogenides

● Materials Research Meeting 2025 (MRM2025) 2025 年 12 月 8-13 日 (Yokohama, Japan)

Y. Watanabe, C. Tayran, M. Cakmak, T. Katase, H. Usui, Md. R. Kasem, A. Yamashita, Y. Mizuguchi : Lattice specific heat and thermal conductivity of phonon-driven anomalous thermal expansion superconductors $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Zr}_2$

Rani Poonam : Experimental observation of thermal diode based on bulk superconductor

● 第 24 回台日韓強相関電子系シンポジウム 2026 年 03 月 23-26 日 (国立成功大学,Taiwan)

D. Takegami : Probing Valence, Charge Transfer, and Orbital-Dependent Correlations in bilayer nickelates $R_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ with Core-Level Spectroscopy (Invited Poster)

● International Workshop on Correlated Materials and Electron Spectroscopy 2026 年 02 月 27 日 (Chiba, Japan)

D. Takegami : Exploration of Orbital Characters and Symmetries in Correlated Materials using Cross-Sections in (Angle Integrated) Photoemission Spectroscopy (Invited Talk)

● 22nd International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-22) 2025 年 9 月 18 日～10 月 3 日 (Shizuoka, Japan)

K. Muroi, A. Yamashita, M. Yamanaka, Y. Mizuguchi, T. Kaneko, H. Yamada, N. Oono, K. Yoshida: Development of high-entropy-type REBCO superconductor with multiple sites substitution (Y, Gd, Dy, Yb) $_{0.25}\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

ナノ構造物性研究室

1. 研究活動の概要

界面や表面でおこる様々な現象は、物質の性質やデバイスの性能に大きく影響を及ぼす。表面・界面の構造を制御し、新たな物理現象を見出すことを目的として、本研究室は物質創製・測定技術開発の両面で研究活動を進めている。特に、制御された界面での熱・電荷輸送に関わる物理現象や、ナノチューブ構造に由来する特異な量子物性現象、光物性では特に極端非線形光学現象などを対象に研究を進めている。具体的には、一次元材料である単層カーボンナノチューブ（SWCNT）や遷移金属カルコゲナイドナノチューブ（TMDC-NT）、またナノチューブを配列させた高次構造や、二次元材料である原子層物質などを積層した界面などを対象に、合成・精製技術開発、新規測定技術開発、電気伝導特性・光物性・熱物性の研究を行っている。それら物質の構造、フェルミレベル、界面の接合構造、の制御を通して新たな物性の探索を行っている。最近では、イオン液体を電解質として用い、物質界面に電気二重層を形成させ、キャリア注入を行い、フェルミレベルを自在にシフトさせ、様々な多様な物性を制御する研究を進めている。2025年度は、以下のような研究を進めた。

1) ファンデルワールス界面における熱・電荷の流れの研究

制御されたファンデルワールス界面における熱流・電荷流の相関解明 近年、柔らかな材料を用いたウェアラブル端末等のデバイス応用が注目されている。柔らかな材料で作られた薄膜や、ファンデルワールス力で接合した界面を有しており、その界面における熱および電荷の流れを正しく理解することは、基礎・応用の両面で重要な課題の一つとなっている。厚み数 nm の薄膜の熱輸送を定量的に評価する手法は非常に限られ、その一つが時間領域サーモリフレクタンس法（TDTR 法）である。本研究室では、TDTR 計測系を独自に立ち上げ、これまで縦型のデバイスを形成して、SWCNT 薄膜における熱流・電荷流のキャリア量依存性の解明などを明らかにしてきた。また、厚みが 1nm 程の単層の層状化合物からなる原子層材料を対象として、同原子層材料を 4 層積層した格子不整合な界面において、極めて熱伝導が抑制されることを明らかにしてきた。そのような格子不整合界面における熱伝導と電気伝導を同時測定する計測可能であることを実証してきた。3 層積層した単ドメインの MoS_2 に対し、下部にトランスシューサー用の金電極、積層上部に電流計測用の電極を形成し、熱伝導と電気伝導の同時計測が可能であることを示した。真空アニーリングにより、系統的に界面熱伝導と界面電気伝導を変調させ、その背景の解明を進めている。

2) ナノ構造物質における新規物性探索と制御

ナノチューブ系の熱電物性研究 熱電変換性能（ZT 値）は、ゼーベック係数・電気伝導率および熱伝導率に依存する。これまで私達は電子構造を選択した SWCNT 薄膜を用いて、系統的にキャリア注入制御を行い、ゼーベック係数および電気伝導率に依存する熱電出力因子が、ある特定のキャリア量で増大することを見出してきた。配向制御した SWCNT 薄膜を用いることにより、ナノチューブ軸の垂直方向の熱伝導率・電気伝導率・ゼーベック係数の 3 者の関係を同時に明らかにすることを達成し、ナノチューブの量子構造を反映して ZT 値に複数のピーク構造が現れることを明らかにした。また、配列薄膜において、常に乱れた層が存在する課題があった。2025 年度は、その乱れた層を剥離法により取り除く手法を開発し、全体としての配向度を改善し、高配向薄膜を得る手法を開発した。また 2 オメガ法を用いて厚み 100nm 程の薄膜垂直方向のゼーベック係数を決定できることを明らかにした。TDTR 法を組み合わせ、半導体型 SWCNT 薄膜において膜垂直方向の ZT 値を明らかにすることを行った。

マクロとミクロを横断した構造制御と創発物性～円偏光 THz 検出～ これまで当研究室では、CNT ファイバーが極めて大きな熱電出力因子を示すことを明らかにしてきた。近年、共同研究を進めている東海理化株式会社と、P 型だけでなく N 型のファイバーも作成可能であることを明らかにしてきた。CNT ファイバーで P 型、N 型の両方を用意が可能となり、多様な PN 接合構造が可能となった。そこで、両者を用いた PN 接合における構造と光応答の研究を 2025 年度より開始した。はじめに THz 帯における光応答を調べたところ、光熱電変換過程により明確な THz 応答が見られた。そこで、PN 接合を右巻き・左巻き、また渦構造などにするによる光応答を調べたところ、顕著な円偏光二色性が見られた。新たな研究プロジェクトがスタートし、同ファイバーを用いたイメージセンサの開発を進めている。

一次元遷移金属カルコゲナイドナノチューブの合成とその物性解明 遷移金属カルコゲナイドナノチューブ (TMDC-NT) は、非従来型超伝導やバルク光電効果といったカイラル構造に由来する新たな物性が報告され、現在活発に研究がなされている。しかし TMDC-NT は、古くからその合成手法は報告されているが、未だに物性研究が可能な単層の TMDC-NT は合成されていない状況にあり、合成手法の発展はその物性解明において非常に重要な課題となっている。本研究室では、構造と物性との関係を系統的に議論する為、TMDC-NT の合成手法の開発からその物性研究まで取り組んでいる。今年度は、単層化を目指した層数制御法の開発を進め、水素化での合成を行い、半数が 2～3 層となる合成条件を見出した。また、ドーピング技術も進め、レニウム元素を化学気相法で置換する手法開発を進めた。

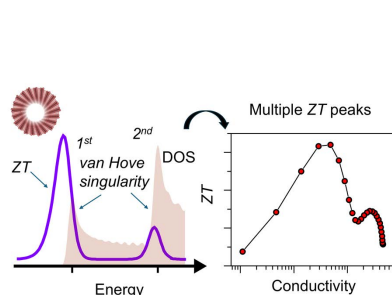


図 1: 量子閉じ込め効果による複数 ZT 値ピークを示す半導体 SWCNT

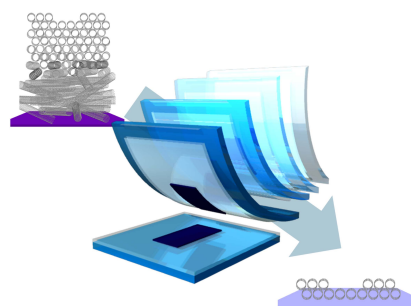


図 2: CNT 薄膜の剥離技術

2. 研究業績

1) 論文

Shigeki Saito, Jacques Doumani, Satoshi Kusaba, Junichiro Kono, Kazuhiro Yanagi, “Controlled thinning of aligned single-wall carbon nanotube films by multiple exfoliation” *Appl. Phys. Lett.* **17**, 171906 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0293759>

Kan Ueji, Shojiro Asatori, Yota Ichinose, Rikuto Abe, Yuichiro Yamashita, Shigeki Saito, Yohei Yomogida, Satoshi Kusaba, Takashi Yagi, Geoff Wehmeyer, Junichiro Kono, Kazuhiro Yanagi “Multiple ZT Peaks Caused by van Hove Singularities in Semiconducting Carbon Nanotube Films” *ACS Nano* **19**, 29440-29447 (2025) <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c07264>

Clara Freytag, Christin Schuster, Emil Parth, Dido Denier van der Gon, Takeshi Saito, Kazuhiro Yanagi, Paola Ayala, Thomas Pichler, “Systematic Optimization of the Synthesis of Confined Carbyne” *Small Methods* **9**, 2500075 (2025) <https://doi.org/10.1002/smtd.202500075>

Finn L Sebastian, Leon Kaminski, Christoph Bendel, Yohei Yomogida, Yuuya Hosokawa, Han Li, Sebastian Lindenthal, Benjamin S Flavel, Kazuhiro Yanagi, Jana Zaumseil, “Circular dichroism of quantum defects in carbon nanotubes created by photocatalytic oxygen functionalization” *Nat. Comm.* **16**, 5107 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60342-y>

Emil Parth, Andrea Corradini, Weili Cui, Davide Romanin, Christin Schuster, Clara Freytag, Lei Shi, Kazuhiro Yanagi, Matteo Calandra, Thomas Pichler ” Anharmonic effects control interaction of carbyne confined in carbon nanotubes shaping their vibrational properties” *Nat. Comm.* **16**, 4797 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59863-3>

Clara Freytag, Christin Schuster, Weili Cui, Nikos Tagmatarchis, Rubén Cantón-Vitoria, Lei Shi, Emil Parth, Kazuhiro Yanagi, Paola Ayala, Thomas Pichler ” Nitrogen doping of confined carbyne” *J. Phys. Chem. Lett.* **16**, 4990-4994 (2025) <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5c01063>

Yun Hee Koo, Yusuke Tsutsui, Mikito Omoto, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi, Yuichiro K Kato, M Alejandra Hermosilla-Palacios, Jeffrey L Blackburn, Shu Seki, ”Circularly Polarized Light-Induced Microwave Conductivity Measurement: Rapid Screening Technique of Electronic Conductivity in Chiral Molecular Materials” *J. Phys. Chem. Lett.* **16**, 3232-3239 (2025) <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5c00370>

Jichao Fan, Benjamin Hillam, Cheng Guo, Hiroyuki Fujinami, Koki Shiba, Haoyu Xie, Ruiyang Chen, Kazuhiro Yanagi, Weilu Gao, “Optical modeling, solver, and design of macroscopic single-enantiomer carbon nanotube film and reconfigurable chiral photonic device” *Carbon* **234**, 120016 (2025) <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120016>

Christin Schuster, Clara Freytag, Weili Cui, Lei Shi, Emil Parth, Dido Denier van der Gon, Takeshi Saito, Kazuhiro Yanagi, Thomas Pichler, “Quantifying the bulk yield of carbyne confined in different carbon nanotube hosts” *Carbon* **234**, 119979 (2025) <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119979>

2) 特許

特願 2026- 25603, 出願日：2026/2/19, 出願名：半導体デバイス及びテラヘルツ波検出装置, 発明者：柳和宏, 草場哲、柴幸輝 出願人：東京都公立大学法人

特願 2025-94700, 出願日：2025/6/6, 出願名：半導体デバイス及びテラヘルツ波検出装置, 発明者：柳和宏, 草場哲、柴幸輝 出願人：東京都公立大学法人

3) 学会講演

● 247th ECS meeting, 20th May, USA. (2025)

Kazuhiro Yanagi Synthesis of WS₂ Nanotubes and their Properties (招待講演)

● Pire and ASPIRE WS, 13th June, Tokyo (2025)

Kazuhiro Yanagi THz detection using P/N fibers (招待講演)

● ASPIRE WS, 20th Sept, Tokyo (2025)

Kazuhiro Yanagi THz detection at twisted PN junction of carbon nanotube fiber 招待講演)

● JUNCTION WS, 4th Sept. 2025, NY, US (2025)

Kazuhiro Yanagi THz detection at twisted PN junction using Carbon Nanotube fibers (招待講演)

● C60 at 40, 13th Oct., Houston, US(2025)

Kazuhiro Yanagi Thermoelectrics at controlled nanointerface (招待講演)

● A3 symposium, 15th Nov, Kokura, Japan (2025)

Kazuhiro Yanagi Multiple zT peak structures in one-dimensional materials with strong quantum confinement (招待講演)

● MRS Boston, 3rd of Dec. 2025, USA

Kazuhiro Yanagi Multiple zT peaks caused by van Hove singularities in semiconducting single walled carbon nanotubes (招待講演)

● PCOS2025, 20th Nov. Atami, Japan (2025)

Kazuhiro Yanagi Thermoelectric physics of arrayed carbon nanotubes: from thermoelectric figure of merit to THz detection (招待講演)

● Pacifichem, 16th Dec. 2025, Honolulu, US

Kazuhiro Yanagi Controlled synthesis of WS₂ nanotubes with a diameter of 10 nm: Optical properties and arrayed synthesis (招待講演)

● The 4th International Conference on Japan – Bangladesh Research and Practice (JBRP2025), 2025 Dec.13-Dec.14

A. Ahad, M. A. Rahman, Y. Yomogida, Y. Miyata, Y. Hirose, K. Shinokita, K. Matsuda, Z. Liu, and K. Yanagi: Development of the Synthesis Technique of WS₂ Nanotubes and Their Physical Properties (Invited)

● 日本物理学会第80回年次大会、9月18日、広島 2025年

柳和宏 “原子層積層界面における熱輸送と電気輸送の相関” (招待講演)

● 東京理科大学総合研究院 ナノカーボン研究部門研究会 9月28日 東京理科大学、東京 (2025)

柳和宏 “カーボンナノチューブの熱電応答および光熱電応答” (招待講演)

● JSAP annual meeting, 東京理科大学野田キャンパス 17th Mar, (2025)

Kazuhiro Yanagi Control of heat and electrical transport across van der Waals nano interfaces (招待講演)

● 第9回フォノンエンジニアリング研究会 2025 May 18 - May 19

草場哲: 原子層積層界面の熱・電荷輸送の相関 (口頭)

● 日本物理学会第80回年次大会 2025 Sep. 16 - Sep. 19

恵慎太郎, 草場哲, 田原弘量, 玉置亮, 谷口尚, 渡邊賢司, 柳和宏, 武田淳, 片山郁文: 和周波分光による hBN 封止 2 層 WSe₂ 内の高次励起子準位の観測 (ポスター)

草場哲, 柴幸輝, 齋藤滋輝, 玉置亮, 都築静, 松浦司, 片山郁文, 柳和宏: カーボンナノチューブファイバー PN 接合における円偏光選択的なテラヘルツ光熱電効果 (口頭)

● 研究会「非平衡固体物性の最前線 2025 (FNSS 2025) 2025 Nov. 10 - Nov. 11

草場哲: 単一カイラリティカーボンナノチューブ薄膜における高強度テラヘルツ電場誘起光学異方性 (ポスター)

● 第 73 回応用物理学会春季学術講演会, 2026 Mar. 15 - Mar. 18

草場哲, Miguel Ángel López Carrillo, 柴幸輝, 齋藤滋輝, 玉置亮, 都築静, 松浦司, 武田淳, 片山郁文, 柳和宏.: ねじれカーボンナノチューブファイバー p-n 接合による円偏光テラヘルツ検出器 (口頭)

齋藤滋輝, 金子嘉彦, 豊岡雅大, 上治寛, 草場哲, Zaumseil Jana, 柳和宏: ナノスケール薄膜における面直方向の熱電性能評価計測 (口頭)

● 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 Mar. 23 - Mar. 26

草場哲, Miguel Ángel López Carrillo, 柴幸輝, 齋藤滋輝, 玉置亮, 都築静, 松浦司, 武田淳, 片山郁文, 柳和宏.: ねじれたカーボンナノチューブファイバー p-n 接合が示す楕円偏光選択則のねじれ量依存性 (口頭)

国際会議

● 2025 ASPIRE &PIRE joint Workshop on Nanotubes, 2025 Jun. 13

Satoshi Kusaba: Optical anisotropy modulation in carbon nanotube thin film induced by broadband intense terahertz pulse irradiation (ポスター)

Shigeki Saito: Multiple exfoliation techniques of aligned CNT layers (ポスター)

Shigeki Saito: Multiple exfoliation techniques of aligned CNT layers (ポスター)

Yoshihiko Kaneko, Shigeki Saito, Shojiro Asatori, KanUeji, Takashi Yagi, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Evaluation of out-of-plane Seebeck coefficient of single walled carbon nanotube thin films using AC heating (ポスター)

Masaharu Kikuchi, Akane Ihara, Abdul Ahad, Md. Ashiqur Rahman, Shigeki Saito, Kazuhiro Yanagi: Transport Characteristics of CVD-synthesized WS₂ Nanotubes with diameter of 10 nm (ポスター)

Koki Shiba, Shigeki Saito, Satoshi Kusaba, Shizuka Tsuduki, Tsukasa Matsuura, Ryo Tamaki, Jun Takeda, Ikufumi Katayama, Kazuhiro Yanagi: Terahertz wave detection using P/N carbon nanotube fiber at room Temperature (ポスター)

Hiroiyuki Fujinami, Koki Shiba, Yuuya Hosokawa, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Circular dichroism of Trion in enantiopure carbon nanotubes (ポスター)

● The 25th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT25) 2025 Jun. 15-Jun. 20

A. Ahad, M. A. Afzal, R. Higashinaka, M. Kikuchi, S. Saito, S. Kusaba, Z. Liu, Y. Miyata, Y. Hirose, and K. Yanagi: Synthesis of Rhenium Doped WS₂ Nanotubes and their electrical properties (poster)

Shigeki Saito, Yoshihiko Kaneko, Shijiro Asatori, Satoshi Kusaba, Kan Ueji, Takashi Yagi, Kazuhiro Yanagi: Evaluation of cross-plane Seebeck coefficient of single-walled carbon nanotube thin films using AC heating (poster)

Koki Shiba, Shigeki Saito, Satoshi Kusaba, Shizuka Tsuduki, Tsukasa Matsuura, Ryo Tamaki, Jun Takeda, Ikufumi Katayama, Kazuhiro Yanagi: Terahertz wave detection using P/N carbon nanotube fiber at room Temperature (poster)

Hiroyuki Fujinami, Koki Shiba, Yuuya Hosokawa, Yohei Yomogida, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi : Circular dichroism of Trion in enantiopure carbon nanotubes (poster)

● The 69th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (FNTG69th))

Satoshi Kusaba, Jax Dallas, Pin-Hsun Hsieh, Hiroyuki Fujinami, Ryo Tamaki, Hirokazu Tahara, Ikufumi Katayama, Kazuhiro Yanagi, Jun Takeda, and Geoffrey A. Blake: Terahertz field-induced optical anisotropy modulation in enantiopure carbon nanotube films (ポスター)

Koki Shiba, Satoshi Kusaba, Shigeki Saito, Shizuka Tsuduki, Tsukasa Matsuura, Ryo Tamaki, Jun Takeda, Ikufumi Katayama, Kazuhiro Yanagi: Circular polarization selective response for terahertz light at twisted PN junction using carbon nanotube fiber (ポスター)

Hiroyuki Fujinami, Koki Shiba, Yuuya Hosokawa, Yohei Yomogida, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi : Circular dichroism of Trion in enantiopure carbon nanotubes (ポスター)

● 15th A3 symposium on Emerging Materials 2025 Nov.13-Nov.15

A. Ahad, R. Higashinaka, M. Kikuchi, S. Saito, S. Kusaba, Z. Liu, Y. Miyata, Y. Hirose, and K. Yanagi: Synthesis and Electrical Properties of Rhenium-Doped Tungsten Disulfide Nanotubes (Poster)

● Materials Research Meeting 2025 2025 Dec.8-Dec.13

Shun-ichiro Ito, Kan Ueji, Shigeki Saito, Takuma Shiga, Takashi Yagi, Taishi Takenobu, Kazuhiro Yanagi: Modulation of Heat Flow via Electrochemical Doping in Conducting Polymer PBTTT (Poster)

● Materials Research Meeting 2025 2025 Dec.8-Dec.13

Shun-ichiro Ito, Kan Ueji, Shigeki Saito, Takuma Shiga, Takashi Yagi, Taishi Takenobu, Kazuhiro Yanagi: Modulation of Heat Flow via Electrochemical Doping in Conducting Polymer PBTTT (Poster)

● International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPM 2026), 2026 Feb. 28 - Mar. 6

Satoshi Kusaba, Koki Shiba, Miguel Ángel López Carrillo, Shigeki Saito, Ryo Tamaki, Shizuka Tsuzuki, Tsukasa Matsuura, Jun Takeda, Ikufumi Katayama, Kazuhiro Yanagi: Circular polarization selective terahertz photothermoelectric effect in carbon nanotube fiber p-n junction (Poster)

● The 70th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (FNTG70th), 2026 Mar. 3-Mar.5

Miguel Ángel López Carrillo, Satoshi Kusaba, Koki Shiba, Shigeki Saito, Ryo Tamaki, Atsushi Yamaguchi, Yoshihiro Yokoi, Tsukasa Matsuura, Junichiro Kono, Jun Takeda, Ikufumi Katayama, Kazuhiro Yanagi.: Terahertz imaging beyond the diffraction limit using carbon nanotube fiber p-n Junctions (Poster)

Koki Shiba, Satoshi Kusaba, Miguel Ángel López Carrillo, Shigeki Saito, Ryo Tamaki, Atsushi Yamaguchi, Yoshihiro Yokoi, Tsukasa Matsuura, : Twist angle dependence of circularly polarized THz selective response in carbon nanotube fibers (Poster)

Ken Sakayauchi, Abdul Ahad, Zheng Liu, Satoshi Kusaba, Kazuhiro Yanagi : Diameter dependence of Raman A_{1g} modes of WS₂ nanotubes (Poster)

編集後記

2025 年度を振り返ると、大学を取り巻く環境がさらに大きく変化しつつあることを実感している 1 年だった。2027 年度から始まる英語学位プログラムに向けた取り組みも具体的に進みつつあり、教育・研究の国際化は今後ますます重要な課題になると感じている。また、知のみやこプロジェクト雇用の教員をはじめとして、教員の入れ替わりも多く、研究科・専攻には新たな視点や活力が加わりつつある。研究分野や教育経験の異なる教員が加わることで、これまでの活動を引き継ぎながらも、新たな展開が生まれることを期待している。

一方で、生成系 AI の発展は想像以上に急速であり、研究や教育のあり方そのものを問い直す状況になってきている。さまざまな場面で AI の利用が現実的な選択肢となりつつある一方で、何を人間が考え、何を教育として伝えるべきかという根本的な問題も浮かび上がっている。この変化は一時的な流行ではなく、今後の大学の活動に長く影響を与えるものだろう。

新しい教員の参加や生成系 AI の急速な発展は、いずれも本専攻の研究教育活動の枠組みを広げる契機である。変化の大きい時代ではあるが、それを前向きに受け止め、2026 年度が本専攻にとってさらに活発で刺激的な 1 年になることを願っている。

(野本拓也 記)

2025 年度 年次報告編集委員
田沼肇（2025 年度物理学教室主任）
野本拓也
服部裕也