

物理教室年次報告書（暫定版）  
令和4年度

2023年3月  
九州大学大学院理学研究院物理学部門

## 目次

はじめに	1
令和4年度の研究・教育活動報告	
素粒子理論	3
理論核物理	25
宇宙物理理論	36
粒子系理論物理学	56
素粒子実験（準備中）	67
実験核物理	69
物性理論	88
統計物理学	98
凝縮系理論	102
数理物理	107
磁性物理学	110
光物性	116
固体電子物性	119
複雑物性基礎	129
複雑流体	138
複雑生命物性	148
客員教授	158
教職員一覧	159
各種委員一覧	160
物理学教室談話会	161
非常勤講師一覧	163
外国人研究者等受入記録	164
教育課程委員会活動報告	165
物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告	167
入学者数と卒業者数	168
就職・進学状況	169
体験入学・公開講座報告	170
社会貢献活動報告	172

## はじめに

令和4年度 物理学部門長 木村康之

### 令和4年度の概要:

COVID19 の状況が落ち着きつつあることを鑑みて、状況に配慮しつつ COVID19 以前の状態への復帰を目指したさまざまな試行をした1年であった。例えば、全対面講義、通常の対面での大学院入試、参加者を限定したハイブリッドでの修士論文発表会等を実施した。ことに修士論文発表会を対面に戻したことで、以前のような活発な発表会が実現した。今後はさらに COVID19 以前への回帰の傾向が増すものと予想される。

また、ここ数年開催できなかった新人歓迎会を7/1に開催し、多数の参加者に参加頂き久々に教室としての一体感を感じられる機会となった。

### 人事関連:

本年度を通して活発な人事が行われた。新たに、緒方一介教授(理論核)、野村健太郎教授(凝縮理論)、中村祥子准教授(光物性)、湊太志准教授(理論核)、多羅間充介助教(物性理論)、小林史明助教(複雑物性基礎)が教室のメンバーとなった。これに加え、公募人事の結果として、東城順二教授(素粒子実験)、坂口聡志教授(実験核)が准教授から昇任された。教室のメンバーには多数の人事委員会に出席して頂く負担が重く、透明性を担保しつつ委員のロードを低減する人事委員会の進め方を議論するきっかけとなった。

一方、令和5年3月には理学研究院長を務められた和田裕文教授(磁性)が定年退職され、名誉教授になられた。対面での最終講義では教室に入りきれないほどの聴衆が詰めかけ、和田教授の部門及び研究への貢献を感じさせる印象深いものであった。

理学研究院全体を見渡してもこれほど人事が活発な部門はなく、部門がアクティブである証左ではあるが、教育や運営面など歴史的な背景を踏まえて改革を進める分野では、経験の継承や連続性の面での不安定要素となりうる。

### 教育関連:

COVID19 での遠隔授業や動画配信での講義方式に学生、教員双方の経験が増し、それ以前よりの多面的な講義形式を実現できるようになってきた。一方で、学生同士や教員と学生との対面での議論等の機会が減ったため、一部の学生には学習意欲の低下や関連して学力の低下が危惧される状況となった。ことに物理関連の数学的な能力不足が物理科目の理解にも影響を与えている可能性が指摘され、FDでこの点に関して議論を深めた。さらに年度末には ChatGPT 等の生成 AI の利用が急速に広がり、これらを用いたレポート作成に対する対応を緊急で行う必要が発生した。

### その他:

以下には、令和4年度にあったその他の特記事項をまとめる。

○一般入試および総合型選抜入試での合格者に占める女子の割合が今年度は 20% 近くとなった。

- 大学が10兆円ファンドをもとにした国際卓越研究大学制度に応募し、さまざまな機構改革や人事制度を行う案がトップダウンで決められ、その案が国に提出された。
- 若手の優秀な人材確保のための施策として九大独自の稲盛フロンティア教員制度がトップダウンで開始され、1年5名で5年間テニユアトラック准教授を採用し、そのうち5名を高等研究院教授に採用するものである。
- 4年生特別研究の研究室配属を3月の進級会議の結果をもって、進級対象者のみを対象者として希望による配属をする方法を新たに導入した。本年度は志望順位の低い研究室への配属者が比較的少なかったが、新方式の検証を継続する必要がある。

# 素粒子理論

## 研究室構成員

鈴木博 教授

津村浩二 准教授      下村崇 (客員) 准教授

大塚啓 助教      内田祥紀 (ダイバーシティ促進枠) 助教

《 博士研究員 》

山津直樹 (学術研究員)

《 大学院 博士課程 》

宮川侑樹

《 大学院 修士課程 》

阿部元一      西村皐      宮尾光      小野田壮真

甲斐貴文      中嶋陽平

《 学部 卒業研究生 》

石迫陸野      内山晴貴      木田浩樹      船越秀太

六田伊吹      綿井理久

《 訪問研究者 》

井上研三

## 担当授業

量子力学 II (鈴木博)、量子力学 III (鈴木博)、特殊相対論・電気力学 (津村浩二)、解析力学 (津村浩二)、物理学総合演習 (津村浩二)、最先端物理学 (津村浩二)、物理学ゼミナール (鈴木博・大塚啓)、物理学特別研究 I・II (鈴木博・津村浩二)、場の量子論 (鈴木博)、M1 ゼミナール (大塚啓)、力学・同演習 (内田祥紀)

## 研究・教育目標と成果

分数トポロジカル電荷の格子ゲージ理論における定式化 (鈴木博・阿部元一・小野田壮真) (この研究は森川億人氏 (大阪大学)、谷崎佑弥氏 (京都大学基礎物理学研究所) との共同研究です。)

近年、従来の対称性に加えて、高次対称性や非可逆対称性といった対称性の一般化が考えられ、それらの実現と応用が素粒子理論・物性理論の両面で活発に研究されてい

る。こうした研究のうち、特に注目を集めたのが、Gaiotto, Kapustin, Komargodski, Seiberg による、真空角  $\theta = \pi$  の  $SU(N)$  Yang–Mills 理論における  $T$  対称性の自発的破れの議論である。彼らは、この理論の大局的高次対称性である 1-form 対称性に結合する外部ゲージ場 (2-form ゲージ場) を導入し、大局的 1-form 対称性と離散  $T$  対称性の間に混合アノマリーがあることを示した。この 't Hooft アノマリーの存在は  $T$  対称性の自発的破れを強く示唆する。ここで重要なのは、2-form ゲージ場 (これは 't Hooft フラックスとも呼ばれる) が存在する時、Yang–Mills 場のトポロジカル電荷が分数になるという事実である。ゲージ理論のトポロジカルな性質は、いわゆる主ファイバー束の構造で与えられるが、このファイバー束の観点からは、1-form 変換は遷移関数に  $SU(N)$  の中心  $\mathbb{Z}_N$  の元を掛ける変換であり、2-form ゲージ場は  $SU(N)/\mathbb{Z}_N$  ゲージ理論のコサイクル条件における  $\mathbb{Z}_N$  因子に対応している。我々は上記の 't Hooft アノマリーを数学的によく定義された枠組みで理解すべく、高次対称性のファイバー束に基づいた見方に基づき、格子ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の構成を行った。ただし最初の論文では  $SU(N)$  ゲージ理論より構成が容易な  $U(1)$  格子ゲージ理論の場合を考察している。続く、谷崎佑弥氏、小野田壮真を含めた論文では、非可換ゲージ理論への拡張を実行した。これらの研究は、ゲージ理論における一般化された対称性の理解に対する独自の視点からの研究と考えており、Witten 効果の格子ゲージ理論における理解などへの応用を目指して現在研究を進めている。

### 暗黒 $SU(2)$ ゲージ対称性にもとづく擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質 (津村浩二・大塚啓・下村崇・山津直樹・内田祥紀)

暗黒物質の有力候補として現在盛んに研究されている模型の一つに、擬 Nambu-Goldstone 暗黒物質模型 (pNGB DM 模型) がある。紫外完全な従来の pNGB-DM 模型では崩壊する暗黒物質が予言され、暗黒物質を長寿命にするため、ダークセクターのスケールに大きな階層性を設ける必要があった。我々が提唱した模型では、破れの起源を説明しつつ暗黒物質を安定化することに成功し、大きな階層性を導入せずに済んだ。我々の模型では、理論に新たにダーク  $SU(2)$  ゲージ対称性を課し、このダーク  $SU(2)$  のもとで二重項と三重項のスカラー場を導入する。理論に新たに課すのはこのダーク  $SU(2)$  だけだが、偶発的に生じたより大きなグローバル対称性が存在し、これが暗黒物質の安定化の鍵となる。ダーク  $SU(2)$  ゲージ対称性は自明な群まで自発的に破れるが、先述のグローバル対称性の一部が厳密な  $U(1)$  対称性として残り、暗黒物質がこれに荷電して安定化する。真空解析も行い、上記の真空が実際に実現することも確かめた。結果、ダークセクターに階層性を導入することなく、現在の実験的制限を回避できることを示した。

### ヒッグス有効理論の拡張と幾何学的解釈 (津村浩二・内田祥紀)

(この研究は棚橋誠治氏 (名古屋大学)、長井遼氏との共同研究です。)

ヒッグス有効理論は、素粒子標準模型の構成粒子を用いて記述される最も一般的な有効理論である。有効理論は質量の大きい新粒子の自由度が積分されているが、それらの新粒子を有効理論に付加することで、新粒子の散乱振幅を評価することが可能となる。我々は先行研究で、ヒッグス有効理論に新しいスカラー、フェルミオン粒子を付加した「拡張ヒッグス有効理論」を構築した。我々はさらに、新物理の兆候として長く注目され、2021年4月にFNAL (フェルミ国立加速器研究所) が新たな測定値を発表したことで議論が活発化した「ミューオン  $g-2$ 」と呼ばれる物理量を、この拡張ヒッグス有効理論を用いて評価した。この物理量が、フェルミオン粒子の4点相互作用を用いて表せることを示した。場の再定義のもとで共変な形で、新しいスカラー、フェルミオン粒子の表現によらない一般的な表式を導出することに成功した。

### $\mu$ - $\tau$ フレーバー荷を持つスカラー暗黒物質 (津村浩二・宮尾光) (この研究は浅井健人氏 (東京大学宇宙線研究所)、大川翔平氏 (バルセロナ大学) との共同研究です。)

暗黒物質の残存量は宇宙マイクロ波背景放射の観測から宇宙の約27%を占めることがわかっている。一方で最新の直接検出実験から、暗黒物質の核子との散乱断面積は非常に小さいことがわかっており、これらを整合するアイデアが求められている。そこで、我々はフレーバー非対角な相互作用を持つ媒介粒子によって暗黒物質と核子の相互作用が抑制されるアイデアに注目した。本研究では、くりこみ可能で  $\mathbb{Z}_4$  フレーバー対称性を持つ暗黒物質モデルを構築し、研究した。モデルのフレーバー非対角な相互作用を持つ媒介粒子によって、暗黒物質と核子がツリーレベルでは相互作用しないことを確認した。さらに、1-loop レベルでの散乱断面積を評価した。また、モデルの媒介粒子は muon  $g-2$  の理論値と実験値の乖離を説明できる。これに注目して、ミューオン  $g-2$  を説明できる領域で可能な暗黒物質を調べ、XENONnT などの将来実験でモデルが検証可能であることを確認した。

### 高次元重力理論におけるモジュライ安定化機構と時空の発展 (大塚啓) (この研究は阪村豊氏 (KEK) との共同研究です。)

本研究では、6次元 Salam-Sezgin モデルにおいて、すべてのモジュライ場の安定化機構と6次元時空の発展を詳細に調べた。従来の4次元有効理論のアプローチでは、モジュライ場の振動エネルギーに対する輻射の寄与は小さいことが指摘されていたが、4次元有効理論では扱えないエネルギースケールでは、それが逆転し、モジュライ場の振動エネルギーは無視できることを示した。また、輻射優勢期においてモジュライ場が固定されていたとしても、余剰次元空間上の圧力がモジュライ場の期待値をずらし、モ

ジュライ場の振動を促すことを明らかにした。今後は、素粒子標準模型を内包するより現実的な高次元模型において、高次元時空の発展を解析し、de Sitter 時空や宇宙の熱史に高次元時空の時間発展がどのような寄与をもたらすかを明らかにしておく。

**オービフォルド上の指数定理** (大塚啓) (この研究は小林達夫氏 (北海道大学)、坂本眞人氏 (神戸大学)、竹内万記氏 (神戸大学)、龍田佳幸氏 (Scuola Normale Superiore, INFN)、内田光氏 (北海道大学) との共同研究です。)

本研究では、トロイダルオービフォルド上の Atiyah-Singer 指数定理について研究した。高次元時空に素粒子が住んでいる場合、クォークとレプトンの世代数は余剰次元空間上の指数定理により決定される。特に余剰次元空間が特異点を持つ場合、Atiyah-Singer の指数定理を用いることができず、指数定理に関する統一的な理解はこれまで得られていなかった。我々は、トロイダルオービフォルドの特異点が解消された空間 (Blowup 空間) を考え、その Blowup 空間上の Atiyah-Singer 指数定理に基づきトロイダルオービフォルド上の指数を調べた。その結果、Blowup 空間上に導入される局在化した磁場と一様に広がる磁場が、トロイダルオービフォルド上の指数を決定していることを明らかにした。また、この局在化した磁場は弦理論においても重要な役割を果たす。北海道大学のグループと共に、互いに双対な Type IIB 型弦理論と Type IIA 型弦理論の間に知られていたモジュラーウェイトの相違を、この局在化した磁場が担っていることを明らかにした。現在、境界がある空間上の指数定理や他の高次元空間への拡張を目指して、研究を行っている。

**モジュラーフレーバー対称性に基づくインフレーション機構** (大塚啓) (この研究は阿倍慶彦氏 (Wisconsin 大学)、檜垣徹太郎 (慶應大学)、小林達夫氏 (北海道大学) との共同研究です。)

近年注目を集めているモジュラーフレーバー模型では、素粒子のフレーバー構造は湯川結合に現れるモジュライ場により決定される。本研究では、そのモジュライ場がフレーバー構造の決定に加え、初期宇宙の加速膨張 (インフレーション) を引き起こすかどうかを調べた。余剰次元空間の幾何学的対称性に端を発するモジュラー対称性は 4次元有効理論に現れることが期待されており、インフラトン場のラグランジアンにも制限を与える。我々は、モジュラー形式によって記述されるインフラトン場のポテンシャルが  $\alpha$ -アトラクター模型のインフレーションと類似しており、現在のプランク衛星の結果と整合していることを示した。その際、Kähler potential の高次項が重要な役割を果たす。そして、インフレーション終了後にモジュライ場は CP 対称性を保つ真空に転がり、ゲージ場とグラビティーノへ主に崩壊していくことを明らかにした。

**モジュラーフレーバー対称性と物質場の対称性** (大塚啓・西村臯) (この研究は小林達夫氏 (北海道大学)、谷本盛光氏 (新潟大学)、山本恵氏 (広島工業大学) との共同研究です。)

モジュラー対称性に含まれる非可換な離散対称性は素粒子のフレーバー構造を決定し、特にレプトンセクターに対して成功を収めてきた。本研究では、物質場のモジュラーウェイトが  $1/M$  の倍数のとき、 $\mathbb{Z}_{2M}$  対称性が 4 次元有効理論に現れることを示した。この新たな離散対称性は、バリオンパリティやレプトンパリティ、 $R$ -パリティ、 $\mathbb{Z}_3$  バリオン triality、 $\mathbb{Z}_6$  プロトン hexality などのバリオン数やレプトン数を制限する対称性を内包していることを明らかにした。今後は、モジュラー対称性により誘起される離散対称性に基づく物質場の高次演算子の分類や暗黒物質の安定性の議論への拡張が期待される。

**非弾性暗黒物質と FASER 実験における探索可能性** (下村崇) (この研究は Jinmian Li 氏 (四川大学)、野村敬明氏 (四川大学) との共同研究です。)

地上実験および宇宙観測による暗黒物質の探索が行われているが、まだ発見には至っていない。この状況を説明する一つの理論的可能性として、暗黒物質は通常物質と非弾性的に散乱することによってより重い新粒子へ変化することが考えられている。我々はこの様な状況にある暗黒物質がゲージ相互作用する場合を仮定し、CERN の LHC 実験と平行して行われている FASER 実験でどこまで探索可能であるかを理論的に明らかにした。現在より詳細な解析によって探索感度の正確な評価を行なっている。

**レプトンフレーバーの破れと FASER 実験における探索可能性** (下村崇) (この研究は荒木威氏 (奥羽大学)、浅井健人氏 (東京大学 宇宙線研究所)、音野瑛俊氏 (九州大学)、田窪洋介氏 (KEK) との共同研究です。)

ニュートリノ振動現象によってレプトンフレーバーは保存しないことが明らかになっており、レプトンフレーバーの破れを予言する多くの模型が提案されている。本研究ではレプトンフレーバーを破る新粒子について一般的な相互作用を仮定し、新粒子の質量が数 GeV 以下の場合に CERN の FASER 実験で探索可能なパラメーター領域があることを明らかにした。また、その様な領域の中に、未だどの実験でも探索されていないパラメーター領域があることを明らかにした。

**$B-L$  ゲージ対称性に基づく不毛ニュートリノ暗黒物質** (下村崇) (この研究は永島伸多郎氏 (東京大学 宇宙線研究所)、瀬戸治氏 (北海道大学)、内田祥紀 (華南師範大学) との共同研究です。)

ニュートリノの質量と混合を説明する多くの模型では通常物質ほとんど相互作用し

ない不毛ニュートリノの存在が予言される。その様な不毛ニュートリノは非熱的に生成される暗黒物質の一つの候補になり得る。本研究では陽子の安定性を保証する  $B-L$  対称性を考え、新たに逆崩壊過程による  $B-L$  ゲージ粒子およびその質量の起源となるスカラー粒子の生成を考慮した解析を行なった。その結果、従来考えられてきた逆崩壊過程を考慮していないパラメーター領域では暗黒物質の残存量を説明できないことを明らかにした。今後はより精密な計算を行い、観測結果を説明し得るパラメーター領域を正確に明らかにしていく。

## 発表論文

《 原著論文 》

Fractional topological charge in lattice Abelian gauge theory:

Motokazu Abe, Okuto Morikawa, and Hiroshi Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **2023** (2023), 023B03

[arXiv:2210.12967 [hep-th]]

Scalar Dark Matter with a  $\mu-\tau$  Flavored Mediator:

Kento Asai, Coh Miyao, Shohei Okawa, Koji Tsumura,

Physical Review **D106**, 035017 (2022)

[arXiv:2205.08998 [hep-ph]]

Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter from Non-Abelian Gauge Symmetry:

Hajime Otsuka, Takashi Shimomura, Koji Tsumura, Yoshiki Uchida, Naoki Yamatsu,

Physical Review **D106**, 115033 (2022)

[arXiv:2210.08696 [hep-ph]]

Lepton flavor violation, lepton  $(g-2)_{\mu,e}$  and electron EDM in the modular symmetry:

Tatsuo Kobayashi, Hajime Otsuka, Morimitsu Tanimoto and Kei Yamamoto,

Journal of High Energy Physics **08** (2022) 013

[arXiv:2204.12325 [hep-ph]]

Spacetime evolution during moduli stabilization in radiation dominated era beyond 4D effective theory:

Hajime Otsuka, and Yutaka Sakamura,  
Journal of High Energy Physics **08**, 120 (2022)  
[arXiv:arXiv:2205.00175 [hep-th]]

Phenomenological implications on a hidden sector from the festina lente bound:  
Kayoung Ban, Dhong Yeon Cheong, Hiroshi Okada, Hajime Otsuka, Jong-Chul Park,  
and Seong Chan Park,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2023** (2023), 013B04  
[arXiv:2206.00890 [hep-ph]]

Residual flavor symmetry breaking in the landscape of modular flavor models:  
Keiya Ishiguro, Hiroshi Okada, and Hajime Otsuka,  
Journal of High Energy Physics **09** (2022), 072  
[arXiv:2206.04313 [hep-ph]]

Generalized matter parities from finite modular symmetries:  
Tatsuo Kobayashi, Satsuki Nishimura, Hajime Otsuka, Morimitsu Tanimoto, and Kei  
Yamamoto,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2023** (2023), 043B02  
[arXiv:2207.14014 [hep-ph]]

Index theorem on magnetized blow-up manifold of  $T^2/Z_N$ :  
Tatsuo Kobayashi, Hajime Otsuka, Makoto Sakamoto, Maki Takeuchi, Yoshiyuki Tat-  
suta, and Hikaru Uchida,  
Physical Review **D107**, 075032 (2023)  
[arXiv:arXiv:2211.04595 [hep-th]]

Full higher-dimensional analysis of moduli oscillation and radiation in expanding uni-  
verse:  
Hajime Otsuka, and Yutaka Sakamura,  
Journal of High Energy Physics **05** (2023), 231  
[arXiv:arXiv:2212.14314 [hep-th]]

Remark on modular weights in low-energy effective field theory from type II string  
theory:

Shota Kikuchi, Tatsuo Kobayashi, Kaito Nasu, Hajime Otsuka, Shohei Takada, and Hikaru Uchida,

Journal of High Energy Physics **04** (2023), 003

[arXiv:arXiv:2301.10356 [hep-th]]

Moduli inflation from modular flavor symmetries:

Yoshihiko Abe, Tetsutaro Higaki, Fumiya Kaneko, Tatsuo Kobayashi, and Hajime Otsuka,

Journal of High Energy Physics **06** (2023), 187

[arXiv:2303.02947 [hep-ph]]

Bhabha Scattering in the Gauge-Higgs Unification:

Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, and Naoki Yamatsu,

Physical Review **D106**, 015010 (2022)

[arXiv:2203.16030 [hep-ph]]

Inelastic Dark Matter from Dark Higgs Boson Decays at FASER:

Jinmian Li, Takaaki Nomura and Takashi Shimomura,

Journal of High Energy Physics **09** (2022), 140

[arXiv:2112.12432 [hep-ph]]

Revisiting sterile neutrino dark matter in gauged U(1)B-L model:

Shintaro Eijima, Osamu Seto and Takashi Shimomura,

Physical Review D **106**, 103513 (2022)

[arXiv:2207.01775 [hep-ph]]

Search for lepton flavor violating decays at FASER:

Takeshi Araki, Kento Asai, Hidetoshi Otono, Takashi Shimomura and Yosuke Takubo,

Journal of High Energy Physics **01** (2023), 145

[arXiv:2210.12730 [hep-ph]]

⟨⟨Proceedings⟩⟩

Phase structure and critical point in heavy-quark QCD at finite temperature:

Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki,  
and Naoki Wakabayashi,  
PoS LATTICE2022 (2023), 177, [arXiv:2211.08631 [hep-lat]]

《 その他の論文 》

Topology of  $SU(N)$  lattice gauge theories coupled with  $\mathbb{Z}_N$  2-form gauge fields:  
Motokazu Abe, Okuto Morikawa, Soma Onoda, Hiroshi Suzuki, and Yuya Tanizaki,  
[arXiv:2303.10977 [hep-lat]]

Multi muon/anti-muon signals via productions of gauge and scalar bosons in a  $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$   
model at muonic colliders:  
Arindam Das, Takaaki Nomura and Takashi Shimomura,  
[arXiv:2212.11674 [hep-ph]]

Neutrinophilic DM annihilation in a model with  $U(1)_{L_\mu-L_\tau} \times U(1)_H$  gauge symmetry:  
Keiko I. Nagao, Takaaki Nomura, Hiroshi Okada and Takashi Shimomura,  
[arXiv:2212.14528 [hep-ph]]

**著書**

なし

**講演**

《 海外での講演 》

Gradient flow exact renormalization group:  
Hiroshi Suzuki,  
invited talk at the international workshop, The Gradient Flow in QCD and other  
Strongly Coupled Field Theories、2023年3月21日、ECT\*、Trento、Italy、オンライ  
ン

The origin of pseudo-Nambu-Goldstone-Boson Dark Matter:  
Koji Tsumura,  
invited talk at the international workshop, 2022 NTU-Kyoto high energy physics work-

shop/Kawai Fest、2022年12月17-20日、National Taiwan University, Taipei, Taiwan

Modular flavor symmetry in the string EFT:

Hajime Otsuka,

invited talk at the international workshop, Recent development of modular flavor symmetry、2022年11月25日、APCTP、Pohang、Korea、オンライン

Modular flavor symmetry in the string EFT:

Hajime Otsuka,

invited talk at the international workshop, Bethe Forum "Modular Flavor Symmetries"、2022年5月5日、Bonn University、Bonn、Germany

Hidden structures in the landscape of string compactifications:

Hajime Otsuka,

invited talk at the Bologna University, seminar in the physics and astronomy group、2022年4月26日、Bologna University、Bologna、Italy

Type-II seesaw models with modular  $A_4$  symmetry:

Takashi Shimomura,

invited talk at the international workshop, Recent development of modular flavor symmetry、2023年3月14-15日、APCTP、Pohang、Korea、オンライン

Matter parities from Finite Modular Symmetries:

Satsuki Nishimura,

poster presentation, The 17th Kavli Asian Winter School, 2023年1月9-18日、Institute for Basic Science、Daejeon、Korea

Fractional topological charge in lattice abelian gauge theory:

Motokazu Abe,

poster presentation, The 17th Kavli Asian Winter School, 2023年1月9-18日、Institute for Basic Science、Daejeon、Korea

《国内での講演》

グラディエントフロー厳密くりこみ群

鈴木博

基研研究会・iTHEMS 研究会「格子上の場の理論と連続空間上の場の理論」招待講演、  
2022年7月19日、京都大学基礎物理学研究所

グラディエントフロー厳密くりこみ群

鈴木博

日本大学工学部素粒子論研究室コロキウム、2022年10月14日、日本大学（オンライン）

グラディエントフロー厳密くりこみ群

鈴木博

Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023、2023年02月20日、サン  
プラザ天文館

New View of Particle Physics from Neutrinos and Phenomena Beyond the Standard  
Model:

Koji Tsumura,

International Conference on the Physics of the Two Infinities、2023年3月27-30日、  
Kyoto University, Kyoto, Japan

Generalized Higgs effective field theory and its applications:

Koji Tsumura,

invited talk at the international workshop, The 5th KMI International Symposium on  
“Quest for the Origin of Particles and the Universe”、2023年2月20-21日、Nagoya  
University, Nagoya, Japan

The origin of pseudo-Nambu-Goldstone-Boson Dark Matter:

Koji Tsumura,

invited talk at the international workshop, KEK Theory Meeting on Particle Physics  
Phenomenology (KEK-PH2022) and International Joint Workshop on the Standard  
Model and beyond、2022年11月29日-12月2日、KEK, Tsukuba, Japan

粒子数非保存の模型

津村浩二

原子核によるバリオン数・レプトン数の物理、招待講演、2023年3月9-10日、大阪大

学 核物理研究センター

暗黒 SU(2) にもとづく擬南部ゴールドストーン暗黒物質模型

津村浩二

第 128 回日本物理学会九州支部例会、2022 年 12 月 3 日、熊本大学

擬南部ゴールドストーン暗黒物質と暗黒 SU(2)

津村浩二

瀬戸内サマーインスティテュート 2022、2022 年 9 月 26-28 日、広島大学 東広島キャンパス

ヒッグス物理の理解はどこまで進んだか？

津村浩二

日本物理学会 2022 年 秋季大会 素粒子論-素粒子実験領域合同、招待講演、2022 年 9 月 6-8 日、岡山理科大学

ヒッグス物理の深化

津村浩二

次世代エネルギーフロンティア実験の検討会、招待講演、2022 年 8 月 18-20 日、レク トーレ湯河原

The origin of pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter

津村浩二

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

ヒッグス粒子発見後の 10 年と今後の展望

津村浩二

日本大学理工学部素粒子論研究室コロキウム、2022 年 12 月 9 日、日本大学（オンライン）

Baryon and Lepton number nonconservation as Peccei-Quinn mechanism

Koji Tsumura

Osaka University High Energy Theory Semiar、2022 年 12 月 6 日、大阪大学 豊中キャンパス

Sharpening the Boundaries Between Flux Landscape and Swampland by Tadpole Charge

大塚啓

場の理論と弦理論 2022、2022年8月21日、京都大学基礎物理学研究所

モジュラー対称性に基づくフレーバー模型のランドスケープによる補正:

大塚啓

日本物理学会 2022年 秋季大会、2022年9月6日、岡山理科大学

2020年代のワタスケールへの挑戦 FF5E 弦理論から迫るフレーバーと CP の物理 FF5E:

大塚啓

日本物理学会 2022年 秋季大会 シンポジウム、招待講演、2022年9月10日、岡山理科大学（オンライン）

Generalized Matter Parities from Finite Modular Symmetries:

Hajime Otsuka,

poster presentation at the international workshop, Summer Institute 2022、2022年9月18日-9月22日、Fuji-Yoshida, Yamanashi, Japan

Modular symmetry in the SMEFT:

大塚啓

早稲田大学中里・安倍研究室セミナー、2022年11月15日、早稲田大学

Modular symmetry in the SMEFT:

Hajime Otsuka,

parallel talk at the international workshop, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2022) and International Joint Workshop on the Standard Model and beyond、2022年11月29日-12月2日、KEK, Tsukuba, Japan

高次元理論におけるモジュライ安定化機構と時空の発展:

大塚啓

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学

Hierarchical structure of physical Yukawa couplings from matter field Kähler metric:

Hajime Otsuka,

parallel talk at the international workshop, KEK Theory Workshop 2022 (KEK-TH2022)、  
2022年12月9日、KEK, Tsukuba, Japan、オンライン

機械学習を用いた弦理論の真空構造解明:

大塚啓

数理・データサイエンスに関する教育・研究支援プログラム研究成果発表会、2023年  
1月5日、九州大学

Modular symmetry in the string EFT:

大塚啓

Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023、2023年2月19-22日、サ  
ンプラザ天文館

Modular flavor symmetries and CP from the string theory:

大塚啓

Theoretical Particle and Hadron Physics Group, Hiroshima University セミナー、2023  
年3月9日、広島大学

Discrete symmetries in Type IIB MSSM flux vacua:

大塚啓

日本物理学会 2023年春季大会、2023年3月25日、オンライン

Geometric Interpretation of Nonlinear Sigma Models and Extension to Systems with  
Fermions:

Yoshiki Uchida,

seminar in Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP)、2022年6月17日、オン  
ライン

Non-abelian pseudo Nambu-Goldstone dark matter:

Yoshiki Uchida,

34th Regular Meeting of the New Higgs Working Group、2022年8月19日、オンライ  
ン

拡張ヒッグス有効理論における磁気双極子モーメント:

内田祥紀

基研研究会 素粒子物理学の進展 2022、2022年8月29日-9月2日、オンライン

Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter from Non-Abelian Gauge Symmetry:

Yoshiki Uchida,

新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会、2022年11月1-3日、京都大学

Inelastic Dark Matter from Dark Higgs Decays at FASER:

Jinmian Li, 野村敬明, 下村崇,

日本物理学会 2022年 秋季大会、2022年9月6-8日、岡山理科大学

Search for lepton flavor violating decays of light bosons at FASER:

Takashi Shimomura,

2022年度新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会、  
2022年11月1-3日、京都大学、オンライン

Fermion iDM from Dark Higgs Decays at FASER:

Jinmian Li, 野村敬明, 下村崇,

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学 黒髪南キャンパス

Search for lepton flavor violation at FASER:

下村 崇,

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

Search for B-L gauge boson with sterile neutrino dark matter at FASER:

永島伸多郎, 瀬戸治, 下村崇, 内田祥紀,

日本物理学会 2023年春大会、2023年3月22-25日、オンライン

Blown-Up Orbifold 上の高次演算子とモジュラー形式型の湯川結合:

西村 皐,

口頭発表, 原子核三者夏の学校 2022, 2023年8月6-9日、オンライン

Matter Parities from Finite Modular Symmetries:

西村 皐,

ポスター発表, 場の理論と弦理論 2022, 2022 年 8 月 19-23 日, オンライン

Blown-Up Orbifold 上の高次演算子とモジュラーフレーバー対称性:

西村 皐,

口頭発表, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6-8 日, 岡山理科大学

モジュラー対称性から定まる超対称性理論への制限:

西村 皐,

口頭発表, 瀬戸内サマーインスティテュート 2022, 2022 年 9 月 26-28 日, 広島大学

Matter Parities from Finite Modular Symmetries:

西村 皐,

ポスター発表, 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会, 2022 年 11 月 1-3 日, 京都大学

Matter Parities from Finite Modular Symmetries:

Satsuki Nishimura,

oral presentation, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2022), 2022 年 11 月 29-12 月 2 日, KEK

Matter Parities in Double Coverings of Certain Modular Symmetries:

西村 皐,

口頭発表, 第 128 回日本物理学会九州支部例会, 2022 年 12 月 3 日, 熊本大学

Machine Learning Exploration of Quark and Lepton Flavor Structures:

西村 皐,

口頭発表, Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023, 2023 年 2 月 19-22 日, サンプラザ天文館

Machine Learning Exploration of Flavor Structures in Froggatt-Nielsen models:

Satsuki Nishimura,

poster presentation, ML at HEP workshop in JAPAN, 2023 年 2 月 23-24 日, KEK

機械学習で探る Froggatt-Nielsen 模型のフレーバー構造:

西村 皐,

ポスター発表, 計算物理春の学校 2023, 2023 年 3 月 13-15 日, 沖縄県市町村自治会館

機械学習で探るクォーク・レプトンのフレーバー構造:

西村 皐,

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

フレーバー対称性により抑制される暗黒物質の直接検出:

宮尾 光,

原子核三者夏の学校 2022, 2023 年 8 月 6-9 日, オンライン

Scalar Dark Matter with a  $\mu\tau$  Flavored Mediator:

宮尾 光,

新ヒッグス勉強会 第 34 回定例会, 2023 年 8 月 19 日, オンライン

フレーバー対称性により抑制される暗黒物質の直接検出:

宮尾 光,

日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6-8 日, 岡山理科大学

フレーバー対称性により抑制される暗黒物質の直接検出:

宮尾 光,

瀬戸内サマーインスティテュート 2022, 2022 年 9 月 26-28 日, 広島大学 東広島キャンパス

Scalar dark matter with a  $\mu\tau$  flavored mediator:

宮尾 光,

ポスター発表, 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会, 2022 年 11 月 1-3 日, 京都大学

フレーバー構造により抑制される暗黒物質の直接検出:

宮尾 光,

Flavor Physics workshop 2022, 2022 年 11 月 7-10 日, ニュー八景園

Scalar dark matter with a  $\mu\tau$  flavored mediator:

Coh Miyao,

parallel talk at the international workshop, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2022) and International Joint Workshop on the Standard Model and beyond, 2022年11月29日-12月2日, KEK, Tsukuba, Japan

フレーバー構造で探る暗黒物質:

宮尾 光,

第128回日本物理学会九州支部例会, 2022年12月3日, 熊本大学 黒髪南キャンパス

フレーバー構造で探る暗黒物質:

宮尾 光,

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

格子ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の定式化:

阿部元一,

原子核三者夏の学校 2022, 2023年8月6-9日, オンライン

格子ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の定式化:

阿部元一,

日本物理学会 2022年秋季大会, 2022年9月6-8日, 岡山理科大学

格子ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の定式化:

阿部元一,

瀬戸内サマーインスティテュート 2022, 2022年9月26-28日, 広島大学 東広島キャンパス

格子  $U(1)$  ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の定式化:

阿部元一,

第128回日本物理学会九州支部例会, 2022年12月3日, 熊本大学 黒髪南キャンパス

Fractional Topological Charge in Lattice Abelian Gauge Theory:

Motokazu Abe,

parallel talk at the international workshop, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2022) and International Joint Workshop on the Standard Model and beyond, 2022年11月29日-12月2日, KEK, Tsukuba, Japan

Fractional Topological Charge in Lattice Abelian Gauge Theory:

Motokazu Abe,

seminar in Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), 2022 年 12 月 16 日, 京都大学基礎科学研究所

格子ゲージ理論における 分数トポロジカル電荷の定式化:

阿部元一,

seminar in 京都大学素粒子論研究室, 2022 年 12 月 21 日, 京都大学素粒子論研究室

Fractional topological charge in lattice Abelian gauge theory:

阿部元一,

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

GFERG におけるカイラルアノマリー:

宮川侑樹,

基研研究会・iTHEMS 研究会「格子上の場の理論と連続空間上の場の理論」2022 年 7 月 19-22 日、京都大学基礎物理学研究所

GFERG におけるスケーリングオペレーターとカイラルアノマリー:

宮川侑樹,

日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6-8 日, 岡山理科大学

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 B (一般)

有限温度 QCD における物理量の決定へ向けて

研究代表者：鈴木博

科学研究費補助金、新学術領域研究 (計画研究)

標準理論を超えた新現象とニュートリノで探る新しい素粒子像

研究代表者：津村浩二

科学研究費補助金 新学術領域研究（総括班）  
ニュートリノで拓く素粒子と宇宙  
研究分担者：津村浩二（研究代表者：中家剛）

科学研究費補助金、基盤研究(C)  
拡張有効理論で迫るヒッグスセクターの新原理  
研究代表者：津村浩二

科学研究費補助金、若手研究  
オービフォルド特異点の解消とその現象論的応用  
研究代表者：大塚啓

科学研究費補助金、基盤研究(C)  
軽い新粒子が媒介する荷電レプトンフレーバーの破れとその起源  
研究代表者：下村崇

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》  
数理・データサイエンスに関する教育・研究支援プログラム  
九州大学数理・データサイエンス教育研究センター  
「機械学習を用いた弦理論の真空構造解明」  
研究代表者：大塚啓

**日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択(学外からの受け入れを含む)**

なし

**他大学での研究と教育**

鈴木博：2022年7月5日-6日、理研iTHEMSにおいて“Gradient flow exact renormalization group”として集中講義を行った。

山津直樹：2022年度前記(2022年4月8日-2022年7月31日)、九州産業大学において物理実験を担当した。

## 学部4年生卒業研究

石迫陸野：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：量子場の物理  
内山晴貴：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：量子場の物理  
木田浩樹：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：量子場の物理  
船越秀太：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：量子場の物理  
六田伊吹：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：量子場の物理  
綿井理久：(指導教員、鈴木博・津村浩二)：量子場の物理

## 修士論文

阿部元一：(指導教員、鈴木博)：格子ゲージ理論における分数トポロジカル電荷  
西村皐：(指導教員、大塚啓)：機械学習で探る素粒子のフレーバー構造  
宮尾光：(指導教員、津村浩二)：フレーバー構造で探る暗黒物質

## 博士論文

なし

## 外国人留学生の受け入れ

なし

## 学外での学会活動

鈴木博：

理化学研究所数理創造プログラム (iTHEMS) 客員研究員  
京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員  
令和3年度(2021年度)日本学術振興会特別研究員等審査会専門委員  
令和2(2020)年度科学研究費委員会審査第一部会第15小委員会II委員  
Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

津村浩二：

京都大学 基礎物理学研究所 共同利用委員会 委員  
日本物理学会 若手奨励賞選考委員 素粒子論領域  
素粒子論グループ 素粒子論委員会 委員長

## 受託研究・民間との共同研究

なし

## その他の活動と成果

阿部元一、森川億人（現大阪大学）、鈴木博：

“Fractional topological charge in lattice Abelian gauge theory,” PTEP **2023** (2023), 023B03 が、PTEP の Editors’ choice 論文に選ばれた。

鈴木博：

「有限温度量子色力学における物理量の第一原理計算」が、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) システム利用研究課題（九州大学情報基盤研究開発センター）に採択

# 理論核物理

## 研究室構成員

緒方 一介 教授

湊 太志 准教授

小川 翔也 (特定プロジェクト) 助教

《 大学院 博士課程 》

金 龍熙    李 東ウク    中田 響 (指導委託学生)

《 大学院 修士課程 》

北川 佑    松川 怜史

《 学部 卒業研究生 》

明石 賢昇    柴田 紀裕

## 担当授業

理論核物理学 (大学院講義, 緒方一介), 現代物理学基礎 (基幹教育科目, 化学科 2 年, 緒方一介), 電磁気学概論 (農学部 1 年, 緒方一介), 熱力学概論 (農学部 1 年, 緒方一介), 物理学特別講義 I (緒方一介), 物理学特別研究 I (緒方一介), 物理学特別研究 II (緒方一介), 物理学総合演習 (小川翔也), 物理学ゼミナール (小川翔也)

## 研究・教育目標と成果

### 重陽子ノックアウト反応を記述する新しい反応モデルの構築

(茶園亮樹 [RIKEN]、吉田数貴 [JAEA]、緒方一介)

原子核中に複数の陽子・中性子 (総称して核子) から構成される塊 (クラスター) が存在するかどうかは、核子多体系の存在形態を理解する上で本質的な問いである。特に近年注目されているのが、重陽子に代表される脆いクラスターの存在確認である。核内クラスターの実証に最適な手法の 1 つとして、原子核に高エネルギーの粒子を撃ち込み、その構成要素を叩き出す「ノックアウト反応」がある。しかしこのノックアウト反応を、重陽子のような脆いクラスターの観測に適用しようとする、叩き出される過程でクラスターが破碎する可能性を考慮に入れなければならない。そこで本研究では、ノックアウト反応を記述する標準的手法である歪曲波インパルス近似 (DWIA) に、弱束縛系の分解反応を精確に描述する連続状態離散化チャンネル結合法 (CDCC) を

組み込んだ新しい模型 CDCCIA を構築した。本研究は理化学研究所の茶園氏を中心に進められ、その成果は学術誌 Physical Review C に掲載された。

### ノックアウト反応を利用した不安定核の一粒子構造の研究

(Z. Elekes [ハンガリー科学アカデミー原子核研究所]、吉田数貴 [JAEA]、緒方一介ほか)

原子核の基本的な捉え方として、構成核子が原子中の電子のように一粒子軌道を“運動”するという、いわゆる独立粒子描像がある。その帰結として、希ガス原子と同様に、核子数が特定の値をもつとき、原子核は著しく安定化する。その特別な数を魔法数とよぶ。永らく普遍的であると考えられてきた魔法数であるが、近年、陽子数と中性子数のバランスが崩れた不安定核では変化することが確かめられ、大きな話題となっている。原子核の魔法数を解明する手段として、核子ノックアウト反応があり、理化学研究所の実験施設 RI ビームファクトリー (RIBF) で精力的な測定がなされている。本研究では、中性子過剰なバナジウム原子核の一粒子構造をノックアウト反応実験によって明らかにした。分析の結果、16 重極変形の効果が大きく、バナジウム 61 は魔法数の変化は起きていないことがわかった。本研究はハンガリー科学アカデミー原子核研究所の Elekes 氏を中心に進められ、その成果は学術誌 Physical Review C に掲載された。

### ノックアウト反応を利用した不安定核の一粒子半径の研究

(M. Enciu [ダルムシュタット工科大学]、吉田数貴 [JAEA]、緒方一介ほか)

本研究では、中性子過剰なカルシウム同位体 ( $^{52}\text{Ca}$ ) の一粒子構造を核子ノックアウトによって明らかにした。特に、ノックアウト後の残留核の運動量分布を正確に分析することにより、一粒子軌道にいる中性子の軌道半径が決定できることをはじめて示した。本研究はダルムシュタット工科大学の Enciu 氏によって主導され、その成果は学術誌 Physical Review Letters に掲載された。

### 低エネルギーノックアウト反応の高次過程についての研究

(T. Pohl [ダルムシュタット工科大学]、吉田数貴 [JAEA]、緒方一介ほか)

原子核の一粒子構造を解明する手段として活用されているノックアウト反応であるが、入射エネルギーが十分高くない場合、通常想定される撃力的な反応 (叩き出される粒子以外が擾乱されない反応) が実現しない可能性がある。本研究では、核子あたり 100MeV 程度の入射エネルギーでノックアウト反応を観測することにより、上記の単純なメカニズムを超えた高次過程の効果を明らかにした。詳細な分析の結果、陽子をノックアウトする場合は原子核の非弾性散乱が、中性子をノックアウトする場合は中性子移行反応がそれぞれ「高次反応」としてノックアウト反応データに寄与すること

が明らかになった。本研究はダルムシュタット工科大学の Pohl 氏によって主導され、その成果は学術誌 Physical Review Letters に掲載された。

### **$t \cdot {}^3\text{He}$ 分解効果の系統的解析**

(小川翔也、渡邊慎 [岐阜高専]、松本琢磨 [大阪大学 RCNP, 九州大学], 緒方一介)

近年、重陽子や  $t$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  $\alpha$  といった様々なクラスターが原子核の中に存在することが期待され、クラスターノックアウト反応によって精力的に研究されている。この反応を理論的に調べる際、クラスターの脆さ (分解効果) は重要な情報である。 $\alpha$  の分解効果は非常に小さく、弱束縛系である重陽子の分解効果は強いことがよく知られている一方で、 $t$ ,  ${}^3\text{He}$  の分解効果は不明瞭であった。そこで、本研究では  $t \cdot {}^3\text{He}$  を入射核とする分解反応を通して、それらの分解効果を明らかにした。観測量である分解断面積の系統的な分析の結果、 $t \cdot {}^3\text{He}$  の断面積の絶対値は、分解効果が強い重陽子の断面積の 1/3 倍程であることがわかった。これは今後行われる  $t \cdot {}^3\text{He}$  ノックアウト反応解析に向けた非常に重要な結果であり、その成果は論文としてまとめ、Physical Review C に投稿した。

### **カイラルダイクォーク模型によるヘビーバリオンの崩壊反応の研究**

(金龍熙 (D2)、岡真 [JAEA, RIKEN]、末永大輝 [RIKEN, 大阪大学 RCNP]、鈴木溪 [JAEA])

ハドロン物理学において、バリオンは 3 つのクォークで構成される複合粒子である。3 つのクォークのうち重いクォーク (チャーム・ボトム) を 1 つだけ含むシングルヘビーバリオンは、残り 2 つの軽いクォーク (アップ・ダウン・ストレンジ) を「ダイクォーク」という描像として顕著に持つと期待される。

本研究では、シングルヘビーバリオンの崩壊反応についてダイクォークの観点から研究する。スカラーダイクォークとベクトルダイクォークとの相互作用を表すカイラル有効模型を構築し、 $\pi$  中間子を放出するヘビーバリオンの崩壊反応に応用する。また、カイラル対称性の回復による崩壊幅の変化について解析を進める。

本研究のカイラル有効模型を用いると、カイラル対称性が保存されるほどヘビーバリオンの崩壊幅が少しだけ大きくなる。しかし、先行研究で与えられたダイクォーク質量とカイラル凝縮との関係性を付加すると、カイラル対称性が少し保存するだけでヘビーバリオンの崩壊は起こらなくなる。この成果は論文としてまとめ、Physical Review D に掲載された。

### **半古典歪曲波模型による包括的 ( $d, d'x$ ) 反応の記述**

(中田響 (D1, 指導委託学生), 吉田数貴 [JAEA], 緒方一介)

包括的 ( $d, nx$ ) 反応は、大強度の中性子ビームを生成する核反応として近年注目されている。しかし、この反応を記述する Glauber 模型は、特に低エネルギーにおいて、エネルギー・運動量保存を破る近似に基づくため、反応の運動学を正しく扱うことができない問題がある。

本研究では、研究の第一段階として、包括的 ( $p, p'x$ ) 反応の記述に最も成功している模型の1つである半古典歪曲波模型 (SCDW) を重陽子入射に拡張し、包括的 ( $d, d'x$ ) 反応を記述した。SCDW では、入射粒子と原子核の反応は、原子核によって歪められた入射粒子 (入射波) と核内核子の散乱の集積として表される。これによって、SCDW では歪曲の効果を取り入れ、核内における粒子の散乱の運動学を正確に扱うことができる。本研究によって、歪曲による運動学の変化が断面積に与える影響は、( $p, p'x$ ) 反応と比較して、( $d, d'x$ ) 反応で非常に顕著であることが明らかになった。この研究成果は、論文としてまとめられ、Physical Review C に Regular Article として受理された。

### 深層学習を用いた散乱閾値近傍の量子状態の分類

(北川佑 (M2), 池田陽一 [大阪大学 CiDER], 緒方一介)

エキゾチックハドロンはチャンネル結合散乱の共鳴状態であるので、実験で確認されている候補について、その量子状態 (束縛状態、仮想状態、共鳴状態) が分かればエキゾチックハドロンがどうか判別する指標になる。そこで、ハドロンの量子状態 (束縛状態、仮想状態、共鳴状態) を深層学習を用いて分類するという研究を行った。学習の教師データは、波単チャンネルの散乱振幅を、有効レンジ展開で近似したものを用いて生成した。学習の結果、量子状態を分類するニューラルネットワークが完成し、陽子-中性子系の、それぞれの量子状態を高い精度で正しく判別することができた。このアプローチをチャンネル結合散乱に応用すれば、より効率的にエキゾチックハドロン探索を行える可能性がある。

### 小規模の集団における COVID-19 検査システムの有効性の検証

(松川怜史 (M1), 池田陽一 [大阪大学 CiDER], 緒方一介)

COVID-19 の流行が始まって以来、その収束を目的として感染の流行過程の予測や適切な検査方式等を検証する研究の重要性が高まり、これまで都市単位の大規模な集団を対象とした研究が重点的に行われてきた。しかし、オリンピックなどのスポーツイベント等を例として、ミクロな感染動態の理解を必要とする小集団における感染動態の予測を目的とした研究は少ない。

感染動態を予測する上で最も一般的に用いられる方法として SIR モデルがあり、これは感染流行過程を一定の精度で記述する。しかし、SIR モデルは平均場近似によって感染症の伝播におけるネットワークの性質を無視したモデルであるため、実際の感染

動態とはかけ離れた結果を示す可能性がある。

本研究では SIR モデルにネットワーク性を導入することで、より高い精度で感染動態を予測することを目的としている。また、その結果から適切な検査方法、検査頻度を検証することで、感染収束に向けた最適な検査方式を構築することを目指している。今年度は先行研究の結果を再現し、BA モデルと呼ばれるスケールフリーネットワークを感染症モデルに導入することを試みた。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

Importance of deuteron breakup in the deuteron knockout reaction:

Y. Chazono, K. Yoshida, and K. Ogata,

Physical Review C **106**, 064613 (2022).

Southwestern boundary of the N=40 island of inversion: first study of low-lying bound excited states in  $^{59}\text{V}$  and  $^{61}\text{V}$ :

Z. Elekes, *et al.*,

Physical Review C **106**, 064321 (2022).

Extended  $p_{3/2}$  Neutron Orbital and the N=32 Shell Closure in  $^{52}\text{Ca}$ :

M. Enciu, *et al.*,

Physical Review Letters **129**, 262501 (2022).

Multiple mechanisms in proton-induced nucleon removal at 100MeV/nucleon:

T. Pohl, *et al.*,

Physical Review Letters **130**, 172501 (2023).

Strong decays of singly heavy baryons from a chiral effective theory of diquarks:

Y. Kim, M. Oka, D. Suenaga, and K. Suzuki,

Physical Review D **107**, 074015 (2023).

### 《 その他の論文 》

## 著書

## 講演

### 《 海外での講演 》

Effect of deuteron breakup on the deuteron- $\Xi$  correlation function:

K. Ogata,

EXOTICO: EXOTIc atoms meet nuclear COLLisions for a new frontier precision era in low-energy strangeness nuclear physics, Oct. 17-21, 2022, ECT\*, Trento, Italy. (invited)

### 《 国内での講演 》

Description of deuteron-induced inclusive knockout reactions:

H. Nakada and K. Ogata,

Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022), Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), May. 5-17, 2022.

Study on the dineutron in the  $2_1^+$  resonance of  ${}^6\text{He}$ :

S. Ogawa and T. Matsumoto,

Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b), Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), May. 24, 2022.

多段階直接過程における空間的デコヒーレンス —半古典歪曲波模型が示唆するもの—:  
緒方一介

RCNP 研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」, 2022年7月8日-9日, 大阪大学  
核物理研究センター

分解反応を用いた  ${}^6\text{He}$  共鳴状態におけるダイニュートロンの解析:

小川翔也、松本琢磨

RCNP 研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」, 2022年7月8日-9日, 大阪大学  
核物理研究センター

重陽子入射による包括的粒子放出反応の記述:

中田響、緒方一介

RCNP 研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」, 2022年7月8日-9日, 大阪大学  
核物理研究センター

ノックアウト反応計算の落とし穴:

緒方一介

おのころプロジェクト戸隠夏合宿, 2022年7月29日-30日, JA長野県ビル

崩壊粒子の自由度から探るダイニュートロン:

小川翔也、松本琢磨

おのころプロジェクト戸隠夏合宿, 2022年7月29日-30日, JA長野県ビル

${}^3\text{He} \cdot t$  クラスターの研究に向けた  ${}^3\text{He} \cdot t$  分解効果の系統的解析:

小川翔也、緒方一介

日本物理学会秋季大会 (2022年), 2022年9月6日-8日, 岡山理科大学

ダイクォークの相互作用に基づくヘビーバリオンの崩壊反応:

金龍熙、岡真、鈴木溪、末永大輝

日本物理学会秋季大会 (2022年), 2022年9月6日-8日, 岡山理科大学

ノックアウト反応と核子相関:

緒方一介

RCNP 研究会「微視的系と巨視的系における核子対凝縮相」, 2022年9月26日-28日, 大阪大学核物理研究センター (招待講演)

ダイクォークのカイラル相互作用とヘビーバリオンの崩壊反応:

金龍熙、岡真、鈴木溪、末永大輝

SSI2022, 2022年9月26日, 広島大学

核反応現象の理解を目指して:

緒方一介

市村宗武先生追悼講演会「原子核物理の最前線」, 2022年10月9日, 学士会館 (招待講演)

Decay reactions of singly heavy baryons based on an interaction of diquarks:

金龍熙、岡真、鈴木溪、末永大輝

SNP School 2022, 2022年10月24日, 東北大学

ノックアウト反応で“見る”原子核の新しい構造:

緒方一介

新潟大学セミナー, 2022年12月15日

ダイニュートロンロックアウト反応解析に向けた反応モデルの構築:

小川翔也、茶園亮樹、吉田数貴、緒方一介

おのころプロジェクト ミニワークショップ, 2023年1月30日, 理化学研究所和光市キャンパス

非束縛クラスターの観測について:

緒方一介

第8回クラスター領域研究会, 2023年2月9日-11日, 大阪大学荒田記念館 (招待講演)

原子核反応における空間的デコヒーレンス:

緒方一介

KEK 素核研・物構研連携研究会, 2023年2月17日 (オンライン) (招待講演)

Some recent advances in direct reaction studies:

K. Ogata,

The International Symposium on Nuclear Spectroscopy for Extreme Quantum Systems (NUSPEQ2023), March 7-9, 2023. (invited)

半古典歪曲波モデルによる重陽子入射包括的非弾性散乱の記述:

中田響、吉田数貴、緒方一介

日本原子力学会 2023 春の年会, 2023年3月13日-15日, 東京大学駒場キャンパス

ダイニュートロンロックアウト反応の理論的研究:

小川翔也、茶園亮樹、吉田数貴、緒方一介

日本物理学会 2023 年春季大会, 2023年3月22日, online

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金, 特別推進研究 (2021 年度-2025 年度)

核物質内クラスター生成機構の総合的解明

研究代表者: 上坂友洋 [理研仁科センター]

研究分担者：緒方一介

科学研究費補助金, 新学術領域研究 公募研究 (2021 年度-2022 年度)

ノックアウト反応の正確な描述に基づく核内重陽子・ダイニュートロンクラスターの実証

研究代表者：緒方一介

科学研究費補助金, 基盤研究 (A) (2021 年度-2025 年度)

不安定核反応でさぐる高運動量の近接核子対の研究

研究代表者：中村隆司 [東工大]

研究分担者：緒方一介

科学研究費補助金, 基盤研究 (C) (2020 年度-2023 年度)

環境を包有する量子反応理論に基づく宇宙元素合成反応の描述

研究代表者：緒方一介

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

**日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)**

金 龍熙 (D2): 日本学術振興会特別研究員 DC1 (2021 年 4 月 - 2024 年 3 月)

**他大学での研究と教育**

緒方一介：集中講義「量子散乱理論への招待」, 2022 年 12 月 14 日～16 日, 新潟大学

緒方一介：大阪大学核物理研究センター特任教授 (クロスアポイントメント) として、当該研究所における研究と教育を担当した。

**学部 4 年生卒業研究**

(明石 賢昇, 緒方一介):

卒論テーマ：部分波のスピンの組み方について

(柴田 紀裕, 緒方一介):

卒論テーマ： ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{C}$  のハロー構造に関する研究

## 修士論文

北川佑: (指導教員 緒方一介, 共同研究者 池田陽一 [大阪大学 CiDER])  
深層学習を用いた散乱閾値近傍の量子状態の分類

## 博士論文

## 外国人留学生の受け入れ

## 学外での学会活動

緒方一介: 核理論委員

## 受託研究・民間との共同研究

## その他の活動と成果

九大原子核セミナー (5つ)

第 974 回 2022 年 7 月 6 日

講師: Margaux Forge (IPHC-Strasbourg)

演題: New results on decay spectroscopy of  $^{254}\text{No}$  with GABRIELA@SHELS

第 975 回 2022 年 10 月 11 日

講師: 吉田数貴 (日本原子力研究開発機構)

演題: ノックアウト反応で探るアルファクラスター構造

第 976 回 2023 年 1 月 24 日

講師: Gianluca Colò (Università degli Studi and INFN, Milano)

演題: A unified framework for nuclear single-particle states and collective vibrations

第 977 回 2023 年 1 月 24 日

講師: 吉田賢市 (京都大学)

演題: Shell effects in non-axial-shape excitations

第 978 回 2023 年 2 月 21 日

講師: 福井徳郎 (九州大学基幹教育院)

演題：核子多体系における 3 核子力の役割 — 殻構造の微視的起源に迫る —

# 宇宙物理理論

## 研究室構成員

山本一博 教授

菅野優美 准教授 南部保貞 (特プロ) 准教授

松村央 (特プロ) 助教 倉持結 (特プロ) 助教

《 大学院 博士課程 》

上田和茂 土肥明 (理研委託) 杉山祐紀 三木大輔

《 大学院 修士課程 》

七條友哉 西田到生 西村郁哉 銚之原恒平

《 学部 卒業研究生 》

谷将樹 柏木海翔 山崎優樹 谷口彰

## 担当授業

一般相対性理論 (山本一博), 電磁気学 II (山本一博), 量子力学 I・同演習 (山本一博), 九州大学で学ぶ宇宙科学と技術 A (山本一博) (1 コマ), 基幹物理学 II (菅野優美), 物理学基礎演習 (菅野優美), 宇宙物理学 (菅野優美), 物理学特別講義 I (最先端物理学) (菅野優美), 物理学入門 IIA (菅野優美), 物理学特別研究 I (山本一博, 菅野優美), 物理学特別研究 II (山本一博, 菅野優美), 量子力学 I・同演習 (松村央), 物理学特別講義 7 (倉持結)

## 研究・教育目標と成果

### 重力の量子性に関する研究 (山本一博)

重力は量子力学に従うのかという重力の量子性の問題は、重力の量子論の出発点となる基本的問題であるが、これまであまり研究の進んでいない問題である。近年量子情報理論や量子科学技術の進展によって、この基本的問題に関する研究が注目されている。特に、重力が量子もつれを作れるかどうか、重力が非局所的な量子相互作用かどうかの検証となることが指摘され、重力が作る量子もつれに着目した研究を推進している。これまで松村氏、杉山君、三木氏、七條氏とこの問題に関する研究を進めてきた。令和4年度は、これらに関する研究として、光学機械振動子 (オプトメカ) の理論模型の精密化や重力場の量子論と重力が作る量子もつれとの関係など多面的に研究を推進した。関連して、量子状態にある調和振動子や量子場の量子力学的性質 (非

実在性)を検証するレゲットガーク不等式の破れに関する研究を学生の谷氏との共同研究として進めた。重力の量子性の研究は、量子重力に関わる基礎物理と量子技術の融合研究という側面を持ち、また将来の検証実験では宇宙空間での検証実験が理想的である。そのため、重力の量子性を柱として、基礎科学、量子技術、宇宙利用が融合する学際研究領域の開拓を目指す将来研究構想を未来の学術振興構想として日本学術会議に提案した。

### **アルファ真空におけるグラビトンの非ガウス性 (菅野優美)**

アルファ真空におけるグラビトンの非ガウス性を調べた。宇宙における自然な真空であるバンチデイビスの場合には、CMBに影響を与えるグラビトンのスペクトラムは非ガウス性よりも大きくなる。しかし、アルファ真空の場合には、アルファ真空を特徴づけるパラメーターによって、スペクトラムよりも、非ガウス性の方が大きくなることを示した。これは、現在のCMB観測でスペクトラムに対するグラビトンの影響が小さくても、非ガウス性を観測すれば、そこにグラビトンの影響が大きく出ている可能性があることを意味する。今後は、実際のCMBデータを使って、今回の理論の予言が正しいかどうか調べることが課題である。

### **インフレーション中におけるグラビトン・フォトン転換 (菅野優美)**

インフレーションを経たグラビトンは、環境による影響が存在しない限り、今日までスクイーズ状態を維持すると考えられている。そこでインフレーション中におけるグラビトンが宇宙磁場と相互作用した場合に、グラビトンのスクイーズ状態に対する影響を調べた。インフレーション中における宇宙磁場は、急激に減衰することにより、グラビトンのスクイーズ状態に影響を与えないことが分かった。

### **非等方ウォームインフレーション (菅野優美)**

ウォームインフレーションは、宇宙の再加熱を自然に説明するモデルである。このモデルで、現在のCMB観測に矛盾しない非等方宇宙が実現するかどうか調べた。まずパワーロー非等方ウォームインフレーションの厳密解を発見することに成功した。その解を用いて非等方性が残るかどうかを調べた。インフラトン場から物質場に崩壊する速度が遅いと残ることが分かった。今後は、揺らぎの効果まで考えることが課題である。

### **インフレーション中におけるグラビトンの量子エンタングルメントに対する宇宙磁場の影響 (菅野優美)**

インフレーション中に宇宙磁場がインフラトンと結合するモデルを考えることによっ

て、宇宙磁場が急激に減衰しないモデルで、グラビトンのスクイーズ状態に与える影響を調べた。またグラビトンの量子エンタングルメントを具体的に計算し、グラビトンのスクイーズ状態が保持されることを示した。

#### **開放量子系理論と量子重力 (松村央)**

量子と重力の統一理論が未完のため、現在様々な理論が提案されている。その中には、ニュートンポテンシャルを素朴に量子化したモデルや、重力がデコヒーレンスを引き起こすモデルがある。これらの理論はシュレディンガー方程式に非ユニタリーな項を加えた開放量子系の方程式によって統一的に記述される。本研究では、開放量子系理論に基づき量子重力理論の提案を目指す。このとき弱重力近似において成立するポアンカレ対称性に着眼し、その対称性を尊重した開放量子系理論の構築方法をつくった。今後は、この構築方法を応用して具体的なモデルの提案を行っていく。

#### **非有界な保存量があるときの量子操作に対する制限の研究 (倉持結、田島裕康)**

エネルギーや運動量といった保存量がある場合に量子操作が受ける制限について様々な観点から研究がされている。先行研究においては系の有限次元性または保存量の有界性が仮定されていたが、物理的に興味がある保存量の多くは非有界であるためそのままではこれらの結果を適用することはできない。本研究ではこうしたギャップを埋めるため、無限次元・非有界な系における保存則が量子操作に与える原理的な制限について考察した。その結果保存量と非可換な射影測定が実装不可能であるという Wigner-Araki-Yanase 定理を非有界な保存量に対して一般化することに成功した。また、同様の no-go 定理をユニタリチャンネルの実装に対しても発見し、証明できた。これらの定性的な no-go 定理を近似的な実装に対する定量的な結果に一般化するのは今後の課題である。

#### **場の理論におけるロバートソン不等式によって保証された因果律と相補性 (杉山祐紀, 松村央, 山本一博)**

量子と重力の融合理論、量子重力理論を解明することは現代物理学の課題である。そのためには、量子系がつくる重力場が引き起こす量子現象を理論的に理解する必要がある。本研究では、重力場の量子現象や量子性を理解することを目標に、量子化された電磁場が引き起こす相互作用を量子情報論的に解析した。その結果、場の量子的な不確定性を表すロバートソン不等式から、場の相互作用によって伝搬できる量子情報量に関する不等式が得られた。これによって場の量子性と量子情報伝搬が結びつくことが明らかになった。今後はこの議論を重力場に拡張することで、重力場の量子性を量子情報の観点で特徴づけていく。

## 若い中性子星 SNR 1987A の検出可能性、2. X 線（スーパー）バーストの核物理不定性の影響 (土肥明)

超新星爆発によって誕生した単独中性子星は、ニュートリノの散逸により冷えていくが、その冷え方は内部構造と関係する。本年は、最も若いコンパクト天体である SNR 1987A の熱的進化モデルについて精力的に取り組んだ。近年の ALMA の観測より SN 1987A の中心天体が中性子星である可能性が示唆された。これが事実であれば SNR 1987A が 30 歳程度の最も若い中性子星ということになり、特に表面組成やクラスト超流動の大きさが強く制限されうる。現在の SNR 1987A はダストにより覆われているので中性子星の証拠である X 線放射が吸収されて見えないが、自由膨張するダストは希薄になっていくので将来的には X 線放射が見える可能性が高い。我々は、次世代の X 線天文衛星 Lynx によって 15 +  $\alpha$  年後に熱的 X 線が検出される可能性を指摘した。中性子星のキック速度が小さいほど X 線の吸収の影響が弱くなるため、より中性子星を検出しやすいこともわかった。この内容はもうすぐ受理される予定である。今後は、non thermal な放射 [3] も入れた中性子星の状態方程式の制限や、若い中性子星でのクラスト冷却の可能性 [1] などを、今回得た SNR 1987A の情報を元に調べていく予定である。また、中性子星が伴星をもつ場合に関してもその熱的進化 (X 線バースト) について調べた。具体的には、構築した X 線バーストコード (Dohi+2020,2021) を用いて、急激な  $\nu$  冷却過程が及ぼす光度曲線の変化について調べた。結果として、0%程度の再帰時間やピーク光度のずれが生じることが示された。この内容はアメリカ天文学会の記事 (AAS Nova) にもハイライトされた。その論文の中では長時間の X 線バーストであるスーパーバーストの影響についても部分的に調べているが、その後中性子星の内部構造だけでなくトリガーとなる炭素燃焼率の核子相互作用も consistent に考慮したスーパーバーストの影響についても調べている。

## 原始磁場と原始重力波が共存するインフレーション理論に関する研究 (上田和茂、菅野優美、早田次郎、中戸杏)

今年度は、指導教員の菅野准教授、神戸大学の早田次郎教授、中戸杏氏と共に、インフレーション期に原始磁場が存在する仮定の下、背景磁場による重力子・光子転換によって現れる重力子の量子状態への影響を考察した。特に、重力子のスクイーズ状態がどのように変化するかを、磁場が宇宙膨張によって急速に減衰する場合 (インフレーション期にスケールファクターの 2 乗で減衰する場合) と、ゆっくりと減衰する場合 (インフレーション期にスケールファクターの 1 乗で減衰する場合) について調査した。その結果、いずれの場合も重力子の量子状態は Horizon Exit の後に十分スクイーディングする (スクイーディングパラメーターが無限大に漸近する) ことが分かった。一方、光子の量子

状態は異なることが分かった。これは、背景磁場がインフレーション期にスケールファクターの2乗で減衰する場合、ゲージ場の運動方程式は結合項を除けば Minkowski 時空のものと一致するため、宇宙膨張の影響をほとんど受けなくなる一方、背景磁場がインフレーション期にスケールファクターの1乗で減衰する場合はゲージ場の運動方程式の結合項を除く部分は de Sitter 背景での運動方程式と一致し、光子にもスキューリングによる粒子生成が起きるためであると考えられる。さらに、重力子-光子転換で現れる重力子と光子の量子エンタングルメントの指標であるエンタングルメントエントロピーを評価した。その結果、背景磁場がインフレーション期にスケールファクターの2乗で減衰する場合はエンタングルメントエントロピーが微小な値に漸近する一方、背景磁場がインフレーション期にスケールファクターの1乗で減衰する場合は最大量子もつれ状態に漸近することが分かった。これは、重力子に対して光子が等量存在しなければ量子相関は最大にならない(背景磁場を介して相互作用をしても纏れのペアがいなければ纏れられない)ことを反映していると考えられる。

#### 巨視的物体の量子状態の実現と量子もつれ生成 (三木大輔、松本伸之、松村央、七條友哉、杉山祐紀、山本一博、山本直樹)

重力の量子性の検証へ向けた準備として、巨視的な物体の量子状態の実現と量子もつれ生成に関する研究に取り組んだ。重力が量子力学に従うならば、2つの物体間に量子もつれが生成可能であることが示されている。しかし、重力は非常に弱い相互作用であり、重力の量子的な効果を検証するためには巨視的な量子系を準備する必要がある。そこで、光と巨視的な鏡を結合させ、光を通した量子制御により、鏡の量子状態を実現する光学機械振動子系の理論的研究を進めている。出力光には鏡の位置に関する情報が含まれているため、出力光の測定により鏡の位置の揺らぎは小さくなり、スクイーズド状態となる。また、測定に基づくフィードバック制御や最適推定を行うことにより、環境系による熱的なデコヒーレンスの影響を抑えることで、純粋な量子状態に近い状態が実現できる。実験的には、7mg の鏡のスクイーズド状態が量子領域付近で実現されている。今年度は、2つの鏡と共振器を干渉計の両腕に用意し、巨視的な鏡間に生じる量子もつれの評価を行った。2つの純粋なスクイーズド状態を干渉させると量子もつれが生じるが、熱的な揺らぎの影響が大きくなると量子的なコヒーレンスが失われ、量子もつれは生成しない。実験の専門家の方と議論を重ね、将来的に実現可能なパラメータを用いて評価を行い、mg スケールの鏡間に量子もつれが生成可能であることを示した。これは重力の量子性の検証に向けて足掛かりとなる研究であり、今後は重力による量子もつれの検証に向けた研究を進めている。

#### キャビティ光と結合した懸架鏡の量子状態の理論的研究 (七條友哉、山本一博、松本信)

之, 松村央, 杉山祐紀, 三木大輔)

現代物理は大きく二つの理論によって発展してきた。その二つは、ミクロな物理を記述する量子力学とマクロな物理を記述する一般相対性理論である。これらの理論は実験結果と整合性のとれた優れた理論である。しかしながら、それぞれの実験的なスケールは大きく隔たっており、両理論の統合に向けた検証実験は実現されていない。そこで、重力が測定可能な物体の量子状態を実現することがまず必要である。本研究では、光共振器を用いてレーザー光と結合した懸架鏡の量子状態を、光の連続測定とウィーナーフィルターを用いた推定によるフィードバック制御の下で調べた。懸架鏡に有限の大きさを持たせて、重心の運動を表す振り子モードに加えて、鏡の回転を表す回転モードを含めた、より詳細なシステムを考える。そこで、重心の運動とまわりの回転を吊るされている弦の自由度で特徴づけるビームモデルを採用する。懸架鏡の状態は振り子モードと回転モードの2つがあり、それぞれのモードに対して雑音を除去するウィーナーフィルターを構築し、光を測定したという条件の下で実現される揺らぎの大きさを表す条件付き共分散行列を評価することにより、量子状態を予測した。その結果、量子状態を生成するためには、振り子モードだけでなく回転モードまで考慮した解析の重要性を示した。

## 発表論文

《原著論文》

Sugumi Kanno, Misao Sasaki,  
Graviton non-gaussianity in alpha-vacuum  
JHEP 08 (2022) 210

Sugumi Kanno, Jiro Soda, Kazushige Ueda,  
Conversion of squeezed graviton into photons during inflation  
Phys. Rev. D 106 (2022) 8, 083508

Sugumi Kanno, Ann Nakato, Jiro Soda, Kazushige Ueda  
Anisotropic warm inflation  
Phys. Rev. D 107 (2023) 6, 063524

Sugumi Kanno, Ann Nakato, Jiro Soda, Kazushige Ueda,

Impact of quantum entanglement induced by magnetic fields on primordial gravitational waves

Phys. Rev. D 107 (2023) 6, 063503

Akira Matsumura,

Reduced dynamics with Poincare symmetry in open quantum system

arXiv:2301.01451

Hiroyasu Tajima, Ryuji Takagi, Yui Kuramochi,

Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility, and quantum coherence in quantum processes, arXiv:2206.11086

Shinichiro Yamano, Takaya Matsuura, Yui Kuramochi, Toshihiko Sasaki, Masato Koashi, Finite-size security proof of binary-modulation continuous-variable quantum key distribution using only heterodyne measurement

arXiv:2208.11983

Yui Kuramochi, Hiroyasu Tajima,

Wigner-Araki-Yanase theorem for continuous and unbounded conserved observables

arXiv:2208.13494

Takaya Matsuura, Shinichiro Yamano, Yui Kuramochi, Toshihiko Sasaki, Masato Koashi, Refined finite-size analysis of binary-modulation continuous-variable quantum key distribution

arXiv:2301.03171

Yuuki Sugiyama, Akira Matsumura, Kazuhiro Yamamoto, Consistency between causality and complementarity guaranteed by the Robertson inequality in quantum field theory

Phys. Rev. D 106, (2022) 125002

Yuuki Sugiyama, Akira Matsumura, Kazuhiro Yamamoto,

Effects of photon field on entanglement generation in charged particles

Phys. Rev. D 106, (2022) 045009

Yuuki Sugiyama, Tomoya Shichijo, Nobuyuki Matsumoto, Akira Matsumura, Daisuke

Miki, and Kazuhiro Yamamoto,  
Effective description of a suspended mirror coupled to cavity light: Limitations of Q  
enhancement due to normal-mode splitting by an optical spring  
Phys. Rev. A 107, (2023) 033515

Daisuke Miki, Nobuyuki Matsumoto, Akira Matsumura, Tomoya Shichijo, Yuuki Sugiyama,  
Kazuhiro Yamamoto, and Naoki Yamamoto,  
Generating quantum entanglement between macroscopic objects with continuous mea-  
surement and feedback control  
Phys. Rev. A 107, (2023) 032410

Sugumi Kanno, Ann Nakato, Jiro Soda, Kazushige Ueda,  
A peak in the power spectrum of primordial gravitational waves induced by primordial  
magnetic fields  
JCAP05 (2023) 052

Issei Koga, Naritaka Oshita, Kazushige Ueda,  
dS4 universe emergent from Kerr-AdS5 spacetime: bubble nucleation catalyzed by a  
black hole  
JHEP (2023) 107

Tomoya Shichijo, Nobuyuki Matsumoto, Akira Matsumura, Daisuke Miki, Yuuki Sugiyama,  
Kazuhiro Yamamoto,  
Quantum state of a suspended mirror coupled to cavity light – Wiener filter analysis  
of the pendulum and rotational modes  
arXiv:2303.04511

H. Tajima, Y. Sekino, D. Inotani, A. Dohi, S. Nagataki, and T. Hayate,  
Non-Hermitian topological Fermi superfluid near the p-wave unitary limit  
Physical Review A 107, 033331(2023)

A. Dohi, N. Nishimura, H. Sotani, T. Noda, H.-L. Liu, S. Nagataki, and M.-a. Hashimoto,  
Y. Matsuo, T. Noda, and S. Nagataki,  
Impacts of the Direct Urca and Superfluidity inside a Neutron Star on Type I X-Ray  
Bursts and X-Ray Superbursts

The Astrophysical Journal 937, 124 (2022)

E. Greco et al. (A. Dohi is the 11th author of all 12 authors),  
Additional Evidence for a Pulsar Wind Nebula in the Heart of SN 1987A from Multi-  
epoch X-Ray Data and MHD Modeling  
The Astrophysical Journal 931, 132 (2022)

D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto,  
Non-Gaussian entanglement in gravitating masses: the role of cumulants  
Phys. Rev. D 105 026011 (2022)

Y. Kuramochi,  
Infinite dimensionality of the post-processing order of measurements on a general state  
space  
arXiv:2111.14129

Y. Nan, K. Yamamoto,  
Dark energy model with very large-scale inhomogeneity  
Phys. Rev. D 105 063518 (2022)

A Matsumura,  
Path-entangling evolution and quantum gravitational interaction, arXiv:2112.09369

K. Yamashita, Y. Nan, Y. Sugiyama, K. Yamamoto,  
Large-scale structure with superhorizon isocurvature dark energy  
Phys. Rev. D 105 083531 (2022)

S. Kanno, J. Soda,  
Squeezed quantum states of graviton and axion in the universe  
arXiv:2112.14496

I. Koga, N. Oshita, K. Ueda,  
Global study of the scalar quasi-normal modes of Kerr-AdS5 black holes: Stability,  
thermality, and horizon area quantization  
Phys.Rev.D 105 124044 (2022)

M. Hotta, Y. Nambu, Y. Sugiyama, K. Yamamoto, G. Yusa,  
Expanding Edges of Quantum Hall Systems in a Cosmology Language  
Phys. Rev. D 105, 105009 (2022)

Y. Sugiyama, A. Matsumura, K. Yamamoto,  
Effects of photon field on entanglement generation in charged particles  
Phys. RevD. 106 045009 (2022)

A. Dohi, H.-L. Liu, T. Noda, and M.-a. Hashimoto,  
Cooling of Isolated Neutron Stars with Pion Condensation: Possible Fast Cooling in a  
Low-Symmetry-Energy Mode  
International Journal of Modern Physics E 22500069 (202)

H. Sotani and A. Dohi,  
Gravitational wave asteroseismology on cooling neutron star, Physical Review D 105,  
023007 (2022)

A. Dohi, N. Nishimura, M.-a. Hashimoto, Y. Matsuo, T. Noda, and S. Nagataki,  
Effects of Nuclear Equation of State on Type-I X-ray Bursts: Interpretation of the  
X-ray Bursts from GS 1826 – 24  
Astrophysical Journal 923, 64 (21)

H.-L. Liu, Z.-G. Dai, G.-L. Lu, A. Dohi, G.-C. Yong, and M.-a. Hashimoto,  
Quiescent luminosities of transiently accreting neutron stars with neutrino heating due  
to charged pion decay  
Physical Review D 104, 123004 (202)

A. Dohi, R. Kase, R. Kimura, K. Yamamoto, and M.-a. Hashimoto,  
Neutron star cooling in modified gravity theories  
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2021, 093E01 (2021)

《その他の論文》  
会議収録

A. Dohi, N. Nishimura, M.-a. Hashimoto, Y. Matsuo, T. Noda, and S. Nagataki,  
Effects of Nuclear Equation of State on Type-I X- ray Bursts and Implication for  
Clocked Burster GS 1826 – 2, EPJ Web of Conferences 260, 05002 (2022)

## 著書

## 講演

《 海外での講演 》

Graviton non-gaussianity in alpha-vacuum,

Sugumi Kanno (招待講演)

9th Korea-Japan Workshop on Dark Energy, Yonei University (オンライン), KOREA  
November 18 (2022)

Graviton non-gaussianity in alpha-vacuum,

Sugumi Kanno

Testing Gravity 2023、SFU Harbour center, Vancouver, CANADA

January 21 (2023)

Proof of the Wigner-Araki-Yanase theorem for unbounded conserved observables, Yui  
Kuramochi, Hiroyasu Tajima

QIP2023, Ghent University, 2023 年 2 月 6 日

Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence  
for quantum processes,

Hiroyasu Tajima, Ryuji Takagi, Yui Kuramochi and Keiji Saito

QIP2023, Ghent University, 2023 年 2 月 7 日

Impact of Direct Urca Process on Heavy-Element Nucleosynthesis in X-ray Bursts

Akira Dohi and Nobuya Nishimura

Origin of Matter and Galaxy 16 (OMEG16), Institute of Physics, Vietnam Academy  
of Science and Technology, Hanoi, Vietnam, Oct 25-28, 2022 (poster)

Cooling of Isolated/Accreting Neutron Stars with Pion Condensation,

Akira Dohi

International Workshop on Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers (OECE2022), Online, July 19 (Pre-Workshop) and 20-22, 2022

《国内での講演》

重力の量子性の検証に向けた懸架型光学機械振動子の精密理論模型の構築,

山本 一博,

12月26日-12月28日、Extreme Universe 第二回領域会議、神戸コンベンションセンター (オンライン)

Generating quantum entanglement between macroscopic objects with continuous measurement and feedback control: Toward testing quantum nature of gravity,

Kazuhiro Yamamoto

11月7日-11月8日、QUP workshop: toward Project Q, KEK

Testing quantumness of gravity and modeling optomechanics with suspended mirror,

山本 一博

10月31日-11月1日、Extreme Universe, Kick-off meeting for publicly offered research, ONLINE

Leggett-Garg inequality for testing quantumness of gravity,

Kazuhiro Yamamoto

9月26-30日、YITP-ExU workshop "Quantum extreme universe from quantum information", 京都大学

Graviton non-gaussianity in alpha-vacuum,

Sugumi Kanno (招待講演)

Non-linear aspects of cosmological gravitational waves, 東京大学 Kavli-IPMU July 20 (2022)

原始揺らぎの量子性は観測できるか？,

菅野 優美 (招待講演)

Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023、サンプラザ天文館、鹿児島  
島 2023年2月21日

私たちの宇宙は量子揺らぎから始まったのか？、

菅野 優美（招待講演）

第5回名古屋大学素粒子宇宙コロキウム、名古屋大学 2023年3月31日

因果律と重力による量子もつれ、

松村央、

日本物理学会秋季大会、岡山理科大、2022年9月7日

Role of matter coherence in entanglement due to gravity,

Akira Matsumura

YITP workshop, Quantum Extreme Universe from Quantum information, Kyoto, Sep.  
9th, 2022

ヘテロダイナミクス測定のみを用いた2値変調連続量量子鍵配送プロトコルの有限長安全性  
証明

山野新一郎（東大）、松浦孝弥（MIT大）、倉持 結（九大）、佐々木寿彦・小芦雅  
斗（東大）

QIT47、慶應義塾大学、2022年12月9日

二値変調型連続量量子鍵配送方式の安全性証明の改善：

松浦孝弥（MIT大）・山野新一郎（東大）・倉持 結（九大）・佐々木寿彦・小芦雅斗  
（東大）

QIT47、慶應義塾大学、2022年12月9日

非有界な保存量に対する Wigner-Araki-Yanase の定理の証明について：

倉持 結（九大）・田島裕康（電通大）

QIT47、慶應義塾大学、2022年12月9日

Conversion of squeezed gravitons into photons during inflation：

上田和茂、菅野優美、早田次郎、中戸杏

JGRG 3、東京大学、2023年10月26日

原始磁場と原始重力波が共存するインフレーション理論について：

上田和茂、菅野優美、早田次郎、中戸杏

理論懇シンポジウム 2022、コラッセ福島、2023 年 12 月 23 日

Quantum uncertainty of gravitational field in superposed massive particles,

Yuuki Sugiyama, Akira Matsumura, Kazuhiro Yamamoto

The 1st young researcher's workshop of the Extreme Universe collaboration, 名古屋大学 東山キャンパス 多元数理棟, 2023/2/13-17

Quantum uncertainty of gravitational field in superposed massive particles,

Yuuki Sugiyama, Akira Matsumura, Kazuhiro Yamamoto,

量子情報と量子基礎論の諸側面, 東京大学武田先端知ビル 武田ホール, 2023/2/9-10

Consistency between causality and complementarity: From the viewpoint of Robertson inequalities,

Yuuki Sugiyama

QJM meetings、オンライン、11 月 25 日

Consistency between causality and complementarity guaranteed by Robertson inequality in quantum field theory:

Yuuki Sugiyama

JGRG31、東京大学、10 月 24 日-28 日

荷電粒子間の量子もつれ生成に対する光子場の影響:

杉山 祐紀

日本物理学会 2022 秋季大会、東京工業大学、9 月 12-15 日

場の量子論におけるロバートソンの不等式によって保証された因果律と相補性の無矛盾性:

杉山 祐紀

日本物理学会 2022 秋季大会、岡山理科大学、9 月 6-8 日

2つの荷電粒子と光子場の相互作用に関する研究：量子もつれ生成と光子場の非可換性について:

杉山 祐紀

大阪公立大学コロキウム、大阪公立大学、6月17日

因果律と相補性の無矛盾性：ロバートソンの不等式の観点から：

杉山 祐紀

QUP Theoretical Collaboration Meeting、オンライン、6月6日

マクロな量子系の量子もつれの生成：オプトメカの連続測定による量子制御：

三木大輔

日本物理学会 2022 秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日

Generating quantum entanglement between macroscopic objects with continuous measurement and feedback control :

Daisuke Miki,

JGRG31, University of Tokyo, 25 Oct. 2022

オプトメカの量子制御を通じたマクロな物体間の量子もつれ生成：

三木大輔

第 47 回量子情報技術研究会 (QIT47), 慶應大学 (オンライン), 2022 年 12 月 8 日

Generating quantum entanglement between macroscopic objects with continuous measurement :

三木大輔

QJM meeting, 広島大学 (オンライン), 2022 年 12 月 23 日

オプトメカの量子制御を通じた巨視的物体間の量子もつれ生成：

三木大輔

日本物理学会 2023 年度春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22 日

光学機械振動子系のビームモデルに基づいた定式化:

七條 友哉

第 52 回天文・天体物理若手夏の学校, オンライン, 2022 年 8 月 23 日

SN 1987A 内の中性子星からの熱放射検出の可能性：

土肥明、Emanuele Greco、長瀧重博、小野勝臣、Marco Miceil、Salvatore Orlando、Barbara Olmi

日本天文学会 2022 年春季大会、立教大学、2022 年 3 月

中性子星内部のニュートリノ冷却が X 線バーストの元素合成に及ぼす影響：

土肥明、西村信哉

日本天文学会 2022 年春季大会、立教大学、2022 年 3 月（口頭＋ポスター）

X 線スーパーバーストに対する炭素燃焼の核反応率の影響

土肥明、谷口億宇、西村信哉、祖谷元、木村真明

星の進化と爆発天体における核反応の物理、理研 RIBF、2023 年 2 月

Probing Neutron-Star Structure through Type-I X-ray Bursts,

土肥明

第 35 回理論懇シンポジウム、ゴラッセふくしま（D3 発表）、2022 年 12 月

超新星 1987A における推定中性子星の検出可能性について

土肥明高エネルギー宇宙物理学研究会 2022、広島大学、2022 年 11 月（ポスター）

Impact of Neutrino Cooling on Type-I X-ray Bursts、

土肥明、西村信哉、祖谷元、野田常雄、Helei Liu、長瀧重博、橋本正章

RCNP 研究会「低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星」、大阪大学（豊中キャンパス）とオンラインのハイブリッド、2022 年 8 月

Impact of Neutrino Cooling on Type-I X-ray Bursts、宇核連-RCNP 研究会「宇宙核物理の展開」

土肥明、西村信哉、祖谷元、野田常雄、Helei Liu、長瀧重博、橋本正章

大阪大学（豊中キャンパス）とオンラインのハイブリッド、2022 年 7 月

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、学術変革 A（公募研究）、

重力の量子性の検証に向けた懸架型光学機械振動子の精密理論模型の構築、

研究代表者：山本一博

科学研究費補助金、基盤 C(一般),  
アクションの量子性で迫る宇宙の起源と暗黒物質の正体,  
研究代表者：菅野優美

科学研究費補助金、基盤 B(一般),  
高周波重力波物理学の開拓  
研究代表者：早田 次郎、研究分担者：菅野 優美

科学研究費補助金、若手研究、  
重力による量子もつれで迫る重力の量子論、  
研究代表者：松村 央

科学研究費補助金、若手研究,  
混合または結合で閉じた量子測定および量子操作の数学的構造に関する研究  
研究代表者：倉持結

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

**日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)**

日本学術振興会特別研究員 DC2 (上田和茂)

日本学術振興会特別研究員 DC2 (土肥明)

日本学術振興会特別研究員 DC1 (三木大輔)

### **他大学での研究と教育**

講演タイトル：エンタングルメントを用いたグラビトンの間接検出

名前：菅野 優美

セミナー名：QJM ミーティング

会場：広島大学 (オンライン)

日時：4月11日(2022)

講演タイトル：Towards the detection of nonclassical primordial gravitational waves  
名前：Sugumi Kanno  
セミナー名：APC seminar  
会場：Universite Paris Cite, FRANCE  
日時：3月6日 (2023)

講演タイトル：Probing Neutron-Star Structure through Clocked X-ray Bursters,  
名前：Akira Dohi  
セミナー名：PSR Bi-Monthly Meeting,  
会場：(Online, invited)、Japan  
日時：Feb 4, 2023

講演タイトル：Neutron-Star Cooling Effects on Type-I X-ray Bursts,  
名前：Akira Dohi  
セミナー名：Special seminar series at the T.D. Lee  
会場：Institute (TDLI), Shanghai, China, (Online, invited)  
日時：January 11, 2023

講演タイトル：Impact of Fast Neutrino Cooling on Type-I X-ray Bursts  
名前：Akira Dohi  
セミナー名：The Theoretical Astrophysics Center (TAC) seminar  
会場：University of California at Berkeley (in Campbell Hall RM 131)  
日時：Berkeley, America, November 21, 2022

#### 学部4年生卒業研究

谷将樹：(指導教員、山本一博)：  
LG不等式を用いた場の量子性の検証

柏木海翔：(指導教員、山本一博、松村央)：  
量子開放系の記述ー量子力学的半群及び量子マスター方程式ー The theory of open quantum systems のレビュー

谷口 彰：(指導教員、菅野優美)：

重力波の円偏光によるアクシオン暗黒物質の探索

山崎 優樹：(指導教員、菅野優美)：

後期ゼミ Nonequilibrium Quantum Field Theory のまとめ

### 修士論文

七條友哉：(指導教員、山本一博)：

キャビティ光と結合した懸架鏡の量子状態の理論的研究-振り子モードと回転モードを用いたウィナーフィルター解析-

### 博士論文

土肥 明：(指導教員、山本一博)：

Neutron-Star Equation of State and Its Thermal Evolution (中性子星の状態方程式とその熱的進化)

上田 和茂：(指導教員、菅野優美)：

Inflationary scenarios with primordial magnetic fields and gravitational waves (原始磁場と原始重力波が共存するインフレーション理論)

### 外国人留学生の受け入れ

### 学外での学会活動

理研ワーキンググループ「GW-EOS」の世話人(土肥明)

[RIBF ULIC MiniWS039] 星の進化と爆発天体における核反応の物理の世話人 (<https://indico2.riken.jp>) (土肥明)

### 受託研究・民間との共同研究

## その他の活動と成果

2022年7月22日、プレスリリース、「重力の実在性の破れを検証する方法 量子重力への新しいアプローチ」:

南部保貞 博士(名古屋大学 准教授)、山本一博 博士(九州大学 教授)との共同研究

2022年5月17日、プレスリリース、「ビッグバン宇宙を実験室で再現できる理論を構築」:

堀田昌寛(東北大学 助教)、遊佐剛(東北大学 教授)、南部保貞 博士(名古屋大学 准教授)、山本一博 博士(九州大学 教授)との共同研究

# 粒子系理論物理学

## 研究室構成員

原田恒司 (基幹教育院) 教授

大河内豊 (基幹教育院) 准教授      小島健太郎 (基幹教育院) 准教授

中里健一郎 (基幹教育院) 准教授

田尾周一郎 (基幹教育院) 助教

《 大学院 博士課程 》

古賀一成      大久保勇利      Carolina Sayuri Takeda      尹強

塚原壮平

《 大学院 修士課程 》

榎本雄介      佐藤亮太

《 訪問研究者 》

福井徳朗 (基幹教育院)

## 担当授業

力学概論 A (大河内豊), 力学概論演習 (大河内豊), 電磁気学概論 (小島健太郎), 熱力学概論 (小島健太郎), 身の回りの物理学 A (原田恒司, 小島健太郎), 地球と宇宙の科学 (中里健一郎), 課題協学科目 (大河内豊, 小島健太郎, 中里健一郎), 基幹教育セミナー (原田恒司, 大河内豊, 小島健太郎, 中里健一郎, 田尾周一郎), 大学院基幹教育 テクニカルプレゼンテーション (大河内豊), 数理という道具を手に入れよう (原田恒司), 「わかる」と「わかりやすい」 – オリジナル教材を作って考える – (中里健一郎), はじめての研究 (中里健一郎, 田尾周一郎)

## 研究・教育目標と成果

**宇宙初期の 1 次相転移とバブルの運動** (原田恒司, 田尾周一郎, 尹強)

宇宙初期に起こる電弱相転移が、標準理論を超えた物理の影響で 1 次相転移であると仮定すると、宇宙バリオン数生成、ダークマターの生成などに大きな影響を及ぼす。我々は宇宙初期の相転移現象（フェルミオンがバブルの壁を通過する際のカイラリティの変化のメカニズム、スファレロンプロセスの温度依存性、最急降下法と Lefschetz thimbles による理解、相対論的流体としてのプラズマの記述とボルツマン方程式など）を批判

的・多角的に検討した。その結果、特に1次相転移によって生じる「偽真空」中の「真真空」の領域（バブル）がどのようなダイナミクスを持つかをより詳細に検討する必要があると感じた。現在は有限温度での有効作用をもとに、プラズマとスカラー場の矛盾のない取り扱いについての定式化について研究中である。

#### 真空間遷移における触媒効果による宇宙項問題の解決 (大河内豊, 塚原壮平)

近年、超弦理論における真空構造に対する見方が大きく変わってきている。これまでの試みから4次元ドジッター時空の構成が非常に困難であることが経験的にわかっている。その経験からある種の仮説が立てられ、それに基づいた宇宙像の構築が行われている。我々はDブレーンによって構築された弦理論特有の準安定状態の寿命をより精密に評価する試みを行った。特に量子力学系でよく調べられている3次や4次の多項式を持つ量子力学系に落とし込むことで、寿命の lower bound を見つけ出した。その結果とスワンプランド条件のひとつであるトランスプランキアン条件との比較を行い、準安定状態として許されるパラメータ領域を調べた。現在その結果と TCC 条件の整合性をより詳しく検証しているところである。

#### カルツァ・クラインバブルによる弦理論の真空崩壊の解析 (大河内豊, 塚原壮平, 佐藤亮太)

弦理論は高次元理論であるために特有の真空崩壊が起こりうる。そのひとつに、5次元方向の時空が消滅してしまうような特異な崩壊が起こりうるということがウィッテンによって示されている。この真空崩壊では、バウンス解が具体的に求められているので、より詳細な計算が可能となっている。こうした中、近年特異性をもつバウンス解による真空の崩壊が注目を浴びているが、その考えを弦理論特有の崩壊に応用し、解析を行っている。

#### トーフトフラックスを持つ6次元 $SU(n)$ ゲージ理論の定式化と4次元低エネルギー有効理論の導出 (小島健太郎, 榎本雄介)

余剰次元として  $T^2$  トーラスを持つ6次元時空上でリー代数  $su(N)$  に基づくゲージ理論を考えると、離散的なトーラス並進に伴う場のゲージ変換のルール、すなわち境界条件を導入できる。この境界条件は、一般に  $su(N)$  が生成する変換だが、任意に選べるわけではなく、トーラスの非自明なトポロジーを反映して、いくつかの整合性条件を満たさなければならない。リー代数  $su(N)$  に基づく純ヤン・ミルズ理論として定式化されたゲージ理論は、大域的構造を考慮すると、ゲージ群として  $SU(N)$  だけではなく、 $SU(N)/\mathbb{Z}_K$  ( $\mathbb{Z}_K \subset \mathbb{Z}_N$ ) が許される。このことを反映し、上記の整合性条件は  $SU(N)/\mathbb{Z}_K$  に対して満たされれば良い。この結果、 $SU(N)$  のもとでは整合性条件を破

るような境界条件を、整合的に理論に導入できる。このような境界条件をラベルする自由度は't Hooft flux と呼ばれる。我々は、物質場を考慮しつつ、非自明な't Hooft flux を持つ6次元ゲージ理論を考察した。まず、非自明な't Hooft flux と両立する物質場がどのような性質を持つかを議論した。さらに、具体例として、物質場を含む  $SU(2K)$  ゲージ理論が、非自明な't Hooft flux を持つ境界条件によって低エネルギーで  $SU(K)$  に破れる場合を詳しく調べ、4次元有効理論における質量スペクトルを明らかにした。

### 余剰次元ゲージ場を起源とする Early dark energy 模型の構築とハッブル定数の不一致問題の解決 (小島健太郎, 大久保勇利)

近年の天文学的・宇宙論的観測の進展により、複数の観測結果から得られる宇宙膨張の速度を記述するハッブル定数の値の間に、不一致が生じることが明らかになった。この不一致は、宇宙の進化の歴史を記述する標準的な宇宙モデルである  $\Lambda$ CDM モデルを超える物理の存在を示唆している。我々は、前年に引き続き、コンパクトな余剰次元空間に伴うゲージ場が与える Early dark energy がハッブル定数の不一致問題を解決する可能性を検討し、その解決が可能な模型を示した。また、得られた結果を論文として発表した。

### フラックス背景場中の6次元ゲージ理論のスペクトルとその現象論 (小島健太郎, 大久保勇利, Carolina Sayuri Takeda)

余剰次元として  $T^2$  を持つ6次元ゲージ理論では、余剰次元方向のゲージ場の背景場を通じて非自明なフラックスの存在を仮定することができる。フラックス背景場の下で得られる低エネルギー4次元有効理論は、カイラルなフェルミオンや軽いスカラーを有することから、素粒子の標準理論を超える理論の候補として注目されている。我々は、非可換ゲージ理論に基づく模型に注目し、運動方程式や場の境界条件と両立するフラックスおよびウィルソンラインの背景場を包括的に調べた。また、その結果に基づき、一般性のあるフラックスおよびウィルソンラインの背景場のもとで、4次元有効理論に生じる質量スペクトルを議論した。

### $T^2/Z_3$ オービフォールドを持つ6次元時空中の大統一理論における細谷機構 (小島健太郎)

コンパクトな余剰次元として  $T^2/Z_3$  オービフォールドを持つ、高次元時空中の大統一理論の性質を調べた。この模型では、diagonal embedding と呼ばれる境界条件を導入することで、ゲージ場の余剰次元方向の成分の自由度が真空期待値を持つ細谷機構を通じて、ヒッグススカラーの導入なしに、大統一対称性の自発的な破れが可能になる。本年度は、これまでの成果をもとに論文の作成を進めた。本研究は、竹永氏(熊本保健

科学大学) および山下氏 (愛知医科大学) と共同で進めている。

### **$T^2/Z_N$ オービフォルド余剰次元模型におけるゲージ同値な境界条件の分類 (小島健太郎)**

コンパクトな余剰次元として  $T^2/Z_N$  ( $N = 2, 3, 4, 6$ ) オービフォルドを仮定した高次元ゲージ理論に課される場の境界条件の性質を調べた。このようなゲージ理論では、ゲージ変換の自由度を用いて、場の境界条件を変化させることができる。これにより、境界条件に対して物理的に等価な同値類が定義される。我々は、 $SU(n)$  ゲージ理論の群の表現空間において境界条件を表す行列の一般形を考え、それらの同値類の中に必ず対角型な行列に対応する境界条件が存在するか否かを、詳細に検討した。その結果、 $T^2/Z_2$  および  $T^2/Z_3$  では、同値類の中に必ず対角型な行列で表される境界条件が存在することを示した。このことは、 $T^2/Z_2$  および  $T^2/Z_3$  では、対角行列で表される境界条件だけを考えても、一般性が失われないことを意味する。さらに、 $T^2/Z_4$  および  $T^2/Z_6$  では、一般に同値類を考えても対角化できない境界条件が存在することを示した。これは、 $N = 4, 6$  が素数ではないことと関係している。得られた結果は論文として発表した。本研究は、川村氏 (信州大学)、小平氏 (信州大学) および山下氏 (愛知医科大学) と共同で進めている。

### **超新星ニュートリノの理論計算 (中里健一郎)**

太陽より約 10 倍以上大きな質量を持つ恒星は、その進化の最期に超新星爆発を起こし、同時に大量のニュートリノを放出する。現在、この過程のシミュレーションに取り組み、超新星ニュートリノのスペクトルや時間変化 (光度曲線) の計算を進めている。特に原始中性子星冷却期に放出されるニュートリノが核物質状態方程式にどのように依存するかに焦点を当てて研究しており、本年度は飽和密度以下の領域で現れる非一様相の扱いに注目した。その結果、核統計平衡モデルを仮定すると密度汎関数モデルの場合と比べてニュートリノの平均エネルギーが下がることを見出した。なお、これは主として鈴木英之氏 (東京理科大)、住吉光介氏 (沼津高専) らとの共同研究である。

### **ニュートリノ観測から探る超新星爆発とコンパクト天体形成 (中里健一郎)**

大質量星の重力崩壊から放出されるニュートリノの観測によって、爆発メカニズムをはじめとする超新星内部の物理的プロセスや、その後に形成される中性子星あるいはブラックホールの性質に迫ることができると期待されている。そこで理論・実験双方の研究者が協力して、現実的な検出器を想定した超新星ニュートリノ観測の検出シミュレーションに取り組んでいる。特に本年度は核物質状態方程式の違いがスーパーカミオカンデにおけるニュートリノの観測量に与える影響の評価や、観測量からニュート

リノの総エネルギーと原始中性子星の質量・半径を探る手法の開発を行なった。なお、これは主として諏訪雄大氏（東大）、小汐由介氏（岡山大）らとの共同研究である。

#### **超新星背景ニュートリノのモデリングと検出予測 (中里健一郎)**

過去の超新星爆発によって宇宙に放出されたニュートリノは、現在の地球で背景放射として観測することができると考えられており、これを超新星背景ニュートリノと呼ぶ。超新星背景ニュートリノはまだ検出されていないが、近い将来、検出が期待されているため、その理論モデルの構築と検出予測に取り組んでいる。本年度は、宇宙論的シミュレーションによって得られた星形成率に基づき、核物質状態方程式の不定性や中性子星の質量分布、ブラックホールが形成される場合の寄与まで含めた理論モデルを構築し、Gd添加したスーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデにおける感度予測を行なった。その結果、検出の有無によってモデルの制限が可能であることがわかった。なお、これは主として芦田洋輔氏（ウイスコンシン大）との共同研究である。

#### **ニュートリノ検出器におけるニュートリノ原子核反応 (中里健一郎)**

ニュートリノ検出器では、主に陽子による吸収（逆ベータ崩壊）、電子との散乱、原子核との反応をとらえることによって、ニュートリノを検出する。なかでも原子核との反応断面積は原子核モデルにも依存するため不定性が大きい。現在、水チェレンコフ型検出器におけるニュートリノと酸素原子核との反応に注目して、殻模型に基づく反応断面積や事象数の評価を進めている。特に本年度は、中性カレント反応による励起状態  $^{16}\text{O}(12.97 \text{ MeV}, 2^-)$  へのチャンネルを検討し、付随して放出される 4.4 MeV ガンマ線の事象数を評価した。なお、これは主として作田誠氏（岡山大）、鈴木俊夫氏（日大）らとの共同研究である。

#### **Kerr-AdS<sub>5</sub> 時空から生成される dS<sub>4</sub> 宇宙：ブラックホールによるバブル生成の触媒効果 (古賀一成)**

5次元の反ドシッター背景時空（AdS<sub>5</sub>）内のバブル上に4次元のドシッター宇宙（dS<sub>4</sub>）が生成される可能性が考察されている。これは弦理論においてドシッター真空を構成することが難しいという事実に基づく提案である。このバブルは準安定な AdS<sub>5</sub> 時空上で生成されても、非摂動論的に不安定であることが知られている。我々はより一般的な状況である Kerr-AdS<sub>5</sub> 時空の場合のバブル生成のプロセスを研究した。我々はドジッター・スワンプランド予想と矛盾しない形で、生成されたバブル上で4次元ドジッター時空のような膨張が実現されることを示した。なおこの研究は下大翔誉氏（理化学研究所）と上田和茂氏（九州大学、神戸大学）との共同研究である。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

On representation matrices of boundary conditions in SU(n) gauge theories compactified on two-dimensional orbifolds:

Yoshiharu Kawamura, Eiji Kodaira, Kentaro Kojima and Toshifumi Yamashita,  
arXiv:2211.00877 [hep-th]

Early Dark Energy from a Higher-dimensional Gauge Theory:

Kentaro Kojima and Yuri Okubo,

Physical Review D, **106** (2022) 063540 (arXiv:2205.13777 [astro-ph.CO])

Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. II. Impact of the Nuclear Equation of State:

Ken'ichiro Nakazato, Fumi Nakanishi, Masayuki Harada, Yusuke Koshio, Yudai Suwa, Kohsuke Sumiyoshi, Akira Harada, Masamitsu Mori and Roger A. Wendell,  
The Astrophysical Journal, **925** (2022) 98

Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. III. Extraction of Mass and Radius of Neutron Stars from Synthetic Data:

Yudai Suwa, Akira Harada, Masayuki Harada, Yusuke Koshio, Masamitsu Mori, Fumi Nakanishi, Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi and Roger A. Wendell,  
The Astrophysical Journal, **934** (2022) 15

Exploring the Fate of Stellar Core Collapse with Supernova Relic Neutrinos:

Yosuke Ashida and Ken'ichiro Nakazato,

The Astrophysical Journal, **937** (2022) 30

Detection of the 4.4-MeV gamma rays from  $^{16}\text{O}(\nu, \nu')^{16}\text{O}(12.97 \text{ MeV}, 2^-)$  with a water-Cherenkov detector in the supernova neutrino bursts:

Makoto Sakuda, Toshio Suzuki, Mandeep S. Reen, Ken'ichiro Nakazato and Hideyuki Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2023** (2023) 013D02

Effects of nuclear matter and composition in core-collapse supernovae and long-term

proto-neutron star cooling:

Kohsuke Sumiyoshi, Shun Furusawa, Hiroki Nagakura, Akira Harada, Hajime Togashi,  
Ken'ichiro Nakazato and Hideyuki Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2023** (2023) 013E02

$dS_4$  universe emergent from Kerr-AdS<sub>5</sub> spacetime: bubble nucleation catalyzed by a  
black hole:

Issei Koga, Naritaka Oshita and Kazushige Ueda,

Journal of High Energy Physics, **2023** (2023) 107

高大連携事業 QFC-SP から見る「高大接続」と「大学の人材育成」:

副島雄児, 小島健太郎, 長沼祥太郎,

基幹教育紀要, 第9巻 (2023) pp. 69-82

ベテラン座談会から学んだこと:

小島健太郎,

物理教育, **70** (2022) 4, pp. 252-253

グループ・ワークを通して学生自身がオリジナル教材を作成する授業の開発と実践:

中里健一郎, 藤原なつみ, 三木洋一郎, 原田恒司,

基幹教育紀要, 第9巻 (2023) pp. 157-168

《その他の論文》

## 著書

## 講演

《海外での講演》

“Long term behavior of supernova neutrino light curves”

Ken'ichiro Nakazato,

Workshop on Neutrino Interaction Measurements for Supernova Neutrino Detection,  
Oak Ridge (hybrid), 2023年3月7日

《国内での講演》

「真空崩壊と重力解について」

大河内豊,

研究会「重力理論と弦理論の新基軸」, 大分県別府市 Alliance towerZ, 2022年4月1日

「高次元ゲージ理論に基づく大統一模型および宇宙論模型」

小島健太郎,

信州大学 第157回素粒子・宇宙物理学研究会 物質基礎科学セミナー, オンライン, 2022年7月26日

「2次元オービフォールド上のゲージ理論の境界条件に関する表現行列について」

川村嘉春, 小平英治, 小島健太郎, 山下敏史,

日本物理学会 2022年秋季大会, 岡山理科大学, 2022年9月7日

「入門レベルの物理学の反転授業におけるICTを活用した学習支援」

小島健太郎,

日本物理学会 第13回物理教育シンポジウム「物理教育をデジタル技術で進化させる～学習者の理解を深めるために～」, オンライン, 2023年3月19日

「超新星背景ニュートリノで探る大質量星の最期」

芦田洋輔, 中里健一郎,

日本天文学会 2022年秋季年会, 新潟大学, 2022年9月13日

「銀河の化学進化から予測される超新星背景ニュートリノのフラックス」

中里健一郎,

新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会, 九州大学, 2023年3月2日

「国立大学における先駆的なAO入試の実績が示すもの」

田尾周一郎,

大学教育リデザイン研究会, 岡山大学, 2022年7月22日

「協働学習を用いた数理モデル教育による学生の学び」

田尾周一郎, 舟橋京子,

2022年度日本物理教育学会年会 第38回物理教育研究大会, 長崎大学, 2022年8月11日

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)

反転・相互作用型授業における熟達者型問題解決教材の開発と効果の検証

研究代表者：原田恒司

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)

真空間遷移における触媒効果による宇宙項問題の解決

研究代表者：大河内豊

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)

相互作用型授業における協調過程の多面的分析に基づく新たな教育手法の開発と評価

研究代表者：小島健太郎

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)

個々人の力学概念理解度の進展を捉える連鎖的コンピュータ適応型テストの開発

研究代表者：安田淳一郎, 研究分担者：小島健太郎

科学研究費補助金, 新学術領域研究 (計画班)

超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究

研究代表者：鈴木英之, 研究分担者：中里健一郎

科学研究費補助金, 基盤 C (一般)

大局的に描く中性子星形成過程の高密度核物質とニュートリノ放出の様相

研究代表者：中里健一郎

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

## 学部4年生卒業研究

### 修士論文

榎本雄介（指導教員：小島健太郎）：トーフトフラックスを持つ6次元SU(N)ゲージ理論の構築と4次元低エネルギー有効理論における質量スペクトル

### 博士論文

古賀一成（指導教員：原田恒司）：準固有振動と真空崩壊における触媒効果による Kerr-AdS<sub>5</sub> 時空の研究

### 外国人留学生の受け入れ

Carolina Sayuri Takeda, 尹強

### 学外での学会活動

原田恒司:

日本物理学会第77期代議員

大河内豊:

京都大学 基礎物理学研究所 共同利用運営委員

日本物理学会 若手奨励賞 審査委員

日本物理学会 素粒子論領域運営委員

小島健太郎:

日本物理教育学会 物理教育, 編集委員

日本物理教育学会九州支部, 理事

日本物理学会九州支部, 幹事

日本物理教育学会 第38回物理教育研究大会, 実行委員

田尾周一郎:

日本物理教育学会 第38回物理教育研究大会, 実行委員

### 受託研究・民間との共同研究

## その他の活動と成果

大河内豊:

研究会「重力理論と弦理論の新基軸」(大分県別府市 Alliance towerZ, 2022年3月30日~4月2日)において世話人を務めた

小島健太郎, 田尾周一郎:

令和4年度福岡県高校生知の創造力育成セミナー事業実施協議会委員を担当した

小島健太郎:

中村学園女子高等学校のWWL(ワールド・ワイド・ラーニング)コンソーシアム構築支援事業のカリキュラムアドバイザーを担当した

小島健太郎:

叡啓大学におけるFD講演会 "Promoting active learning: Peer instruction, Jigsaw method, and Flipped classroom" (2022年12月)において講師を担当した

中里健一郎:

新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会(2023年3月2日~3日,九州大学)において世話人を務めた

# 素粒子実験（準備中）

研究室構成員

担当授業

研究・教育目標と成果

発表論文

《原著論文》

《その他の論文》

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

《文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

修士論文

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

# 実験核物理

## 研究室構成員

若狭智嗣 教授      坂口聡志 教授  
寺西高 准教授      市川雄一 准教授  
西畑洸希 助教  
岩村龍典 技術職員

### 《 博士研究員 》

森田浩介（学術研究員・高等研究院教授）

### 《 大学院 修士課程 》

安藤蒼太      石橋優一      岸本侃己      小谷基樹  
篠原悠介      杉山晃一      松永壮太郎      村上郁斗  
山下涉      横田望海      荒殿和希      梶原孝文  
竹中京平      立川柊平      田中久登      能見幹都  
松浦開

### 《 学部 卒業研究生 》

田中祐典      谷本昂平      長尾陽平      深津巧  
松永琳太郎      松本泰知      道本優也      山ノ内邑希  
山本陽介

## 担当授業

力学基礎（若狭智嗣）、力学・同演習（若狭智嗣）、力学概論（寺西高）、電磁気学基礎（坂口聡志、市川雄一）、熱力学基礎（坂口聡志、市川雄一）、原子核物理学（若狭智嗣）、物理実験学（寺西高）、原子核・高エネルギー実験学（寺西高）、物理学特別講義 I（最先端物理学）（坂口聡志、寺西高、市川雄一）、物理学の進展 A（坂口聡志）、身の回りの物理学 B（坂口聡志、市川雄一）、基礎物理実験学・同実験 A（市川雄一）、基礎物理実験学・同実験 B（市川雄一）、物理学総合実験（坂口聡志、寺西高、市川雄一、西畑洸希）

## 研究・教育目標と成果

### 多線式ドリフトチェンバー導入による陽子偏極度計の性能向上（山下渉、西畑洗希、若狭智嗣）

我々のグループでは原子核内での核子-核子（NN）散乱に対応する  $(\vec{p}, p\vec{p})$  反応を用いて入射陽子と散乱陽子のスピン偏極を観測することで偏極移行量（散乱前後でのスピン反転確率に対応する量）を測定し、原子核中における NN 散乱振幅（核媒質効果）を実験的に決定することを目指している。

5項の複素振幅で表現される NN 散乱振幅の決定のためには9種の独立な観測量が必要である。我々は後方散乱陽子に対する偏極移行量  $K_{ij}$  に着目し、その測定のために、エネルギーが 100 MeV 以下となる後方散乱陽子の偏極度を測定する焦点面偏極度計として、2nd-FPP (Focal Plane Polarimeter) の開発を行なっている。2nd-FPP は 15 枚 6 層のシンチレータと 1 台の MWDC (Multi-Wire Drift Chamber) から構成される検出器であり、入射陽子がシンチレータ内の炭素と弾性散乱するイベントの左右非対称度から入射陽子の偏極度を導出できる。先行研究から効率的に偏極度を導出には位置分解能の向上が必要であることが分かっているので、散乱陽子の飛跡の再構成高精度化のために MWDC を新たに 4 台導入し、性能評価を行った。

MWDC の導入により、位置分解能は  $0.34 \pm 0.01$  mm が達成された。この値は導入前のシンチレータの情報から得られた  $26.6 \pm 0.6$  mm に比べて 2 桁近く小さく、位置分解能が大きく向上した。実際、これにより炭素と水素の弾性散乱を高精度で分離することに成功し、断面積は文献値とのよい一致が認められると共に、有効偏極分解能もシンチレータ最下流での散乱の影響が無視できる  $\theta = 60^\circ - 70^\circ$  において文献値と無矛盾な 0.53-0.55 の大きな値が確認された。

### ${}^3\text{H}(t, {}^3\text{He})3n$ 反応による 3 中性子共鳴状態探索のための中性子測定系の較正（横田望海、西畑洗希、若狭智嗣）

核力における三核子間力は、中性子過剰核の存在限界（中性子ドリップ線）や中性子星の状態方程式（半径と質量の関係）の理解に本質的な役割を果たすとして、近年実験・理論の双方から注目されている。我々は、アイソスピン  $T = 3/2$  三核子間力の情報を最もシンプルに探索できる系として、3 中性子系  $3n$  に着目し、トリチウム ( ${}^3\text{H}$  又は  $t$ ) を標的およびビームとした  ${}^3\text{H}(t, {}^3\text{He})3n$  反応により  $3n$  を生成・測定するプロジェクトを東北大学等と共同で推進している。九州大学グループは、 $3n$  共鳴状態からの崩壊中性子を測定する中性子測定系を担当しており、今回、中性子検出器の較正および同じ反応系  ${}^1\text{H}(t, {}^3\text{He})n$  を用いたビーム実験を行った。

まず、発光量較正には  $\gamma$  線源である  ${}^{22}\text{Na}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{241}\text{Am}$  を用いた。測定に用いた液体シンチレータは比較的大きいものであり、GEANT4 を用いたシミュレーションにより検出器内での多重散乱が示唆されたため、多重散乱を考慮した上での発光量較正を行っ

た。求めた較正直線により、得られたエネルギー分布を十分に再現した。次に、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) にて、 $3n$  系生成と同じ反応系である  ${}^1\text{H}(t, {}^3\text{He})n$  反応測定の実験を行った。この反応は 2 体反応であるので、反応後の  ${}^3\text{He}$  と  $n$  のエネルギーや角度の間に相関が期待される。実験結果では両者ともに運動学による計算と無矛盾な相関が確認された。以上から今回開発した中性子測定系は、 ${}^3\text{H}(t, {}^3\text{He})3n$  測定にも有効であると考えられる。

### スピン配向 RI ビームを用いた核モーメント測定によるエキゾチック核構造の研究 (篠原悠介、市川雄一)

安定線から遠く離れた不安定核では多くのエキゾチックな構造が報告されている。エキゾチックな核構造を発現させる原動力になっていると考えられるのが、核における殻進化および変形の競合である。これらの競合を微視的視点から明らかにする上で有用な観測量が核モーメントである。新たに開発したスピン配向 RI ビーム生成技術を駆使して、エキゾチック核の核モーメント測定を行う計画を進めている。

2022 年度に、理化学研究所において、 ${}^{99}\text{Zr}$  の核モーメント測定実験を行った。本実験においては、分散整合二回散乱法を用いて、1 次ビーム  ${}^{238}\text{U}$  から  ${}^{100}\text{Zr}$  を経由し、二次標的における一中性子抜き取り反応によって  ${}^{99}\text{Zr}$  ビームを生成した。電気四重極モーメント測定に先駆けて、まずは  ${}^{99}\text{Zr}$  を銅標的に停止させ、外部静磁場印加下での時間微分型摂動核分布 (TDPAD) 法によるスピン整列度の確認および磁気双極子モーメントの再測定を行った。この測定でおよそ 10% 程度のスピン整列生成を確認したため、電場勾配を持つジルコニウム単結晶をビーム停止試料として用いる電気四重極モーメントの測定を行った。この測定では電気四重極モーメントと標的中の電気勾配との相互作用により、核スピンの摂動が生じる。この摂動に伴うガンマ線の放出角度時間変化を Ge 検出器を用いて測定した。実験後はこれらの実験データの解析を進めている。

### 核スピン歳差周波数精密測定による基本対称性の研究 (安藤蒼太、市川雄一)

現在の物質優勢な宇宙の姿は、宇宙初期における CP 対称性の破れを伴った物質創成に由来すると考えられている。そして、素粒子の標準理論を超えた CP 対称性の破れを反映する観測量として電気双極子モーメント (EDM) が注目を集めている。本研究では、 ${}^{129}\text{Xe}$  原子とその異核種同位体である  ${}^{131}\text{Xe}$  原子の双方を EDM の測定対象かつ共存磁力計として用いる核スピンメーザーを開発し、これら Xe 原子の歳差周波数を精密に測定することで EDM の検出を目指している。

2021 年度に九州大学にて核スピンメーザーの装置を構築した。従来開発されてきたシステムに加え、新たに磁気光学効果によるレーザーの直線偏光面回転を用いた歳差運動観測法を導入し、 ${}^{129}\text{Xe}$ 、 ${}^{131}\text{Xe}$  の同時メーザー発振に成功した。周波数決定精度と

しては、 $^{129}\text{Xe}$  に対して 50 nHz、 $^{131}\text{Xe}$  に対して 14 nHz を得た。現状、共存磁力補正後の周波数安定性は 100,000 秒の測定時間において  $55\ \mu\text{Hz}$  となっている。今後、ポンピングおよびプローブレザーの安定化等、さらなる核スピンメーザーの安定化に向けた開発を進めていく予定である。

### スピン偏極した Mg のベータ崩壊を用いた中性子過剰 Al の励起状態の研究（西畑洗希）

中性子数 20 付近の中性子過剰原子核は、その基底状態で球形が予測されるにも関わらず軸対称に変形していることが実験的に示唆されてきたなど、特異な構造が実験的に示唆され注目を集めている。本研究では、その原子核領域に属する中性子過剰な Al 原子核の系統的な構造解明を目指している。中性子過剰 Al 原子核の系統的な研究の第一段階として、 $^{31}\text{Al}$  の構造解明実験を 2019 年 11 月にカナダの TRIUMF 研究所にて実施した。2021 年度から 2022 年度にかけて得られた実験の解析を行い、7 つの状態のスピンおよび 8 つの新たなエネルギー準位を含めた詳細な  $^{31}\text{Al}$  の準位構造を決定することができた。得られた結果について SDPF-M 相互作用を用いた大規模殻模型計算と比較を行った。その結果、4 MeV 程度までの状態において理論計算が実験を再現した。また、 $^{31}\text{Al}$  の励起状態において、i) sd 殻のみの配位で説明できる状態、ii) pf 殻へ励起した配位が支配的な状態、iii) i) および ii) の状態が半々で混合している状態、が共存していることが明らかとなった。

2023 年度には  $^{33}\text{Mg}$  のベータ崩壊を用いた  $^{33}\text{Al}$  の励起状態の構造解明実験を実施予定であり、そのための実験準備を行った。

### スピン偏極した Mg のベータ崩壊を用いた中性子過剰 Al の励起状態の研究（岸本侃己、西畑洗希）

中性子過剰な原子核においては中性子分離エネルギーが低くなり、励起状態を含めた中性子過剰核の詳細の理解には中性子非束縛状態の観測が重要となる。そのためには、中性子非束縛状態から放出される中性子のエネルギー、エネルギー幅、放出強度を精度よく測定する必要がある。本研究では、中性子過剰な  $N = 20$  付近の原子核のベータ崩壊の際に放出される中性子測定を目指し、0.1–5 MeV の広いエネルギー範囲の中性子を測定可能な中性子検出器の開発を行っている。本年度は、昨年度に重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて実施した、新型の中性子検出器の評価実験の解析を行った。解析の結果、中性子の飛行時間スペクトルにおいて、実験で生成した不安定核  $^{16}\text{C}$ ,  $^{17}\text{N}$ ,  $^{18}\text{N}$  から放出される中性子ピークを確認することができ、そのエネルギーは過去の文献値と誤差の範囲内で一致した。また、過去に報告されている中性子の放出強度を用いて、新型中性子検出器の検出効率を導出した。その結果、0.5 MeV 以下の低エ

エネルギーの中性子に関しても高効率で検出可能であることを示した。また、得られた検出効率および検出効率の閾値依存性を Ceil らが開発した計算コードと比較を行った。その結果、計算コードが実験データを再現することがわかった。本実験で性能評価および較正を行った中性子検出器は来年度に予定している  $^{33}\text{Al}$  の構造解明実験に導入予定である。

### 新元素の合成研究（坂口聡志、石橋優一、杉山晃一、松永壮太郎、能見幹都、松浦開、深津巧、道本優也、山ノ内邑希、森田浩介）

理研仁科センター、米国オークリッジ国立研究所及び国内外の諸機関と協力し、113番元素ニホニウムを超える、初の第8周期元素となる119番新元素の合成研究を進めている。超伝導線形加速器 SRILAC と新型の反跳分離装置 GARIS-III を組み合わせた最新の実験施設が稼働を開始し、高い効率をもって  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$  融合反応による実験を遂行している。九大グループは特に以下の項目で述べる通り「後方準弾性散乱測定による  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}/^{208}\text{Pb}$  系の融合障壁分布の測定」と最適なビームエネルギーの推定を主導した。また、教員・大学院生による実験参加や検出器準備、九大における実験データの解析、九大加速器ビーム応用科学センターにおける MCP 型飛行時間検出器の開発などを通じて貢献を果たしている。

### 後方準弾性散乱測定による $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}/^{208}\text{Pb}$ 系の融合障壁分布の研究（坂口聡志、森田浩介）

超重核の融合反応は二つの原子核同士が接触し一つの複合核を形成することによって起こる。超重核の生成断面積は入射エネルギーに極めて敏感であり、融合障壁近傍の値が最適と考えられている。融合障壁は核励起や核子移行反応などの効果により、有限の幅（障壁分布）を持つ。 $^{51}\text{V}$  という新たなビームを用いて119番新元素を合成するための最適な入射エネルギーを精度良く推定するには、実際に使用される反応系である  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$  系の融合障壁分布の測定が不可欠である。

本研究では、 $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$  系における後方角度  $180^\circ$  の準弾性散乱断面積をエネルギーの関数として測定し、その微分から障壁分布を導出した。実験においては、理化学研究所の超伝導理研重イオン線形加速器 SRILAC を用いて加速された  $^{51}\text{V}$  ビームを標的に照射し、 $0^\circ$  方向に反跳された標的様準弾性散乱粒子を気体充填型反跳分離装置 GARIS-III を用いて分離・識別し、焦点面の飛行時間検出器及びシリコン検出器により計数した。理論解析のためにチャンネル結合計算を行い、得られた融合障壁分布を議論した。弾性散乱チャンネルのみ考慮した計算に比べて、原子核が励起するチャンネルとの結合を考慮した計算の方が実験結果をより良く再現した。特に  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$  系では標的核  $^{248}\text{Cm}$  の回転励起が大きく寄与することがわかった。

本研究で得られた融合障壁分布の測定結果は、理化学研究所において国際共同研究として遂行中の 119 番新元素合成実験における最重要な実験条件である入射エネルギーの決定のために、本質的な情報を提供するものである。

本研究は理化学研究所の田中聖臣氏らとの共同研究として実施した。結果を投稿論文としてまとめ、田中・坂口の両名を責任著者とし Jour. Phys. Soc. Jpn 誌において発表した。

#### $^{51}\text{V}+^{159}\text{Tb}$ 反応による重イオン融合反応機構の研究 (深津巧、道本優也、山ノ内邑希、坂口聡志)

九州大学グループでは、「後方準弾性散乱測定による  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}/^{208}\text{Pb}$  系の融合障壁分布の研究」に記したように、重イオン核融合反応による新元素合成実験における最適な反応エネルギーの推定手法の開発を進めてきた。この手法の有効性に関する検証のため、最適な反応エネルギーを決定することのできる反応系に関して、融合反応機構を調べることは極めて重要である。最適な反応エネルギーは融合蒸発反応の断面積が最大化されるエネルギーであるため、同断面積のエネルギー依存性の測定から決定される。また、最適な反応エネルギーの推定は準弾性散乱測定データに基づいて行われる。従って、これらの測定を同一の反応系に対して行い、最適な反応エネルギーの測定値と推定値を比較することにより、手法の妥当性を検証できると期待される。そこで本研究では、融合蒸発反応の断面積が現実的に測定可能なほど大きく、また実際に用いられている  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$  反応と似た (標的核が同様の変形度を持つ)  $^{51}\text{V}+^{159}\text{Tb}$  反応系に関して、融合蒸発反応および準弾性散乱の両方を理化学研究所 SRILAC 施設において測定した。現在データを解析している。

#### アインスタイニウム標的を用いた $^{258}\text{Md}$ の核分裂特性の研究 (松永壮太郎、石橋優一、坂口聡志)

原子核の基本模型の一つである液滴模型では、重原子核は核分裂により質量の等しい二つの核分裂片に分裂することが導かれる (対称分裂)。一方、実際はもう一つの基本模型である殻模型による効果のため、どちらかの核分裂片の質量が有意に大きい非対称分裂する核が多い。この殻模型による効果は原子核の励起エネルギーが低い領域で重要であるが、励起エネルギーが高くなると原子核は液滴としての側面が強くなり、核分裂も対称分裂の成分が徐々に増えることが知られている。一方、 $^{258}\text{Md}$  に関する最近の理論計算では、逆に非対称成分が増えたり、励起エネルギーの僅かな違いで急激に変化するなど、従来知られていた現象と異なる傾向が予想されている。これを受けて本研究では  $^{258}\text{Md}$  の分裂様相の励起エネルギー依存性を調べることを目的とした。実験は日本原子力研究開発機構のタンデム加速器施設にて行った。アメリカ・オーク

リッジ国立研究所で製造された、人類が標的として使用できる最も重く極めて希少な元素であるアインスタイニウム (Es) を用いて、 $^{254}\text{Es} + ^4\text{He}$  反応により  $^{258}\text{Md}$  の励起エネルギー 15, 16, 18, 20 MeV の励起状態を生成し、核分裂片の質量数と全運動エネルギーを測定した。得られた質量分布から対称分裂・非対称分裂の割合を導出したところ、励起エネルギーの増加に伴い、対称分裂成分が減少し、非対称分裂成分が増加する傾向が確認できた。この結果は既知核には見られないユニークな振る舞いであり、既存のどの理論予測とも異なるものである。今後重い原子核の核分裂の理解を深めるための重要な手がかりとなることが期待される。本研究は日本原子力研究開発機構の西尾勝久氏、廣瀬健太郎氏、浅井雅人氏らとの共同研究として実施した。

### 中性子過剰フェルミウム領域核の自発核分裂における分裂メカニズムの研究 (石橋優一)

核分裂は、1つの原子核が2つに分裂する極めてダイナミックな現象であるが、その分裂過程では原子核の微視的構造の影響を強く受ける、極めて複雑な物理現象である。ウランなどのアクチノイド核の核分裂では、2つの核分裂片の質量が非対称な非対称核分裂を示すが、中性子過剰フェルミウム (Fm) 領域核の自発核分裂では、分裂核の質量数が 257 を超えると突然質量分布が非対称から対称に変化する。1980 年代にこの現象が発見されて以降、多くの理論的研究が行われ、質量分布を再現する試みがなされてきたが、これらの原子核を合成することが極めて困難なことから今日まで追加の実験はまったく行われておらず、最新の理論計算と比較できるより詳細な実験データの取得が望まれていた。本研究では、半減期 276 日の  $^{254}\text{Es}$  標的に原子力機構タンデム加速器からの  $^{18}\text{O}$  ビームを照射し、多核子移行反応により生成した中性子過剰 Fm 領域核をオンライン同位体分離装置 ISOL を用いて同位体分離することで、これら原子核の自発核分裂片の測定に成功した。これまでに  $^{256}\text{Fm}$ ,  $^{258}\text{Fm}$ ,  $^{259}\text{Lr}$  の測定を実施し、本年度は新たに  $^{259}\text{Md}$  の測定に成功した。データ解析の結果、 $^{259}\text{Md}$  の自発核分裂はこれまでの解釈と異なり、対称核分裂と非対称核分裂の 2 成分の混合であることを明らかにした。今後は、対称核分裂と非対称核分裂の混合が期待される他の原子核について統計量を増やした実験を行い、中性子過剰 Fm 核領域における対称核分裂と非対称核分裂の分裂メカニズムの解明を目指す。本研究は日本原子力研究開発機構の浅井雅人氏の指導のもとに実施した。

### シリコン検出器の波高欠損に関する研究 (石橋優一)

超重核や核分裂片などの重イオンを Si 検出器を用いて測定する場合、飛跡に沿って生成される高密度の電子・正孔対の再結合等によって検出される電荷量が減少し、入射粒子のエネルギーと電荷量が比例しない波高欠損という現象が起こる。波高欠損は、入

射粒子のエネルギー、原子番号、質量数、検出器特性に依存するため、検出された重イオンのエネルギーを精度良く導出するためには、それらの依存性を表す経験式を導出し、補正する必要がある。これまでに九州大学タンデム加速器と原子力機構タンデム加速器を用いて、LiからAuまでの様々な原子番号及びエネルギーを持つ重イオンを特性の異なる数種類のSi検出器で測定し、系統的な波高欠損のデータを取得した。それらのデータを用いて今年度、40～150 MeVの核分裂片エネルギー領域における波高欠損の値を精度良く再現する新しい経験式の導出に成功した。本研究で得られた経験式は、中性子過剰フェルミウム領域核の自発核分裂片測定実験のデータ解析にも利用され、エネルギー精度及び質量精度の向上に役立った。に「本研究は日本原子力研究開発機構の浅井雅人氏の指導のもとに実施した。

#### **アクチノイド核の核分光研究（杉山晃一、坂口聡志）**

超重元素領域には、近傍核と比べて圧倒的に長い寿命をもつ原子核領域「安定の島」が予言されている。年単位とも予想されるこの長い寿命の起源としては、超重核領域での陽子・中性子の二重閉殻構造が想定されている。アクチノイド核の励起状態には「安定の島」の閉殻構造を構成する軌道が強く関与することから、系統的な核データの取得と理論計算を組み合わせることによって、閉殻構造を特徴づける殻ギャップエネルギーを定量的に導き出し、将来の合成研究の指針とすることができる。本研究では、原子力研究開発機構においてアクチノイド核の核分光実験を遂行した。実験データの解析を行い、これまで発見されていないガンマ線遷移の候補を複数見出した。本研究は理化学研究所の郷慎太郎氏の指導および日本原子力研究開発機構の浅井雅人氏の協力のもとに実施した。

#### **低エネルギー重イオン検出用 MWPC の開発（能見幹都、松永壮太郎、坂口聡志）**

一般的に寿命が極めて短く不安定である超重元素核の中で、陽子数 114～120 付近、中性子数 184 付近の中性子過剰な領域に位置する超重元素核は、長い寿命をもって安定に存在すると予言されており、この領域は「安定の島」と呼ばれている。我々はこの「安定の島」領域の原子核をどのように合成するかを探るために、低エネルギー中性子過剰核二次ビームを用いた融合分裂過程の研究を計画している。核分裂片の検出には多芯線比例計数管 (MWPC) が有用である。MWPC は真空中に設置され、低圧の気体を充填して使用される。このため、気体充填のためのガスハンドリングシステムの開発を進めている。全体のガスフローから各部品を選定し、三次元 CAD を用いて細かな部品の形状を決定した。実機の組み上げと試験は次年度を予定している。

#### **太陽電池検出器のエネルギー・時間分解能および放射線耐性の評価（能見幹都、松浦**

開、坂口聡志)

核分裂片などの重イオンの検出においてはシリコン検出器が一般的に用いられるが、シリコン検出器は放射線損傷によって性能が低下することが知られている。その問題点を解決する手段として、太陽電池検出器が注目されている。太陽電池検出器はシリコン検出器と同様に半導体ダイオードであり、空乏層に放射線が入射した際に生成される電子正孔対を収集することでエネルギー・時間の情報が得られる。特長としては極めて安価で、自由な大きさ・形状に加工ができる。また、放射線耐性に優れるとされているが、具体的なデータは乏しい。そこで我々は、太陽電池検出器とシリコン検出器の放射線耐性を評価し比較するためのビーム照射実験を行った。実験では九州大学のタンデム加速器を用いて、66 MeV, 3 kcps の  $^{127}\text{I}$  ビームを太陽電池検出器とシリコン検出器に直接照射した。ビーム照射によってエネルギースペクトルのピークがシフトするか、エネルギー分解能が低下するかを調べた。また同時に、時間分解能の評価、長時間の照射、異なる大きさの太陽電池検出器の比較なども行った。その結果、太陽電池検出器は、シリコン検出器と比較して分解能に劣るものの、放射線照射によるエネルギースペクトルのピークシフトやエネルギー分解能の低下が極めて小さく、放射線耐性に優れていることが分かった。このことから、高バックグラウンド条件下での核分裂片測定にも有用であるといえる。本研究は高エネルギー加速器研究機構の庭瀬暁隆氏の指導のもとに実施した。

$^{12}\text{C}-\alpha$  非弾性散乱による Hoyle 状態放射崩壊分岐比測定手法の開発 (小谷基樹、寺西高)

重要な天体核反応の1つであるトリプルアルファ反応の反応率の決定には、原子核実験によるパラメータとして  $^{12}\text{C}$  第2励起状態の基底状態への崩壊幅  $\Gamma_{rad}$  が必要である。この  $\Gamma_{rad}$  は放射崩壊分岐比  $\Gamma_{rad}/\Gamma$ 、対崩壊分岐比  $\Gamma_{\pi}/\Gamma$  の逆数、対崩壊幅  $\Gamma_{\pi}$  の3つの実験値の積として決定されている。本研究では、このうち  $\Gamma_{rad}/\Gamma$  を精密に決定するための  $^{12}\text{C}-\alpha$  非弾性散乱を用いた実験手法の開発を行った。実験手法のテストとして、タンデム加速器による 21 MeV  $\alpha$  ビームと  $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  炭素標的を用いた散乱実験を行った。散乱後の  $^{12}\text{C}$  および  $\alpha_{0,1}$  の同時測定により、 $^{12}\text{C}$  第一励起状態の  $\Gamma_{rad}/\Gamma$  (1であることが知られている) を決定する模擬解析を行い、系統誤差の評価を行った。今後、本テスト実験を踏まえた実験手法の改善を行い、第2励起状態の  $\Gamma_{rad}/\Gamma$  を精密に決定する本実験を実施する予定である。

発表論文

《原著論文》

Folding-model approach to reaction cross section of  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He} + {}^{12}\text{C}$  scattering at 790 MeV:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **33**, 105132 (2022).

Neutron skin in  ${}^{48}\text{Ca}$  determined from  $p + {}^{48}\text{Ca}$  and  ${}^{48}\text{Ca} + {}^{12}\text{C}$  scattering:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **33**, 105155 (2022).

Matter radii and skins of  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  from reaction cross section of  $p + {}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  scattering based on the Love-Franey  $t$ -matrix model:

T. Wakasa, M. Takechi, *et al.*

Results in Physics **33**, 105329 (2022).

Slope parameters determined from CREX and PREX2:

S. Tagami, T. Wakasa, *et al.*

Results in Physics **43**, 106037 (2022).

Spin correlation coefficient for  $p + {}^3\text{He}$  elastic scattering at 100 MeV:

A. Watanabe, T. Wakasa, *et al.*

Physical Review C **106**, 054002 (2022).

Skin values of  ${}^{208}\text{Pb}$  and  ${}^{48}\text{Ca}$  determined from reaction cross sections:

T. Wakasa, S. Tagami, *et al.*

Results in Physics **43**, 106101 (2022).

Various nuclear structures in  ${}^{140}\text{Xe}$  studied by  $\beta$  decay of ground and isomeric states in  ${}^{140}\text{I}$ :

A. Yagi, A. Odahara, H. Nishibata, R. Lozeva, C. -B. Moon, S. Nishimura, K. Yoshida, N. Yoshinaga, C. Watanabe, K. Higashiyama, T. Shimoda, R. Daido, Y. Fang, P. S. Lee, B. Moon, P. Doornenbal, G. Lorusso, P. -A. Soderstrom, T. Sumikama, H. Watanabe, T. Isobe, H. Baba, H. Sakurai, F. Browne, Z. Patel, S. Rice, L. Sinclair, J. Wu, Z. Y. Xu, R. Yokoyama, T. Kubo, N. Inabe, H. Suzuki, N. Fukuda, D. Kameda, H. Takeda, D. S. Ahn, Y. Shimizu, D. Murai, F. L. Bello Garrote, J. -M. Daugas, F. Didierjean,

E. Ideguchi, S. Iimura, T. Ishigaki, H. S. Jung, T. Komatsubara, Y. K. Kwon, C. S. Lee, S. Morimoto, M. Niikura, I. Nishizuka, K. Tshoo  
Physical Review C **105**, 044325 (2022).

Probing Optimal Reaction Energy for Synthesis of Element 119 from  $51\text{V}+248\text{Cm}$  Reaction with Quasielastic Barrier Distribution Measurement:

M. Tanaka\*, P. Brionnet, M. Du, J. Ezold, K. Felker, B. J. P. Gall, S. Go, R. K. Grzywacz, H. Haba, K. Hagino, S. Hogle, S. Ishizawa, D. Kaji, S. Kimura, T. T. King, Y. Komori, R. K. Lemon, M. G. Leonard, K. Morimoto, K. Morita, D. Nagae, N. Naito, T. Niwase, B. C. Rasco, J. B. Roberto, K. P. Rykaczewski, S. Sakaguchi\*\*, H. Sakai, Y. Shigekawa, D. W. Stracener, S. VanCleve, Y. Wang, K. Washiyama, and T. Yokokita (\*, \*\* の両名が責任著者)

Journal of the Physical Society of Japan **91**, 084201 (2022).

Nuclear magnetic moment of the neutron-rich nucleus  $^{21}\text{O}$ :

Y. Ishibashi, A. Gladkov, Y. Ichikawa, A. Takamine, H. Nishibata, T. Sato, H. Yamazaki, T. Abe, J. M. Daugas, T. Egami, T. Fujita, G. Georgiev, K. Imamura, T. Kawaguchi, W. Kobayashi, Y. Nakamura, A. Ozawa, M. Sanjo, N. Shimizu, D. Tom-inaga, L. C. Tao, K. Asahi, and H. Ueno  
Physical Review C **107**, 024306 (2023).

Gamow-Teller decay of  $^{142}\text{Te}$  to  $^{142}\text{I}$ :

B. Moon, C. -B. Moon, A. Odahara, R. Lozeva, S. Nishimura, C. Yuan, F. Browne, P. Doornenbal, G. Lorusso, Z. Patel, S. Rice, L. Sinclair, P. -A. Soderstrom, T. Sumikama, H. Watanabe, J. Wu, Z. Y. Xu, A. Yagi, D. S. Ahn, H. Baba, F. L. Bello Garrote, R. Daido, J. M. Daugas, F. Didierjean, Y. Fang, N. Fukuda, B. Hong, E. Ideguchi, N. Inabe, T. Ishigaki, T. Isobe, H. S. Jung, D. Kameda, I. Kojouharov, T. Komatsubara, T. Kubo, Y. K. Kwon, C. S. Lee, P. Lee, S. Morimoto, D. Murai, M. Niikura, H. Nishibata, I. Nishizuka, H. Sakurai, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, K. Tshoo, R. Yokoyama  
Physical Review C **107**, 014311 (2023).

《その他の論文》

新元素の探索 (1) : 森田浩介、坂口聡志 : 日本原子力学会誌 **64** (12), 680-685 (2022).

新元素の探索 (2) : 森田浩介、坂口聡志 : 日本原子力学会誌 **65** (1), 45-49 (2023).

## 著書

## 講演

### 《 海外での講演 》

Probing optimal energy for synthesis of element 119 from  $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$  reaction: S. Sakaguchi and M. Tanaka for nSHE collaboration,

The 28th International Nuclear Physics Conference (INPC2022), 11-16 September 2022, South Africa. (口頭発表として受理、渡航制限のためポスター発表に変更)

Shape coexistence in  $^{30}\text{Mg}$  and  $^{31}\text{Mg}$  explored by  $\beta$ - $\gamma$  spectroscopy with spin-polarized beams

H. Nishibata

Shape Coexistence, University of Guelph, May 2023 (招待講演)

### 《 国内での講演 》

Nuclear moment measurement: present and future:

Y. Ichikawa

Physics Of RI: Recent progress and perspectives, May 30-June 1, 2022, Wako, Japan (招待講演)

分散整合二回散乱法による  $^{99}\text{Zr}$  アイソマー状態のスピン整列 :

篠原悠介、市川雄一、郷慎太郎、西畑洸希、安藤蒼太、荒殿和希、旭耕一郎、馬場秀忠、福田直樹、G. Georgiev、A. Gladkov、今村慧、梶原孝文、岸本侃己、R. Lozeva、向井もも、新倉潤、M N. Nurhafiza、小田原厚子、清水陽平、M. Si、K. Stoychev、鈴木宏、立川柊平、田島美典、高峰愛子、竹田浩之、竹中京平、武重祥子、上野秀樹、若狭智嗣、山下渉、山崎展樹、横田望海、吉本雅浩、J. M. Daugas

日本物理学会 2022 年秋季大会、2022 年 9 月 6~8 日、岡山理科大学

EDM 測定に向けたガラスセル中 Xe 原子のスピン緩和機構の評価 II :

安藤蒼太、市川雄一、佐藤智哉、篠原悠介、西畑洗希、若狭智嗣、岸本侃己、山下涉、横田望海、立川柊平、竹中京平、梶原孝文、荒殿和希、郷慎太郎、高峰愛子、上野秀樹、旭耕一郎

日本物理学会 2022 年秋季大会、2022 年 9 月 6～8 日、岡山理科大学

シリコン半導体検出器の重イオン測定における波高欠損の研究：

石橋優一、松永壮太郎、森田浩介、坂口聡志、浅井雅人、塚田和明、佐藤哲也、伊藤由太

日本放射化学会第 66 回討論会（2022）、2022 年 9 月 15 日～17 日、東京大学本郷キャンパス

アクチノイド核を標的としたアイソマー核分光：

杉山晃一、郷慎太郎、富松太郎、甲斐民人、長江大輔、石橋優一、松永壮太郎、永田優斗、西畑洗希、鷺山広平、坂口聡志、森田浩介、R. Orlandi、西尾勝久、牧井宏之、廣瀬健太郎、伊藤由太、洲崎ふみ、佐藤哲也、塚田和明、浅井雅人、静間俊行、井手口栄治、T.T. Pham、庭瀬暁隆

日本放射化学会第 66 回討論会（2022）、2022 年 9 月 15 日～17 日、東京大学本郷キャンパス

Recent progress of nuclear moment measurement:

Y. Ichikawa

RIBF Users Meeting 2022, September 20-22, 2022, Online（招待講演）

Development of nuclear spin maser toward the EDM measurement:

S. Ando, Y. Ichikawa, T. Sato, Y. Shinohara, H. Nishibata, S. Tachikawa, S. Go, A. Takamine, H. Ueno, K. Asahi

The 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2022), November 24-25, 2022, Kyushu University, Japan

ベータ遅延中性子測定のための中性子検出器の開発と性能評価：

岸本侃己、西畑洗希、小田原厚子、篠原悠介、横田望海、大上能弘

Nurhafiza Mohamad Nor、下田正、市川雄一、若狭智嗣、北川淳志、佐藤眞二

第 128 回日本物理学会九州支部例会、2022 年 12 月 3 日、熊本大学大学黒髪南キャンパス

$p$ - $^{12}\text{C}$  弾性散乱を用いた陽子偏極度計の性能評価：

山下渉、若狭智嗣、西畑洸希、梶原孝文、荒殿和希、田中裕典、谷本昂平、長尾陽平、山本陽介、岸本侃己、安藤蒼太、篠原悠介、横田望海、竹中京平、小林信之、吉田英智、大田晋輔

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学黒髪南キャンパス

$^3\text{H}(t, ^3\text{He})3n$  反応による3中性子系探索に向けた中性子測定系の開発：

横田望海、若狭智嗣、西畑洸希、岸本侃己、米村千恵子、笹野匡紀、三木謙二郎、今井伸明、上坂友洋、浦山廉、大田晋輔、亀谷晃毅、竹田浩之、波多野雄治、羽場宏光、早水友洋、原正憲、道正新一郎、他 RIBF-SHARAQ11 collaboration

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学黒髪南キャンパス

分散整合二回散乱法による  $^{99}\text{Zr}$  アイソマー状態のスピン整列：

篠原悠介、市川雄一、郷慎太郎、西畑洸希、安藤蒼太、旭耕一郎、馬場秀忠、福田直樹、G. Georgiev、A. Gladkov、今村慧、岸本侃己、R. Lozeva、向井もも、新倉潤、M. N. Nurhafiza、小田原厚子、清水陽平、M. Si、K. Stoychev、鈴木宏、田島美典、高峰愛子、竹田浩之、武重祥子、上野秀樹、若狭智嗣、山下渉、山崎展樹、吉本雅浩、J. M. Daugas

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学黒髪南キャンパス

EDM 測定に向けた核スピンメーザーの開発：

安藤蒼太、市川雄一、佐藤智哉、篠原悠介、西畑洸希、若狭智嗣、岸本侃己、山下渉、横田望海、立川柊平、竹中京平、梶原孝文、荒殿和希、郷慎太郎、高峰愛子、上野秀樹、旭耕一郎

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学黒髪南キャンパス

太陽電池検出器のエネルギー・時間分解能および放射線耐性の評価：

松浦開、能見幹都、庭瀬暁隆、森田浩介、長江大輔、坂口聡志、甲斐民人、富松太郎、永田優斗、武藤大河、杉山晃一、松永壮太郎、鄭淳讚、浅井雅人

第128回日本物理学会九州支部例会、2022年12月3日、熊本大学黒髪南キャンパス

Excitation energy dependence of fission of  $^{258}\text{Md}$  produced by  $^4\text{He}+^{254}\text{Es}$  reaction:

松永壮太郎、坂口聡志、廣瀬健太郎、西尾勝久、浅井雅人、A.N. Andreyev、石橋優一、

伊藤由太、岩佐直仁、恵下田美樺、R. Orlandi、佐藤哲也、洲寄ふみ、J. Smallcombe、塚田和明、牧井宏之、K.P. Rykaczewski

第 128 回日本物理学会九州支部例会、2022 年 12 月 3 日、熊本大学黒髪南キャンパス

APD による加速  $\alpha$  粒子の直接検出：

小谷基樹、寺西高、田中久登、松永琳太郎、松本泰知

第 128 回日本物理学会九州支部例会、2022 年 12 月 3 日、熊本大学黒髪南キャンパス

太陽電池検出器のエネルギー・時間分解能および放射線耐性の評価：

能見幹都、坂口聡志、浅井雅人、甲斐民人、杉山晃一、鄭淳讚、富松太郎

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

EDM 測定に向けた能動帰還型核スピンメーザーの開発：

立川柊平、市川雄一、佐藤智哉、安藤蒼太、篠原悠介、谷本昂平、山本陽介、西畑洗希、若狭智嗣、岸本侃己、山下涉、横田望海、竹中京平、梶原孝文、荒殿和希、郷慎太郎、高峰愛子、上野秀樹、旭耕一郎

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

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

トリプルアルファ反応率の精密決定

研究代表者：寺西高

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

核分裂片同時計数検出器による中性子過剰核の融合反応機構研究

研究代表者：坂口聡志

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

スピン整列ビームを用いたエキゾチック核構造研究の展開

研究代表者：市川雄一

科学研究費補助金、挑戦的研究（萌芽）

Xe 原子 EDM 測定に向けた電極素材表面における  $^{131}\text{Xe}$  スピン緩和機構の解明  
研究代表者：市川雄一

科学研究費補助金、若手研究

新奇手法による中性子過剰核の構造研究：“逆転の島”境界原子核の完全理解に向けて  
研究代表者：西畑洗希

科学研究費補助金、新学術領域研究

エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造

研究分担者：若狭智嗣（研究代表者 東京工業大学大学院理学研究科 中村隆司）

科学研究費補助金、基盤研究（S）

三核子系散乱による核子間三体力の完成

研究分担者：坂口聡志（研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子）

科学研究費補助金、基盤研究（A）

陽子・ヘリウム 3 散乱による三体力荷電スピン  $T = 3/2$  項の決定

研究分担者：若狭智嗣（研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子）

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択（学外からの受け入れを含む）

他大学での研究と教育

学部 4 年生卒業研究

田中裕典：（指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希）：2nd-FPP と Geant4 を用いたランダウ・テールについての理解

谷本昂平：（指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希）：EDM 測定のためのレーザーの性能評価

長尾陽平：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)：陽子偏極度計 2nd-FPP を用いた  $P = A_y$  定理の検証

山本陽介：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)：Ge 検出器およびデジタイザの性能測定

深津巧：(指導教員、坂口聡志)： $^{51}\text{V} + ^{159}\text{Tb}$  準弾性散乱の励起関数測定

松永琳太郎：(指導教員、寺西高)  $^{12}\text{C}-\alpha$  非弾性散乱のモンテカルロ・シミュレーション

松本泰知：(指導教員、寺西高)  $^4\text{He}$  1 価イオンビームの生成テスト

道本優也：(指導教員、坂口聡志)： $^{51}\text{V} + ^{159}\text{Tb}$  準弾性散乱における結合チャンネル計算による解析

山ノ内邑希：(指導教員、坂口聡志)： $^{51}\text{V} + ^{159}\text{Tb}$  融合反応の励起関数測定と融合反応機構の研究

## 修士論文

安藤蒼太：(指導教員、市川雄一) 電気双極子モーメント測定に向けた磁気光学検出核スピンメーザーの開発

石橋優一：(指導教員、浅井雅人・坂口聡志)：シリコン検出器の波高欠損と  $^{259}\text{Md}$  の自発核分裂の研究

岸本侃己：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：中性子過剰核の構造解明に用いる低閾値中性子検出器の性能評価

小谷基樹：(指導教員、寺西高)： $^{12}\text{C}-\alpha$  非弾性散乱による Hoyle 状態放射崩壊分岐比測定手法の開発

篠原悠介：(指導教員、市川雄一)： $^{99\text{m}}\text{Zr}$  の核モーメント測定におけるスピン整列ビームの生成

杉山晃一：(指導教員、郷慎太郎・坂口聡志)：アイソマースコープ法を用いたアクチノイド核の核分光研究

松永壮太郎：(指導教員、坂口聡志)：アインスタイニウム標的を用いた  $^{254}\text{Es}+^4\text{He}$  反応による  $^{258}\text{Md}$  の核分裂特性の研究

山下渉：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：多線式ドリフトチェンバー導入による陽子偏極度計の性能向上

横田望海：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)： $^3\text{H}(t, ^3\text{He})3n$  反応による 3 中性子共鳴状態

探索のための中性子測定系の較正

## 博士論文

## 外国人留学生の受け入れ

## 学外での学会活動

若狭智嗣： 大阪大学核物理研究センター運営委員会委員  
東京大学 原子核科学研究センター 運営委員会委員  
日本物理学会・実験核物理領域・領域副代表

坂口聡志： nSHE Research Group Management Board Member  
4th nSHE Research Group Collaboration Meeting, Chair of LOC  
大阪大学核物理研究センター研究計画検討専門委員会委員 (P-PAC)  
大阪大学核物理研究センター実験課題採択専門委員会委員 (B-PAC)  
SSRI-PNS collaboration 運営委員  
FUSION2023 Program Committee

市川雄一： RIBF Users Executive Committee Chair  
停止・低速 RI ビームを用いた核分光同好会 (SSRI) 幹事  
Fundamental Physics Using Atoms (FPUA) Board Member  
The 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms  
(FPUA2022) Organizer & Local Organizer  
International Workshop on Atomic Parity Violation (APV2022) Organizer  
第四回若手放談会：エキゾチック核物理の将来 世話人

## 受託研究・民間との共同研究

### その他の活動と成果

「京築地域未来の地域リーダー育成プログラム」の研修の一環として中学生と自治体職員に対しタンデム加速器施設の案内と研究紹介（寺西高）

大学院在籍時の研究「超重核の直接質量測定」に対して第17回日本物理学会「若手奨励賞」を受賞（庭瀬暁隆：受賞時 KEK 所属）

大学院在籍時の研究「超重核の直接質量測定」に対して第29回原子核談話会「新人賞」を受賞（庭瀬暁隆：受賞時 KEK 所属）

大学院在籍時の研究「精密質量と崩壊事象の相関測定法の開拓による超重元素の直接質量測定」に対して日本放射化学会「奨励賞」を受賞（庭瀬暁隆：受賞時 KEK 所属）

大学院在籍時の研究“First direct mass measurement of superheavy nuclide via MRTOF mass spectrograph equipped with an  $\alpha$ -TOF detector”に対して RIBF Users Group Thesis Award を受賞（庭瀬暁隆：受賞時 KEK 所属）

# 物性理論

## 研究室構成員

福田順一 教授

松井淳 講師

多羅間充輔 助教

《 大学院 博士課程 》

米澤 弦起 金子甲二郎

《 大学院 修士課程 》

松清 洋輝 藤原 智仁 山脇 郁也 小倉 智大

《 学部 卒業研究生 》

小田 響己 北本 光 青海 匡郁 幸丸 辰徳

## 担当授業

福田順一: 非平衡物理学, 統計力学 I・同演習

松井淳: 量子統計物理学, 物理数学 II, 電磁気学基礎演習, 熱力学基礎演習, 物理学ゼミナール

多羅間充輔: 統計力学 I・同演習

## 研究・教育目標と成果

**現実的な厚さのコレスティックブルー相液晶セルの光学特性の数値計算** (福田順一)

コレスティックブルー相と呼ばれる3次元秩序構造を有する液晶の電場応答の理解を目的として昨年度開始した数値計算に引き続いて,  $10\mu\text{m}$  程度という現実的な厚さの液晶セルが示す秩序構造の光学特性, 特に反射スペクトルの円偏光依存性に着目した系統的な数値計算を行った. 以上の計算結果をまとめ, 原著論文として公表した.

**コレスティックブルー相の双晶形成のダイナミクス** (福田順一)

立方対称性を有するコレスティックブルー相液晶は, 構造相転移の結果として異なる方位のブルー相格子が共存する双晶構造を示す. 双晶の微細構造に関する研究結果 (2020年度修士課程修了の山下晃弘君が行った数値計算によるもの) を原著論文として公表するとともに, 今年度は双晶形成のダイナミクスについての知見を得るべく, 液晶の

配向秩序を表すテンソルの秩序変数のダイナミクスとして、熱ゆらぎを考慮に入れたランジュバン型の運動方程式に基づく検討を開始した。

#### **円形井戸中のネマチック液晶が示す秩序構造 (福田順一)**

円形井戸中の液晶が示す秩序構造についての、特に井戸の上下面と側面における境界条件が異なる場合に生じる位相欠陥に着目し、井戸のアスペクト比などが欠陥構造に及ぼす影響に関する系統的な数値計算を行った（中央大学の片山建二教授のグループとの共同研究）。

#### **空間拘束下、障害物存在下のアクティブマターの分子シミュレーション (金子甲二郎, 福田順一)**

前多研究室で行われている空間拘束下でのバクテリア混濁液のダイナミクスの研究に想を得て、個々のバクテリアを自己駆動する棒状の粒子としてモデル化し、そのような粒子の集団運動を分子シミュレーションによって調べた。同じ半径の円が2つ重なった双子型井戸による拘束下、および円柱状の障害物の存在下という異なる条件の下でのシミュレーションをそれぞれ行なった。前者においては井戸の境界に垂直に粒子が配向するクラスターが生成し運動が抑制されること、後者においては長い粒子は障害物の周りを周回するクラスターを形成し、短い粒子は比較的無秩序な集団運動をすることを見出した。

#### **トポロジカルフォトンクスにおけるキラリティの影響 (米澤弦起, 福田順一)**

昨年度行ったキラルなトポロジカルフォニック結晶に関する研究を深化させるために、一般化したタイトバインディングモデルを構築し、解析計算・数値計算をもとに、ディラック方程式の質量項によるバンドトポロジーの分類や、質量項に由来する局在状態の計算を行った。また、実空間のシミュレーションにおいて振幅が非対称に伝播する結果も得られた。さらに、高次トポロジカル絶縁体などのパイフラックスの物理に関する研究を新たに着手した（物質・材料研究機構の荻宿俊風博士との共同研究）。

#### **空間拘束下のアクティブマターの連続体シミュレーション (松清洋輝, 福田順一)**

前多研究室のバクテリア混濁液の研究に同様に触発され、Toner-Tu-Swift-Hohenbergモデルと呼ばれる、バクテリアの速度分布を連続化した速度場を変数とするアクティブ流体のモデルに基づく理論的考察を行った。空間拘束に関する境界条件として、境界での速度がゼロにならないすべり境界条件を採用した場合の影響について系統的な数値計算を行い、境界における流れ（エッジカレント）が振動を示すという予想外の結果を得た。またキラリティの影響についても考察を行い、エッジカレントがキラリ

ティ由来の非対称性を示すことを明らかにした。

#### **ネマチック液晶の電気対流によるソリトン形成**（藤原智仁，福田順一）

ネマチック液晶からなる液晶セルに電場を印加した際にソリトン状の構造が直線状の運動を示すことが近年実験によって明らかにされている。3次元系の流体力学方程式を解く数値的な負荷を軽減するべく、セルの厚さ方向の液晶の変形モードなどについて最低波数のモードを考慮して問題を縮約することを試みた。

#### **細胞集団の相分離**（山脇郁也，福田順一）

2種類の細胞からなる系においてその相分離に細胞形状がどのように影響を与えるかを考察すべく、細胞の種類を表すスカラー場、細胞の集団運動を表す速度場、および細胞形状を表すテンソル場を用いた連続体理論の構築を試みた。速度場の方程式内の弾性ストレスの項に、細胞形状を表すテンソル場がどのような形で現れるかを定式化した。

#### **複素ランジュバン法に基づく高分子系の統計力学**（小倉智大，福田順一）

高分子系のメソスケールの理論としてよく用いられている自己無撞着場の方法において通常取り入れられていないゆらぎの影響を取り入れた理論として、複素ランジュバン法を用いて系の分配関数を評価する方法がある。将来的な目標としては、液晶のように高分子鎖内で鎖の剛直性が異なるものの秩序構造形成とゆらぎの影響を理解したいが、今年度は理論の基礎的な背景の理解に努めた。

#### **スメクチック液晶の連続体力学**（小田響己，福田順一）

最近実験的に発見された、層状の秩序を有する液晶（スメクチック液晶）で層と垂直な方向の極性を持つものにおける位相欠陥を含む秩序形成の理解を長期的な目標に、その背景となるメソスケールの連続体理論に基づいて、層が外場によって波打つという問題についての数値計算を試みた。

#### **分子シミュレーションによるレオロジーの研究**（北本光，松井淳，福田順一）

水野研で行われている、半屈曲性高分子系のレオロジーに関する実験事実を理論的に理解することを将来的な目標として、今年度はレオロジーに関する基礎的な事項の理解に務めるとともに、マイクロレオロジーを念頭に溶媒とプローブ粒子からなる系の分子シミュレーションを試みた。

#### **ガラス転移近傍の拡散素過程の統計解析**（松井淳）

ガラス転移近傍で顕著となるジャンプ型の分子拡散について、分子動力学シミュレー

ションの結果をもとに、生成頻度の定常性を解析した。

#### **複数台のエレベータの同期現象に関する理論研究 (幸丸辰徳、多羅間充輔)**

2台のエレベータは確率的な人の流入により同期することが知られている。2台以上の複数台のエレベータがあるときに同期ダイナミクスがどのように変化するかを数理モデルのシミュレーションにより調査した。また、各階にとまるエレベータと止まる階に制限のあるエレベータとが共存するときに、同期が改善することを発見した。

#### **基盤上の細胞の這行運動のメカノケミカルモデル (多羅間充輔)**

基盤上を這う細胞は、細胞内の化学反応が力学的な力に変換されることで空間的に運動する。このような単一の細胞の這走運動に対するメカノケミカルモデルを構築した。細胞内部のシグナル反応が示す伝搬波により細胞がランダムに方向を変化させながら運動し、細胞内の揺らぎによりスパイラル波が発生すると回転運動することを示した。いずれの場合も細胞が基盤に及ぼす牽引力がフォースフリー（牽引力の総和がゼロ）であり、かつトルクフリー（牽引力によるトルクの総和がゼロ）であることを明らかにした。以上の研究内容について論文として学術雑誌に発表した。（京都大学 山本量一教授らとの共同研究）

#### **枯渇力と分子モーターの力の拮抗によるアクチン細胞骨格の膜面集積 (多羅間充輔)**

細胞膜付近では回転の自由度が制限されるために枯渇するアクチン繊維が、分子モーターの力生成により細胞膜付近に集積することをシミュレーションにより示した。この集積は膜の曲率には依らず起こる。また集積の様子や集積構造が膜へ及ぼす圧力が、適切なスケールリングによりアクチン繊維やモーターの濃度及びアクチン繊維の長さによらずに定量的に変化しないことを予言した。以上の研究内容について論文として発表した。

#### **気管形成過程でのアクチン細胞骨格のミクロ相分離構造 (多羅間充輔)**

ショウジョウバエ胚の気管形成過程ではアクチン骨格がクラスター構造を形成し、発生が進むとクラスターからストライプに構造転移が起きることが実験で見つかり、細胞骨格の粗視化分子動力学モデルによりこれらの構造がミクロ相分離により実現することを示した。また、構造転移にはモーターの存在と摩擦の異方性が重要であることを予言した。以上の研究内容について論文として学術雑誌に投稿した。（東北大学 関根清薫博士、理化学研究所 林茂生博士らとの共同研究）

## 発表論文

### 《原著論文》

H. Doi, K.Z. Takahashi, H. Yasuoka, J. Fukuda and T. Aoyagi  
“Regression analysis for the prediction of elasticity and mesogen orientation of liquid crystal elastomers”  
Scientific Reports **12** (2022) 19788(1–12).

J. Fukuda  
“Simulation of a cholesteric blue phase cell with large but finite thickness”  
Frontiers in Soft Matter **2** (2022) 1011618(1–11).

A. Yamashita and J. Fukuda  
“Structure of twin boundaries of cholesteric blue phase I”  
Physical Review E **105** (2022) 044707(1–9).

M. Tarama, and T. Shibata  
“Pattern formation and the mechanics of a motor-driven filamentous system confined by rigid membranes”  
Physical Review Research **4**, 043071 (2022).

M. Tarama, K. Mori, and R. Yamamoto  
“Mechanochemical subcellular-element model of crawling cells”  
Frontiers in Cell and Developmental Biology **10**, 1046053 (2022).

### 《その他の論文》

J. Fukuda  
“Exotic structures of a thin film of chiral liquid crystals: A numerical study based on the Landau-de Gennes theory”  
Liquid Crystals Reviews (DOI: <https://doi.org/10.1080/21680396.2022.2077256>).

## 著書

## 講演

《 海外での講演 》

A. Yamashita and J. Fukuda

“Twin boundaries in cholesteric blue phase: A simulation study”

The 28th International Liquid Crystal Conference (2022年7月26日, リスボン/オンライン)

《 国内での講演 》

福田順一

「有限厚さのコレスティックブルー相液晶セルのシミュレーション」

第10回ソフトマター研究会 (2022年11月22日)

J. Fukuda

“Simulation of the structures and optical properties of a cholesteric blue phase cell of finite thickness under an electric field”

OLC2021 Satellite Workshop (2022年9月30日, *Invited Talk*)

福田順一

「電場下における有限厚さのコレスティックブルー相液晶セルのシミュレーション」

2022年日本液晶学会討論会 (2022年9月15日)

福田順一

“Exotic structures and dynamics of frustrated cholesteric blue phases”

東京大学物性研究所 理論セミナー (2022年7月8日, **依頼講演**)

福田順一

「コレスティックブルー相の構造と光学的性質に関する数値計算」

研究会「非平衡ソフトマター・アモルファス物質の物性解明への力学的自己組織化からの挑戦」(2022年6月23日, **依頼講演**)

Mitsusuke Tarama

“Phase separation and self-organized structures of actin cytoskeleton”

25th Anniversary Symposium of German-Japanese Joint Research Project on Nonequilibrium Statistical Physics Perspectives for Future Collaboration (2022年10月12日, **依頼講演**)

多羅間充輔、江端宏之

「平行平板間の自己推進変形粒子の集団運動」  
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 14 日)

多羅間充輔

「Coarse-grained molecular dynamics approach to phase separation of actin cytoskeleton」  
第 3 回生体分子シミュレーション・モデリング研究会 (2022 年 10 月 1 日)

多羅間充輔

「アクチン細胞骨格のミクロ相分離と構造転移」  
第 10 回ソフトマター研究会 (2022 年 11 月 22 日)

Mitsusuke Tarama

「Dynamic network structure formation of mesoderm cells in early chick embryo」  
Active Matter Workshop 2023 (2023 年 1 月 27 日)

Mitsusuke Tarama

“Pattern formation of actin cytoskeleton around membranes”  
NanoLSI Open Seminar (2023 年 3 月 15 日, 依頼講演)

松清洋輝, 福田順一

「バクテリアのキラルエッジカレントを記述する連続体理論」  
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 25 日)

金子甲二郎, 福田順一

“Self-propelled rods with curved boundaries”  
アクティブマター研究会 (Active Matter Workshop) 2023 (2023 年 1 月 27 日)

金子甲二郎, 福田順一

「双子型井戸中のバクテリアの分子動力学シミュレーション」  
第 10 回ソフトマター研究会 (2022 年 11 月 22 日)

松清洋輝, 福田順一

「バクテリアのキラルエッジカレントを記述する連続体理論」  
第 10 回ソフトマター研究会 (2022 年 11 月 22 日)

金子甲二郎, 福田順一

「双子型井戸中のバクテリアの分子動力学シミュレーション」  
第 128 回日本物理学会九州支部例会 (2022 年 12 月 3 日)

米澤弦起, 苜宿俊風

「BBH モデルとその応用」  
第 128 回日本物理学会九州支部例会 (2022 年 12 月 3 日)

松清洋輝, 福田順一

「バクテリアのキラルエッジカレントを記述する連続体理論」  
第 128 回日本物理学会九州支部例会 (2022 年 12 月 3 日)

## 外部資金

### 《 文部科学省科学研究費補助金 》

福田順一:

基盤研究 (B) 「キラル液晶の秩序構造に基づくトポロジカルフォトリクス  
の理論的研究」(研究代表者, 継続)

多羅間充輔:

若手研究 「細胞骨格と細胞の協同的パターン形成と機能発現のアクティブ  
マター物理学」(研究代表者, 継続)

国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化 (B)) 「微小管メカニクスが誘導す  
る細胞極性パターンニング」(分担, 継続)

基盤研究 (C) 「アクチン微小集合体を起点とした組織スケールの均一性獲得  
原理の解明」(分担, 継続)

### 《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

福田順一:

成長型中小企業等研究開発支援事業 (Go-Tech 事業) 「スマートグラスな  
どに内蔵する光方向を自在に制御する「液晶回折素子」測定システム開発」  
(分担)

令和 4 年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究課題 「液晶が示す秩序  
構造とその機能, 安定性に関する理論的研究」(代表)

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

## 他大学での研究と教育

### 学部4年生卒業研究

小田 響己：(指導教員：福田順一)：スメクチック相にみられる特徴的な幾何

北本 光：(指導教員：松井淳, 福田順一)：高分子シミュレーションを用いたレオロジー研究

青海 匡郁：(指導教員：多羅間充輔)：複数エレベータの同期現象と交通システムへの適用可能性

幸丸 辰徳：(指導教員：多羅間充輔)：シャトルエレベータを含むマルチエレベータシステムにおける同期現象のシミュレーション

### 修士論文

松清洋輝：バクテリアのキラルエッジカレントを記述する連続体理論

### 博士論文

## 外国人留学生の受け入れ

### 学外での学会活動

福田順一:

Associate Editor of *Frontiers in Soft Matter*

Editorial Board Member of *Liquid Crystal Reviews*

Editorial Board Member of *Scientific Reports*

日本物理学会代議員

Local organizing committee member of the 7th International Soft Matter Conference

第10回ソフトマター研究会 実行委員

多羅間充輔:

Local working group member of the 7th International Soft Matter Conference

アクティブマター研究会 2023 世話人

第10回ソフトマター研究会 実行委員

## 受託研究・民間との共同研究

## その他の活動と成果

福田順一: 九州大学出版会理事 (2023年1月より)

松井淳: 過年度生等の学習支援 (教育支援室), オープンキャンパス (オンライン開催 2022年8月6日)

金子甲二郎: 九州大学 次世代研究者挑戦的研究プログラム未来創造コース 採択

金子甲二郎, 福田順一: 九州大学 数理・データサイエンスに関する教育・研究支援プログラム 採択

金子甲二郎: 九州大学 3MT Competition, Finalist

米澤弦起: 九州大学 先導的人材育成フェローシップ (量子分野) 採択

米澤弦起: NIMS (物質・材料研究機構) インターンシップ制度 採択

# 統計物理学

## 研究室構成員

野村 清英 准教授

《 大学院 博士課程 》

益子 通生流 白石 修一

《 大学院 修士課程 》

緒方 健人 小野山 幸輔

《 訪問研究者 》

桂 法称 (東京大学 物理学科 准教授)

## 担当授業

統計力学 II(学部), 物性物理学 II(学部)

量子統計物理学 (大学院)、物理学特別講義 4 (大学院集中講義, 松井卓先生 (九州大学 数理研究科))

## 研究・教育目標と成果

1.  $SU(3)$  対称性を持つモデルでの Trimer 相と TL 相の相転移 (益子, 野村) :

$SU(3)$  量子スピン系の相転移とユニバーサリティクラスを研究する。この現象はレーザー冷却された原子系等で見られる。

具体的には, スピン  $S=1$  で厳密に 3 重周期の長距離秩序 (Trimer 相) を示すモデルと,  $S=1$  の bilinear-biquadratic 相互作用で 3 重周期の準長距離秩序 (長距離秩序はないが, 相関距離が発散) の Trimer liquid (TL) 相を持つモデルとの間で, 相転移を調べた。

これについて, 共形場理論と繰り込み群を組み合わせたレベルスペクトロスコーピーを発展させた方法を用い, 数値対角化のデータを対数補正を考慮して解析した。その結果 Trimer 相- TL 相の相境界は, 場の理論の  $SU(3)$  Wess-Zumino-Witten モデルの臨界固定点と一致することを見出した。

2. 1 イオン異方性を伴う  $S=1$  XXZ スピン鎖と共形場理論 (白石, 野村):

1 イオン異方性を伴う  $S=1$  XXZ スピン鎖には、強磁性相、反強磁性 (Neel) 相の長距離秩序がある相の他、Haldane 相、Large D 相のような長距離秩序がなく相関距離有限な相や、XY1, XY2 相のような長距離秩序がなく相関距離が発散している相がある。

このうち、特に XY1 相, XY2 相, Haldane 相, Neel 相の 4 つの相について調べた。扱ったモデルではパラメータ 2 つなので、2 相の相境界は線、3 相は点で接するが、4 相以上の共存は無いはずである。ところが Schulz (1986) はボソン化理論で、XY1 相, XY2 相, Haldane 相, Neel 相の 4 つの相が 1 点で交わると予想した。しかし従来の数値計算方法では、4 相が 1 点で交わるようには見えない。

この問題について我々は、共形場理論をつかった新しい数値計算方法を開発し、4 つの相が 1 点で交わることを確かめた。

3. 非線形磁化率の研究 (緒方, 野村):

今まで磁化-磁場曲線や帯磁率を数値計算で求め実験と比べることは盛んになされてきた。しかし非線形帯磁率についての研究は少ない。我々は可積分な  $S=1/2$  XXZ スピン鎖のエネルギーの磁化に対する高階微分を調べてきたが、これを発展させ非可積分な  $S=1$  XXZ スピン鎖でエネルギーの磁化に対する高階微分を数値的に求め、ユニバーサリティクラスの違いを研究する。

4. スピンが大きな系における非自明な  $SU(2)$  対称性 (小野山, 野村):

$S=1$  XY 系に 1 イオン異方性があるモデルで非自明な  $SU(2)$  対称性が知られていた。これを発展させ、 $S=1$  bilinear-biquadratic スピン鎖でも非自明な  $SU(2)$  対称性を調べている。また、 $S=3/2$  スピン鎖でも非自明な  $SU(2)$  対称性があることを見出した。これらは Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移などと関係することが予想されるが、他にも特異なことがあるかもしれない。

## 発表論文

### 《原著論文》

“Critical phenomena around the  $SU(3)$  symmetric tricritical point of a spin-1 chain”:

T. Mashiko and K. Nomura,

Phys. Rev. B **107**, (2023) 125406

《その他の論文》

## 著書

## 講演

《海外での講演》

《国内での講演》

1. 一次元スピン1量子系における臨界点近傍の物理現象  
益子通生流, 野村清英  
日本物理学会 2022 年秋季大会 (物性)
2. 1 イオン異方性を伴う  $S=1XXZ$  スピン鎖と共形場理論  
白石修一, 野村清英  
日本物理学会 2022 年秋季大会 (物性)
3.  $S=1$  スピン系における特殊な  $SU(2)$  対称性  
小野山幸輔, 野村清英  
日本物理学会 2023 年春季大会 (物性)
4. 共形場理論に基づく相境界判定手法の開発  
白石修一, 野村清英  
日本物理学会 2023 年春季大会 (物性)

## 外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

1. 木村 崇 (代表者)、大西 紘平、野村 清英 (分担者)、基盤 (S),  
「回転スピン流による再構成可能な超伝導量子デバイスの創成」

《文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

## 他大学での研究と教育

### 学部4年生卒業研究

### 修士論文

1. 緒方 健人：(指導教員, 野村 清英)：「 $S=1$  量子スピン鎖における非線形磁化率」
2. 小野山 幸輔：(指導教員, 野村 清英)：「 $S=1$  スピン系における特殊な  $SU(2)$  対称性」

### 博士論文

益子 通生流 (指導教員, 野村 清英)： “ Critical phenomena in the vicinity of the  $SU(3)$  symmetric tri-critical point of a spin-1 chain”

### 外国人留学生の受け入れ

### 学外での学会活動

### 受託研究・民間との共同研究

### その他の活動と成果

# 凝縮系理論

## 研究室構成員

野村健太郎 教授

《 博士研究員 》

小林浩二 仲井良太

《 学部 卒業研究生 》

目黒智成

《 研究生 》

小沢耀弘, 木村春貴

## 担当授業

現代物理学基礎 (野村健太郎), 原子分子の量子力学 (野村健太郎), 素励起物理学 (野村健太郎), 物理学ゼミナール (野村健太郎)

## 研究・教育目標と成果

**カゴメ格子系における磁気秩序のドーピング依存性の研究** (小沢耀弘, 野村健太郎)

有効モデルと Hartree-Fock 法に基づいて、積層カゴメ系  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  における磁性に対するキャリアドーピング効果を理論的に研究した (図 9)。電子の充填と磁気秩序パラメータの温度依存性を示す。垂直強磁性秩序は正孔ドーピングによって抑制され、ドーピングされていない  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  は磁性ワイル半金属状態を示す。電子ドーピング領域では、非共線的な反強磁性秩序が見られる。特に、非共線的な反強磁性状態では、特定のスピン軌道結合を考慮することにより、有限軌道磁化と異常ホール伝導率が得られた。単純なカゴメ格子モデルでも、電子の充填に応じて強磁性と非共線性反強磁性の両方の秩序をホストできること、カゴメ格子の特徴であるディラックバンドとフラットバンドのギャップ構造と磁気秩序の関係を明らかにした。Kane-Mele 型または Rashba 型のスピン軌道結合から、スピン間に有効なジャロシンスキー・守谷相互作用が誘起し、磁気スパイラルや 120 度反強磁性秩序などの非共線的秩序を安定化する傾向を見出した。得られた相構造は、ワイル電子またはディラック電子によるさまざまなカゴメ層状材料の磁気秩序の定性的理解に役立つ。

**強磁性ワイル半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  における磁気スピンホール効果** (小沢耀弘, 小林浩二, 野村健太郎)

強磁性秩序を有する積層カゴメワイル半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  におけるスピンホール効果を有効モデルに基づき解析した。スピン軌道相互作用として Kane-Mele 型と交替 Rashba 型の 2 種類を考慮した。前者はカゴメ面内にある Sn 元素に由来し、後者は面間の Sn 元素に由来する。スピンホール流として、カゴメ格子に対して面内方向に流れるもの (面内スピンホール流) と積層方向に流れるもの (面直スピンホール流) の 2 種類に着目した。これらのスピン流のスピンホール伝導率が磁気モーメントの方向に応じて劇的に変化することを明らかにした。特に、交替 Rashba 型スピン軌道相互作用によって誘起する、面直スピンホール流は表面スピン蓄積を誘発する可能性があり、これはスピン軌道トルクによる垂直磁化スイッチングに用いられることを指摘した。

**偶数分母分数量子ホール状態におけるアンドレーエフ的反射** (野村健太郎)

磁場中 2 次元電子系の偶数分母占有率で実現すると考えられているパフィアン分数子ホール状態の端状態と整量子ホール状態の端状態の間のトンネル輸送を研究した。強トンネル領域と弱トンネル領域の間のデュアリティーの議論に基づいて、我々はアンドレーエフのような反射が強いトンネル領域に現れることを発見した。低電圧限界の弱トンネル領域と強トンネル領域における電荷コンダクタンスを計算した。弱トンネル領域では、微分コンダクタンス  $dI/dV$  はバイアス電圧  $V$  の  $V^{1/\nu}$  に比例する (ただし  $\nu = 1/2$ ) ことを明らかにした。これに対し、強トンネル領域では、 $dI/dV$  は補正項を含めて  $\frac{e^2}{h} \frac{2\nu}{1+\nu}$  で表される。この条件は、 $\nu = 5/2$  の分数量子ホール状態と  $\nu = 3$  の整量子ホール状態の間の点接触において実験的に実現できることを指摘した。

## 発表論文

《原著論文》

T. Seki, Y.-C. Lau, J. Ikeda, K. Fujiwara, A. Ozawa, S. Iihama, K. Nomura, A. Tsukazaki, “Enhancement of Spin-Charge Conversion Efficiency for  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  across Transition from Paramagnetic to Ferromagnetic Phase”, *Phys. Rev. Research* 5, 013222 (2023).

Q. Wang, Y. Zeng, K. Yuan, Q. Zeng, P. Gu, X. Xu, H. Wang, Z. Han, K. Nomura, W. Wang, E. Liu, Y. Hou, and Y. Ye “Magnetism modulation in  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  by current-assisted domain wall motion”, *Nat. Electron* 6, 119 (2023).

R. Ohashi, R. Nakai, T. Yokoyama, Y. Tanaka, K. Nomura, “ Andreev-like Reflection in the Pfaffian Fractional Quantum Hall Effect ”, J. Phys. Soc. Jpn. 91, 123703 (2022).

J. Watanabe, Y. Araki, K. Kobayashi, A. Ozawa, K. Nomura “ Magnetic orderings from spin-orbit coupled electrons on kagome lattice ” J. Phys. Soc. Jpn. 91, 083702 (2022). [Editor’s Choice]

《 その他の論文 》

## 著書

## 講演

《 海外での講演 》

Theory of spin/charge transport and magnetic orderings in stacked-kagome lattice Weyl semimetal

Akihiro Ozawa, Koji Kobayashi, Kentaro Nomura

American Physical Society March meeting

Controllable anomalous Hall effect in topological Dirac semimetals

Koji Kobayashi, Kentaro Nomura

American Physical Society March meeting

Edge-Induced Pairing States of the Josephson Current in a Spin-Polarized Quantum Anomalous Hall Insulator

Ryota Nakai, Kentaro Nomura, Yukio Tanaka

American Physical Society March meeting

《 国内での講演 》

積層カゴメ格子系におけるワイル・ディラック半金属状態およびスピン電荷輸送の理論

小沢 耀弘, 小林浩二, 野村健太郎

日本物理学会秋季大会

3次元多層系における高次トポロジカル超伝導相

仲井良太, 野村健太郎

日本物理学会 2023 春季大会

磁性ワイル半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  有効模型におけるスピン/異常ホール効果の理論解析

小沢 耀弘, 小林浩二, 野村健太郎

日本物理学会 2023 年春季大会

カゴメ層状強磁性ワイル半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜におけるホール伝導度の数値計算

小林浩二, 小沢 耀弘, 野村健太郎

日本物理学会 2023 年春季大会

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 B(一般)

強結合ハイブリッド開放量子系における創発量子化現象

研究代表者：野村健太郎

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

CREST トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出（上田正仁総括）トポロジカル機能界面の創出

主たる共同研究者：野村健太郎 （研究代表者：塚崎敦）

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

なし

## 他大学での研究と教育

野村健太郎：東北大学と磁性ワイル半金属の共同研究を行い、スピン流の理論解析を担当した。

## 学部 4 年生卒業研究

目黒智成：(指導教員, 野村健太郎)：フェリ磁性ワイル半金属の有効模型構築

#### 修士論文

なし

#### 博士論文

なし

#### 外国人留学生の受け入れ

なし

#### 学外での学会活動

東北大学金属材料研究所計算材料学センター共同利用委員

#### 受託研究・民間との共同研究

なし

#### その他の活動と成果

なし

# 数理物理

## 研究室構成員

成清修 准教授

《 学部 卒業研究生 》

中村草平 東川竜也

## 担当授業

相転移の統計力学 (成清修)、物理学入門 IIB (成清修)、物理学総論 (成清修)、教職実践演習 (成清修)

## 研究・教育目標と成果

### ホール伝導度とフェルミ面の曲率の関係を明らかにした (成清修)

昨年度の報告において、「金属のホール伝導度をフェルミ面の曲率で表現するプロジェクトが完結したと宣言したが早計であった。Haldane の提唱した枠組みについては理解が達成されたとするのが正確であった。この枠組みはフェルミ面の法線ベクトルを用いたものであるが、電子が磁場中でサイクロトロン運動をしているという物理の記述には、実は適していないことに気付いた。電子の運動の軌道に沿った接線ベクトルを用いれば自然な記述が可能である。この方向で研究を進めている。」としていたが、この方向で最終的な結果を得て出版した。Chambers 公式による説明が最も直観的であった。[原著論文・その他の論文]

### 曲がった時空における量子論の圏論的定式化を行いつつある (成清修)

昨年度の報告において、「量子論と重力理論の統合は理論物理学の大きな課題である。しかし、本当に量子重力の理論は必要なのか。我々は時空は古典的であり、曲がった時空において量子論が定式化できれば十分であると考えて研究を進めている。どのような意味で十分なのかを、今後数年をかけて説明していく計画である。今年度は、研究の見通しを立てた。」としていた。今年度は、観測者の役割に注目した論考をまとめた。作用素環における接合積が観測状況の記述となっていることがポイントであった。[その他の論文]

## 授業の教材を公開した (成清修)

授業のために作成した教材 (シャノンのエントロピー、ボルツマンのH定理、マクスウェルのデモンなどを論じた) をQIRで公開した。

物理学入門：エントロピーについて

<https://hdl.handle.net/2324/6758968>

## 発表論文

《 原著論文 》

Geometrical Interpretation of Hall Conductivity in Metals

Osamu Narikiyo

Journal of the Physical Society of Japan, **91** (2022) 125001

《 その他の論文 》

An Observer in Curved Spacetime

Osamu Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/6618265>)

Geometrical interpretation of Hall conductivity in metals

Osamu Narikiyo

arXiv:2211.05761

## 著書

## 講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

中村草平：(指導教員、成清修)：場の量子論における観測者の役割

東川竜也：(指導教員、成清修)：場の量子論のエントロピー

修士論文

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

# 磁性物理学

## 研究室構成員

和田 裕文 教授

光田 暁弘 准教授

《 大学院 修士課程 》

川本 大雅 白木 陽 矢野 直樹 中島 怜

横枕 拓八

《 学部 卒業研究生 》

菊元 洸希 木村 哲平

《 訪問研究者 》

小口多美夫 (大阪大学基礎工学研究科特任教授)

## 担当授業

熱力学 A (和田裕文)、熱力学 B (和田裕文)、物性物理学 III (和田裕文)、電磁気学基礎 (和田裕文)、熱力学基礎 (和田裕文)、物性物理学 I (光田暁弘)、電磁気学基礎 (光田暁弘)、熱力学基礎 (光田暁弘)、物理学総合実験 (光田暁弘)

## 研究・教育目標と成果

一次転移を利用した液体水素～天然ガス液化温度領域における磁気冷凍材料の開発 (和田裕文、白木陽)

$Gd_5Ge_4$  は 20～60K で強磁性から反強磁性に一次転移し、大きな磁気エントロピー変化を示す。この大きな磁気エントロピーの温度領域をコントロールするため第三元素で置換する研究を行っている。今年度は Ge を Si や Ga で置換した系について磁気エントロピー変化を調べた。Si で置換すると一次転移温度が上昇し、同時に磁気エントロピー変化が大きくなる。Ga 置換でも一次転移温度は上昇するが、7%を超えると一次転移が消失して二次転移になる。一次転移の組成範囲ではやはり磁気エントロピー変化は大きくなる。ふつう一次転移温度が上昇すると磁気エントロピー変化は小さくなるので、これらの現象は極めて珍しい。考察の結果これは一次転移が強磁性から反強磁性への転移であるためということが明らかになった。また Ga 置換で一次転移が消失するのは、強磁性が壊れる温度が反強磁性のネール温度よりも高くなるためであるこ

ともわかった。これらの結果は低温での磁気冷凍材料の開発指針となるものである。

#### 遍歴電子メタ磁性のホール効果 (和田裕文、田邊巧祐)

磁性体のホール効果は正常ホール効果と異常ホール効果の和で表される。強磁性のホール抵抗の磁場依存性を解析すると強磁性の正常ホール係数や異常ホール係数を評価することができる。一方常磁性のホール効果では正常ホール効果も異常ホール効果も磁場に比例するので、両者をうまく分離するのは難しい。遍歴電子メタ磁性体では同じ温度でも磁場によって常磁性と強磁性の両方が現れるため、ホール抵抗の磁場依存性を解析すると強磁性領域でも常磁性領域でも正常ホール係数を見積もることが可能となる。我々はこのような考えで遍歴電子メタ磁性体のホール効果を調べている。今年度は  $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$  の結果を解析した。この系の正常ホール係数は強磁性ではプラスであるが、常磁性ではマイナスになる。バンド計算の結果、常磁性でマイナスになるのはフェルミレベルの変化によってホールのフェルミ面が消失し、電子のフェルミ面の寄与が大きくなるためであると解釈されることがわかった。また  $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  化合物についても解析を進めている。

#### Eu 系価数揺動物質の単結晶育成と化学的圧力および静水圧力効果 (和田裕文、光田暁弘、川本大雅、中島怜)

Eu 化合物における 4f 電子の不安定性に起因する価数転移現象に注目して研究を行っている。EuNi<sub>2</sub>(Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)<sub>2</sub> 系に注目し、これまで難しかった単結晶試料の育成に成功した。多結晶試料では Ge 濃度の不均一のために価数転移がブロードニングを起こしたり、磁性不純物が混入するために最低温度で磁化率の発散が見られるなど、Eu 価数の不安定性に起因する本質的な振舞を観測することが阻害されていた。この単結晶を用いて圧力下の磁化測定を行ったところ、圧力印加とともに価数転移が高温へシフトしながらブロードになっていく様子が明らかになった。また、低温の磁化率は徐々に抑制されていき、4f 電子の伝導バンドへの寄与が少なくなっていくことも明らかになった。さらに、最低温まで Eu が価数揺動状態を保ち、例外的に重い電子的振舞を示す EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> に注目し、原子置換により Eu の価数状態を制御することを試みている。次年度は EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> の振舞について原子置換効果と圧力効果を組み合わせてより深く追究していく。

#### Yb 系価数転移物質の中性子回折および Ca 置換効果 (和田裕文、光田暁弘、横枕拓八)

価数秩序を示しながら金属的な電気伝導を示す YbPd に注目して研究を行っている。価数秩序状態において Yb<sup>3+</sup> 層と Yb<sup>2.6+</sup> 層が交互に積層しているが、この際、2.6 価という非整数価数をとる物質は非常に珍しい。これが原因となって、価数秩序にもかかわ

らず伝導電子が供給され、伝導電子による局在モーメントの遮蔽効果である近藤効果が誘起されることが明らかになっている。本年度は、Ybをイオン半径が小さい非磁性2価イオンのCa<sup>2+</sup>で一部置換することによる価数秩序への影響を調べた。その結果、価数秩序は抑制される傾向を示した。また、YbPdは $T = 1.9$  K以下で非整合なサイン波磁気構造を示すことが明らかになっているが、より低い温度で整合磁気構造に転移することが予想されている。このことを調べるために原子力研究開発機構のJRR-3で単結晶中性子回折実験を行った。今のところ、 $T = 0.5$  K以下で磁気伝播ベクトルが変化している(磁気構造が変化している)ことが明らかになったが、整合磁気構造の証拠は得られていない。次年度は、これらの点をより詳しく調べて行く。

### スピントロニクス現象の圧力効果 (光田暁弘、矢野直樹)

スピントロニクス分野に圧力効果の研究手法を導入することを目指して固体電子物性研究室と共同で研究を行っている。これまでの研究で異方性磁気抵抗効果から見いだしたNi薄膜の圧力誘起垂直磁気異方性について、より直接的に観測することを目的として、高圧下で磁化測定を行った。測定装置には試料振動型磁束計(VSM)と量子干渉素子(SQUID)磁束計の2つの手法を用いた。軽量の圧力セルを用いることでVSMでの測定が可能になるとともに、セルの磁化の影響を差し引くのもVSMの方が容易であることがわかったためVSMによりデータを取得した。この結果、基板の素材の違いによりNi薄膜の垂直磁気異方性の違いが明らかになった。今のところ、基板によるクランプングによる一軸的な圧力の影響が考えられる。一方、SQUID磁束計はより高感度で広範囲の温度・磁場範囲での測定が可能であるメリットもあるため、こちらの測定手法でもセルの磁化の差し引き方法の確立を引き続き目指していく。

### 発表論文

#### 《原著論文》

Anisotropic magnetization and electronic structure of the first-order ferrimagnet ErCo<sub>2</sub> studied by polarization dependent hard X-ray photoemission spectroscopy:

Amina A. Abozeed, Denis I. Gorbunov, Toshiharu Kadono, Yuina Kanai-Nakata, Kohei Yamagami, Hidenori Fujiwara, Akira Sekiyama, Atsushi Higashiya, Atsushi Yamasaki, Kenji Tamasaku, Makina Yabashi, Tetsuya Ishikawa, Hirofumi Wada, Alexander V. Andreev, and Shin Imada

Physica B. vol. **649** (2023) 414465 (11 pages).

Hall effect of RCo<sub>2</sub> (R= Er and Lu) compounds:

Kosuke Tanabe, Shintaro Hatoyama, Hirofumi Wada, Alexander V. Andreev, Kunihiko Yamauchi, Tamio Oguchi, Hisatomo Harima

J. Alloys Comd. vol. **960** (2023) 170743 (9 pages).

高圧力下における YbPd の価数秩序の崩壊と量子価数揺らぎの誘起:

光田 暁弘, 大山 耕平, 和田 裕文, 平尾 直久, 河口 沙織, 大石 泰生, 郷地 順, 上床 美也

高圧力の科学と技術 vol. **32** (2022) pp. 20-26

《 その他の論文 》

### 著書

スピントロニクスハンドブック 株式会社 NTS (2023) 第3章 磁気的基础 第1節 磁気モーメントと磁気状態 pp.21-26.(和田 裕文)

### 講演

《 海外での講演 》

Observation of Hybridization Gap in Heavy Fermion System EuNi<sub>2</sub>(P<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)<sub>2</sub> via Point-Contact Spectroscopy:

Masanobu SHIGA, Takuya TAKAHASHI, Tsubasa TERAMOTO, Isao MARUYAMA, Akihiro MITSUDA, Hirofumi WADA, Tatsuya KAWAE,

29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29)

《 国内での講演 》

Gd<sub>5</sub>(Ge<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>4</sub> (M=Si, Ga, Sn) の磁気熱量効果:

白木 陽, 和田裕文

第 128 回 日本物理学会九州支部例会

遍歴電子メタ磁性体 Co(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>2</sub> のホール効果:

田邊巧祐, 和田裕文, 前川佳朗, 山内邦彦, 小口多美夫, 播磨尚朝

第 128 回 日本物理学会九州支部例会

Gd<sub>5</sub>Ge<sub>4</sub> 系の磁気熱量効果:

和田裕文, 白木 陽, 木下啓也  
2022 年度 固体冷媒冷凍技術連絡会

強磁性/重金属界面における電流-スピン流変換の圧力変調:  
飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇  
日本物理学会 2022 年秋季大会

X 線分光法による温度誘起価数転移物質  $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$  の電子状態の研究:  
後藤田将史, 河村直己, 井角元, 佐藤仁, 上田茂典, 水牧仁一朗, 雀部矩正, 大山耕平, 光  
田暁弘, 和田裕文, 魚住孝幸, 三村功次郎  
日本物理学会 2022 年秋季大会

$\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  の点接合分光実験:  
志賀雅亘, 高橋拓哉, 寺本翼, 光田暁弘, 丸山勲, 和田裕文, 河江達也  
日本物理学会 2022 年秋季大会

強磁性/重金属界面における動的スピン注入の圧力効果:  
飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇  
第 46 回日本磁気学会学術講演会

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》  
科学研究費補助金、基盤研究 (C)  
一次相転移を利用した液体水素～窒素温度領域における磁気冷凍材料の開発  
研究代表者：和田裕文

科学研究費補助金、基盤研究 (C)  
スピナノ素子の圧力効果研究の確立  
研究代表者：光田暁弘

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

## 他大学での研究と教育

### 学部4年生卒業研究

菊元洸希：(指導教員、光田暁弘)：YbPdの価数秩序に対する一軸圧力効果

木村哲平：(指導教員、光田暁弘)：強磁性体/重金属接合におけるスピン輸送特性に対する圧力効果

### 修士論文

川本 大雅：(指導教員、光田暁弘)：価数転移物質  $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  の単結晶育成と磁性

白木 陽：(指導教員、和田裕文)： $\text{Gd}_5\text{Ge}_4$  の磁気熱量効果に対する置換元素の影響

矢野 直樹：(指導教員、光田暁弘)：強磁性薄膜を用いた垂直磁気特性の圧力変化

### 博士論文

## 外国人留学生の受け入れ

## 学外での学会活動

## 受託研究・民間との共同研究

## その他の活動と成果

和田裕文：Elsevier 社 Physica B エディター

光田暁弘：九州大学低温センター運営委員

光田暁弘：九州大学超伝導システム科学研究センター運営委員

# 光物性

## 研究室構成員

中村祥子 准教授

## 担当授業

物理学入門 IIB(中村祥子)

## 研究・教育目標と成果

### 鉄系超伝導体によるテラヘルツ非線形応答の研究 (中村祥子)

テラヘルツ波の光子エネルギーは、超伝導ギャップと同程度のオーダーであり、超伝導体特有のさまざまな素励起にも相当している。本年度は、前職で鉄系超伝導体の磁束量子に対して行った遮蔽電流存在下のテラヘルツ第2高調波 (SHG) 測定の結果を解析し、超高速で運動する磁束量子の動的特性について研究した。次年度は、その結果をまとめるとともに、より低温・大電流の測定を行うための要素技術を開発したい。

### サブテラヘルツ波パルス光源の開発 (中村祥子)

物性研究のためのサブテラヘルツ波パルス光源の開発に向けて、フェムト秒パルス再生増幅器および測定機器類の移設と新規導入を行った。また、低温成長 InGaAs 基板への微細加工と特性評価を開始した。次年度は、光学測定のための環境を整備し、光源開発を本格化する予定である。

## 発表論文

《原著論文》

《その他の論文》

## 著書

## 講演

《 海外での講演 》

Collective modes in iron chalcogenide superconductors  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  studied by terahertz third-harmonic generation

H. Matsumoto, S. Nakamura, H. Ogawa, T. Kobayashi, N. Shikama, F. Nabeshima, A. Maeda, R. Shimano

Spectroscopies of Novel Superconductors 2022 (SNS2022), Dec. 13, 2022, Bangalore

《 国内での講演 》

テラヘルツ非線形振動子としての磁束量子

中村祥子

第 28 回 渦糸物理ワークショップ, 2022 年 12 月 15 日 (オンライン)

テラヘルツ第三高調波発生を用いた鉄系超伝導体  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  における集団励起モードの観測

松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 色摩直樹, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮

京都大学基礎物理学研究所研究会「非自明な電子状態で発現する超伝導現象の新しい潮流」 2022 年 12 月 22 日 (京都大学)

鉄系超伝導体  $\text{FeSe}$  のネマティック超伝導状態におけるテラヘルツ第三高調波発生

松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮

第 14 回低温科学研究センター研究交流会 2023 年 2 月 16 日 (東京大学)

**外部資金**

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、若手研究

電流注入法により導入した時間・空間反転対称性の破れによる非相反電荷輸送現象の観測

研究代表者：中村祥子

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

JST さきがけ、革新光：革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出

高強度サブテラヘルツ波パルスで操る超伝導ナノ磁気構造ダイナミクス  
研究代表者：中村祥子

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

修士論文

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

# 固体電子物性

## 研究室構成員

木村崇 教授

大西紘平 助教      山田和正 助教

荒井毅 准助教

《 博士研究員 》

Shaojie Hu      Dion Troy

《 大学院 博士課程 》

鄭 剛 (Zheng Gang)      岩堀拓真      大日方初良      高山裕成

一兜 博人

《 大学院 修士課程 》

宮崎圭司      愛智 遼太郎      井上 建吾      公田 悠樹

榊本 浩克      溝上 航平      山崎太志郎      小安 凱人

劉 松儒

《 学部 卒業研究生 》

梶間 廉      小谷 悠太      田中 智也      入倉 大輔

神本 晋作      木村 哲平

## 担当授業

基礎物理実験学・同実験 (大西紘平)、自然科学総合実験 (山田和正)、物理学総合実験 (大西紘平、山田和正、荒井毅)、基幹物理学II(木村崇)、物理学入門I(木村崇)、電磁気学概論、熱力学概論 (農) (木村崇)、原子分子の量子力学 (木村崇)、力学概論演習 (木村崇)

## 研究・教育目標と成果

パラメトリック励起スピン波による発熱現象の解析 (木村崇、田中智也)

強磁性共鳴を励起した際に生じる動的スピン注入現象において、スピンプンピングがそのメカニズムとして広く知られている一方、近年、強磁性共鳴による発熱現象に伴う動的な熱スピン注入現象の寄与も指摘されている。そこで我々は、高強度な高周波磁界の印加によるパラメトリック励起スピン波を用いた動的スピン注入についてもそ

の発熱現象の寄与を調査した。

#### **強磁性体/非磁性体二層構造における非共鳴交流電気信号の解析** (木村崇、梶間廉)

近年、強磁性共鳴を利用したスピンプンピングなどのスピンドル生成現象が注目を集めている。しかしながら、強磁性共鳴は非接触かつ容易に励起が可能な一方で、高周波磁場の他に強い外部磁場を必要とするため、スピントロニクスデバイスへの応用には適していない。そこで、強磁性体/非磁性体の二層構造において強い外部磁場が不要な非共鳴過程における高周波電気磁気信号の解析を行った。

#### **異種物質界面におけるスピン輸送特性の理論的・実験的評価** (木村崇、山崎太志郎)

異種金属界面では空間的対称性の破れによって、電流-スピン流の変換が可能となるラシュバ効果が発現する。ラシュバ効果による電流-スピン流の変換効率は界面を構成する異種金属の仕事関数の差に依存することが知られており、また A-15 構造と同様に巨大な変換効率を持つことが知られている。本研究では A-15 構造と似た構造を持つ  $\beta$  タンタルと、非磁性金属の界面に対して、第一原理計算を用いて予測した物性からラシュバ効果の評価を行い、その後スピン注入実験等の実験的実証を行う。

#### **電界歪み挙動を基とした Pt/CoFeB2 層膜におけるスピン電流変換の電界制御** (一兜博人、木村崇)

強誘電/強磁性体のマルチフェロイック界面を利用したスピン物性の電界制御を目的とし、強誘電体 PMN-PT 基板上に成膜された Pt/CoFeB2 層膜における電界歪み挙動を基としたスピン電流変換現象の制御に関する評価を行った。その結果、サイドゲーティングにより Pt/CoFeB 2 層膜への歪み伝播が支配的な 20% 以上の変調効果が得られており、CoFeB の磁気異方性の変調や Pt/CoFeB 2 層膜のスピン生成・拡散などから考察を行っている。

#### **圧力印加によるチューナブルな界面電子状態の実現と新奇スピデバイスへの応用** (木村崇、飯森陸)

異種物質界面におけるスピン軌道相互作用に起因した電流とスピン流の相互変換現象は高効率な磁化反転などへの応用が期待されている一方で、界面の原子間距離に極めて敏感であり、圧力印加により大きな変化を誘引できる可能性がある。そこで、前年度までに確立した高圧力下におけるスピンドル物性の評価手法を界面ラシュバ効果によるスピンドル-電流変換現象に適用することで、変換効率の飛躍的向上のための設計指針の確立を目指す。更にその知見をもとに、界面圧力による巨大スピンドル流の生成や、磁気スキルミオンの生成・消滅などの革新的な界面スピンドル物性の圧力制御の実現を目指す。

### **アモルスファスカーボンに対する熱スピン注入 (山田和正)**

有機物中のスピン流は近年注目されている。温度差を利用して有機物中の熱スピン流の生成を試みている。CoFeAl をスピン流生成層、カーボン をスピン流通過層、Pt をスピン流検出層とする膜を成膜し、クロスバー構造に微細加工した。ジュール加熱し、Pt 層の電圧発生を確認した。CoFeAl 層からアモルスファスカーボンに熱スピン流注入を観測できたと考えられる。強磁性層のネルンスト効果の寄与との分離が課題である。

### **超伝導体 Al におけるスピン偏極準粒子の緩和機構の評価 (岩堀 拓真)**

超伝導体を伝導するスピン偏極準粒子の緩和長は、超伝導状態でのスピン拡散長と相関がある可能性が示唆されている。本研究では、スピン拡散長が比較的長い超伝導 Al を用いて現状未解明であるスピン偏極準粒子の緩和機構を実験的に明らかにすることを目的としており、微細構造を用いてスピン非偏極、及びスピン偏極準粒子の緩和長をそれぞれ評価・比較することで、スピン偏極状態が緩和過程に影響を与える機構の解明を目指す。

### **非共鳴時における動的スピン注入現象の定性的評価 (大日方、木村)**

スピン流の生成手法として、近年、強磁性体の磁化歳差運動の共鳴 (FMR) 及びこれに伴う発熱を利用した動的スピン注入が注目されている。一方、非共鳴過程における動的スピン注入に関しては検出信号が微小であることが予想されており、その詳細を調査することが困難であった。そこで本研究では微小信号を検出可能な独自の素子構造を用いて実験を行った。一連の実験で得られた結果は、低磁場で励起されるスピン波に伴う動的スピン注入の存在を示した。

### **反転非対称性・準周期性のフォノンによる熱伝導 (荒井毅)**

反転非対称性・準周期性等既存の結晶での研究の難しい系の特徴を低温でのフォノンによる熱伝導という長波長近似等を用いて特徴を明らかにしやすい系で探る。光や電子系に比べ注目されていないフォノン系を狙う。熱制御は応用上エネルギー問題・環境問題にも重要である。

## **発表論文**

《 原著論文 》

Pressure-induced enhancement of spin-charge conversion efficiency in CoFeB/Pt bi-

layer:

R.Imori, S.Obinata, A.Mitsuda, and T.Kimura,  
Applied Physics Express, **15** (2022) pp. 033003

Influence of heat flow control on dynamical spin injection in CoFeB/Pt/CoFeB trilayer:  
S.Obinata, R.Imori, K.Ohnishi, and T.Kimura:  
Sci. Rep.**12**, (2022) pp.3467

Enhanced spin accumulation in nano-pillar-based lateral spin valve using spin reservoir effect:

X.Cui, S.Hu, and T.Kimura,  
J. Phys. D: Appl. Phys., **55** (2022) pp.165004

Experimental Evaluation of 3D Heat Flow Using Magneto-Thermoelectric Effects in a Ferromagnetic Nanowire:

M.Kamruzzaman, S.Hu, K.Ohnishi, and T.Kimura,  
Phys. Status Solidi RRL, **16** (2022) pp.2100608

Relaxation process of spin-polarized quasiparticles in a superconducting Nb wire:

T. Iwahori, K. Mizokami, R. Matsuda, K. Ohnishi, and T. Kimura,  
IEEE Trans. Magn., **58** no.2 (2022) pp.9000304

Quantitative evaluation of heating effect on dynamical spin injection using CoFeB/Pt/CoFeB trilayered film:

S. Obinata, R. Imori, K. Ohnishi, and T. Kimura,  
IEEE Trans. Magn., **58** no.2, (2022) pp.4100404

The positive exchange bias property with hopping switching behavior in van der Waals magnet FeGeTe:

S.Hu, X.Cui, Z.Yue, P.Wang, L.Guo, K.Ohnishi, X.Wang, and T.Kimura,  
2D Mater., **9** (2022) pp.015037

《 その他の論文 》

## 著書

## 講演

### 《 海外での講演 》

Reconfigurable Spin-wave Dispersion in Continuous Magnetic Layer Induced via Artificial Spin Ice Magnonic Crystal:

Troy Dion, Hidekazu Kureyabashi, Will R. Branford, Takashi Kimura, Jack C. Gartside, Daan M. Arroo, Alexander L. Vanstone, and Kilian D. Stenning,  
APS March Meeting 2023, Las Vegas, US (March 2023).

The Modulation of Non-Local Spin Signals by Thermal Spin Injection in Co/Graphene:  
Gang Zheng, Shaojie Hu, and Takashi Kimura,

24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

Electric Field Modulation of Magnetic Anisotropy in FeSiB/PMN-PT Multiferroic Heterostructure:

Yusei Takayama, Amany E. Harby, Shaojie Hu, Takashi Kimura,

24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

Spincurrent transports in bilayer spin channels:

Kohei Mizokami, Kazumasa Yamada, Taisei Arika, Daiki Ito, Kohei Ohnishi, and Takashi Kimura,

24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

The positive exchange bias property with hopping switching behavior in van der Waals magnet FeGeTe:

Shaojie Hu, Xiaomin Cui, Zengji Yue, Pangpang Wang, Lei Guo, Kohei Ohnishi, Xiaolin Wang, and Takashi Kimura,

24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

Electric field influence of spin conductivity in CoFeB/Pt/PMN-PT multi-phase structure:

Hiroto Hitotsukabuto, Riku Iimori, Sora Obinata, Kohei Ohnishi, and Takashi Kimura, 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

Pressure-induced modulation of spin-charge conversion in Pt/CoFeB film:

Riku Iimori, Sora Obinata, Akihiro Mitsuda, and Takashi Kimura, 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

Influence of FMR Heating on Dynamical Spin Injection in CoFeB/Pt/CoFeB Trilayer:

Sora Obinata, Riku Iimori, Kohei Ohnishi, and Takashi Kimura, 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

Three-dimensional heat analysis using magneto-thermoelectric effects in a ferromagnetic nanowire:

Yamada Kazumasa, K. Inoue, Md Kamruzzaman, S. Hu, K. Ohnishi, and T. Kimura, 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022), Okinawa (Hybrid), JAPAN (July 2022)

《国内での講演》

超伝導/常伝導体界面によるスピン流制御:

大西紘平

第70回 応用物理学会 春季学術講演会, 上智大学 (2023年3月)

PMN-PT 基板を用いた超伝導 Nb 細線における準粒子緩和過程の電界制御:

入倉大輔, 岩堀拓真, 大西紘平, 木村崇

日本物理学会 第128回九州支部例会, 熊本大学 (2022年12月)

低温水素吸蔵を用いた PdH<sub>x</sub> の超伝導転移の研究:

加藤遼馬, 古賀陸生, 吉田展一朗, 飯森陸, 大日方初良, 大西紘平, 木村崇, 河江達也

日本物理学会 第 128 回九州支部例会, 熊本大学 (2022 年 12 月)

低温水素吸蔵を利用した Pd 薄膜の電気抵抗測定:

吉田展一郎, 加藤遼馬, 古賀陸生, 飯森陸, 大日方初良, 大西紘平, 木村崇, 河江達也  
日本物理学会 第 128 回九州支部例会, 熊本大学 (2022 年 12 月)

マルチフェロイク構造と磁気熱電効果を用いた強誘電体基板の熱伝導率の測定:

小谷悠太, 井上建吾, 一兜博人, 胡少杰, 大西紘平, 山田和正, 木村崇  
日本物理学会 第 128 回九州支部例会, 熊本大学 (2022 年 12 月)

Ag/Bi 界面におけるラシュバ・エデルシュタイン効果の電氣的測定の試み:

神本晋作, 飯森陸, 大日方初良, 大西紘平, 木村崇  
日本物理学会 第 128 回九州支部例会, 熊本大学 (2022 年 12 月)

第一原理計算に基づく  $\beta$ -タンタルの構造安定性および量子輸送特性の評価:

山崎太志郎, 飯森陸, 木村崇  
日本物理学会 第 128 回九州支部例会, 熊本大学 (2022 年 12 月)

低温で水素吸蔵した PdH<sub>x</sub> 薄膜の電気抵抗測定:

加藤遼馬, 古賀陸生, 志賀雅亘, 大日方初良, 飯盛陸, 大西紘平, 木村崇, 河江達也  
日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学 (2022 年 9 月)

強磁性/重金属界面における電流-スピン流変換の圧力変調:

飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇  
日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学 (2022 年 9 月)

Nb/Cu オーミック接合における超伝導準粒子吸収効果:

岩堀拓真, 入倉大輔, 神本晋作, 溝上航平, 大西紘平, 木村崇  
日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学 (2022 年 9 月)

PMN-PT 基板を用いた Pt/CoFeB 二層膜系スピンダイナミクスの電界制御:

一兜博人, 飯森陸, 大日方初良, 大西紘平, 山田和正, 木村崇  
日本磁気学会 第 46 回学術講演会, 信州大学 (2022 年 9 月)

強磁性/重金属界面における動的スピン注入の圧力効果:

飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇  
日本磁気学会 第46回学術講演会, 信州大学 (2022年9月)

強磁性共鳴発熱効果により誘引される動的熱スピン注入の定量的評価:  
大日方初良, 飯森陸, 大西紘平, 木村崇  
日本磁気学会 第46回学術講演会, 信州大学 (2022年9月)

ピエゾ効果を用いたスピンホール角の電界変調の試み:  
一兜博人, 飯森陸, 大日方初良, 大西紘平, 木村崇  
日本物理学会 第77回年次大会, オンライン (2022年3月)

電流磁気効果の抑制による動的スピン注入の詳細機構の解明:  
大日方初良, 飯森陸, 公田悠樹, 榎本浩克, 大西紘平, 木村崇  
日本物理学会 第77回年次大会, オンライン (2022年3月)

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》  
科学研究費補助金、基盤研究 (S)  
回転スピン流による再構成可能な超伝導量子デバイスの創成  
研究代表者：木村崇

科学研究費補助金、挑戦的研究 (開拓)  
ナノスピンドYNAMICSを基軸とした革新的流体制御技術の開拓  
研究代表者：木村崇

科学研究費補助金、基盤研究 (C)  
トリプレット超伝導電流におけるスピン偏極率の電気伝導測定  
研究代表者：大西紘平

科学研究費補助金、基盤研究 (C)  
有機スピンゼーベック素子の創成  
研究代表者：山田和正

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

戦略的創造研究推進事業 CREST

界面マルチフェロイク材料の創製

主たる共同研究者：木村 崇

### 日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

Troy Dion、文部科学省科学研究費補助金、特別研究員奨励費 マグノニック計算を  
目指した YIG/ナノ磁性体複合構造におけるスピンドイナミクス

### 他大学での研究と教育

#### 学部 4 年生卒業研究

神本晋作：(指導教員、木村崇)：Ag/Bi 界面におけるラシュバ・エデルシュタイン効果の電氣的測定

小谷悠太：(指導教員、木村崇)：マルチフェロイク構造と磁気熱電効果を用いた強誘電体基板の熱伝導特性の測定

入倉大輔：(指導教員、木村崇)：PMN-PT 基板を用いた超伝導 Nb 細線における準粒子緩和過程の電界応答

田中智也：(指導教員、木村崇)：パラメトリック励起を用いた動的スピン注入現象の評価

梶間廉：(指導教員、木村崇)：強磁性/非磁性体薄膜における MHz 帯の高周波電気信号の解析

#### 修士論文

愛智遼太郎：(指導教員、木村崇)：ナノスケール強磁性体における高強度高周波磁場下のスピンドイナミクス

公田悠樹：(指導教員、木村崇)：パーマロイ薄膜の強磁性共鳴に起因した整流電圧スペクトルの評価

溝上航平：(指導教員、木村崇)：純スピン流を用いた超伝導体/常伝導体界面伝導特性の評価

井上建吾：(指導教員、木村崇)：ナノスケール磁性細線における磁気熱電効果に関する研究

## 博士論文

### 外国人留学生の受け入れ

劉 松儒、鄭 剛

### 学外での学会活動

### 受託研究・民間との共同研究

### その他の活動と成果

# 複雑物性基礎

## 研究室構成員

木村 康之 教授  
稲垣 紫緒 准教授  
小林 史明 助教

《 博士研究員 》

《 大学院 博士課程 》

齊藤 圭太

《 大学院 修士課程 》

林 和気 井上 颯大 野見山 直弥 米田 翔一  
山科 スミレ 山口 雅也 大野 燎 田中 健太郎  
岩崎 暖人 津田 健吾 井出 健一郎 宮崎 陸  
橋本 明伸 河野 快

《 学部 卒業研究生 》

河野 龍之介 村上 亮太 松田 朝之

《 研究生 》

《 訪問研究者 》

## 担当授業

物理学の進展 (木村康之)、振動と波動 (木村康之)、複雑系物理学 (木村康之)、物理学総合実験 (小林史明)、データマイニングと情報可視化 (稲垣紫緒)

## 研究・教育目標と成果

### 《今年度の目標》

- モデル自己駆動粒子系や外場駆動粒子系の実現とその挙動の解明を目指す。  
(1)
- 円偏光を照射することでミクロンサイズの液晶液滴の自転を誘起し、それらの流体相互作用を明らかにすることを旨とする。(2)
- 様々なコロイド粒子の作成や、その集合的挙動および集合系の物性を解明することを旨とした。(3)
- 複雑なソフトマター複合系における局所レオロジー挙動や相分離過程などを詳細に解明することを旨とした。(5)
- ソフトマター複雑流体の局所ダイナミクス測定可能な種々の顕微鏡法の開発とそれを用いたダイナミクス測定。(4, 5)
- 液晶電気対流系における揺らぎの時空間構造の定量化とその中に分散した粒子の運動解析を行い、両者の関係を明らかにする。(6)
- 粉粒体のバンド構造や局所構造の解明を旨とした。(12)
- 粉粒体を充填した回転円筒容器内に生じる対流現象に関する実験的研究。(13)
- 障害物周りの二次元斜面流の流れ場測定。(14)
- 粉粒体の安息角が底面の粗さや山のサイズにどのように依存して変わるかを調べる実験的研究。(15)
- ろうそくの炎の振動に関する実験的研究。(16)
- 電解質溶液の界面物性と電気物性を解明することを旨とした。(7, 8, 9, 10, 11)

#### (1) 界面活性剤水溶液中での自己駆動液晶液滴の運動解明 (津田、木村)

界面活性剤水溶液中を自己駆動する液晶滴系を実現し、そのサイズによる運動モードの変化を明らかにした。コレステリック液晶液滴においては、そのキラリティーに対応して、2つのらせん運動を示すことが明らかとなった。

#### (2) 光駆動自転粒子系で創成とその最適化 (齋藤、木村)

円偏光レーザービームを用いて、捕捉したミクロンサイズの液晶液滴に回転運動を誘起し、その回転速度の粒子サイズ依存性を測定した。さらに、得られた依存性を波長板効果と散乱効果を加味した理論式を用いて、サイズによる両者の寄与を議論することに成功した。さらに、複数粒子を用いて複雑な流動場を設計し、PIVを用いてその流れ場の測定し、評価を行った。

(3) **コレステリック液晶コロイドの相互作用の研究** (林、木村)

分子配向秩序に空間的な螺旋変調を持ったコレステリック液晶中にミクロンサイズのコロイド粒子を分散させた系での欠陥をまとった粒子の構造と相互作用の研究を行った。ことに垂直配向セル中でセル厚が螺旋周期より小さな系において、交流電場印加により粒子の凝集、分散を制御可能なことを発見し、これを用いて粒子間相互作用の研究を行った。

(4) **ホログラフィック顕微鏡の開発** (満生、木村)

ホログラフィを利用した新規な3次元粒子追跡手法の確立を目指した。その結果、特にレーリー・ゾンマーフェルト後方伝達関数を用いた方法により、多粒子の3次元同時追跡を可能にするシステムを実現した。さらにローレンツ・ミー散乱理論を用いた厳密解へのあてはめ法も実現し、粒子サイズおよびそのダイナミクスの同時測定を実現した。

(5) **差分動的顕微鏡の開発と空間的不均一性のある流体の局所粘性測定** (野見山、田中、木村)

差分動的顕微鏡法を用いてサブミクロンサイズのコロイド粒子の中間相関関数を求め、濃度数%までのコロイド分散系での拡散定数の測定を行った。さらに、画像分割により拡散定数の空間分布測定を行い、粘度分布のある系に適用し、その粘度の空間分布測定を行った。

(6) **液晶電気対流系の時空間ダイナミクスと対流中の粒子の異常拡散** (田中、木村)

液晶のソフトモード乱流のパターンダイナミクスにDDMを適用し、その中間相関関数を測定し、揺らぎの時空間相関を求め、特徴的なダイナミクスに関する情報を得ることに成功した。また、媒質にコロイド粒子を分散させることにより、弾道的な局所的なダイナミクスによる粒子ダイナミクスと大局的な流れによる異常拡散のモードが共存することがわかった。

(7) **電解質溶液の界面物性の研究** (植松)

電解質溶液の気液界面の表面張力とゼータ電位、閉じ込められた系における誘電物性や輸送物性などの理論的研究に取り組んだ。特に、油中水滴の電気

泳動移動度の解析計算に取り組み、水中油滴や固体コロイド粒子と大きく異なる電気泳動移動度の決定メカニズムを発見した。

- (8) **水と有機溶媒の混合系における電気二重層の研究** (岩崎、木村、植松)  
水とアルコールの混合系において、電気化学実験系を構築し、電気二重層の静電容量を測定した。電極付近で、バルクとは異なる組成比になっていることを示唆する実験結果が得られた。
- (9) **空気水界面の表面張力の精密計測** (植松、木村)  
表面張力を精密に計測するために、最大泡圧法と懸滴法の計測系を構築した。水の表面張力が精度良く、決定できることを確認した。
- (10) **気泡分散系の動力学に関する実験的研究** (井上、宮崎、木村、植松)  
マイクロスケールの気泡分散系の顕微鏡観察をすることで、気泡分散系が従うオストワルト熟成の動力学を発見し、そのメカニズムを検討した。また、マイクロバブルがナノバブルに遷移していく過程を観察できるようになった。さらに、ナノバブルを暗視野顕微鏡で観測する系を構築し、ナノバブルの濃縮・希釈に対する安定性を検討した。
- (11) **高分子逆浸透膜のイオン伝導の実験的研究** (井出、木村、植松)  
ナノスケールの拘束を実現できる高分子逆浸透膜を使って、イオンの輸送物性の計測実験に取り組み、ナノスケール特有の電気伝導コンダクタンスの塩濃度依存性を観測することができた。
- (12) **回転円筒容器における粉体の相分離現象の研究** (稲垣、木村)  
水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体を入れ、回転させたときに観察されるサイズ分離現象について、実験を行った。従来、粉体のサイズ分離現象は、動的安息角に有意に差のある粒子の組み合わせの時によく観察されると思われていたが、実際には動的安息角に差がなくても粉粒体のサイズ分離が起きることがあるのが確認されていた。どのような物理量によってサイズ分離現象が起こる条件を決められるか調べるために、粒子を球状のものに限定し、粒子のサイズと比重を系統的に変えることで、回転ドラムにおけるサイズ分離現象がどういうときにおこるか、実験を行った。今年度は特に、回転速度を変えたときの相図の変化を調べる実験を行った。今後、それぞれの寄与についてより定量的に議論するために、さらに実験データの解析を進める。

(13) **粉粒体の巨視的対流に関する研究** (米田、稲垣、木村)

水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体をほぼ完全に充填して回転させると、サイズ分離によって形成された粒子の縞模様が非常にゆっくりと円筒容器の軸に沿って動くことが分かっている。この非常にゆっくりとした縞模様の動きが、サイズ分離によって駆動されているかどうかを検証するために、単一の粒子を用いて、二重円筒に高充填に封入した粒子の流れ場を測定した。粒子が拡散しながらも、着色した粒子のドメインがほぼ左右対称に動いていることが分かった。また、その速度は、サイズ分離した縞模様の速度と同程度であり、縞模様のダイナミクスはサイズ分離とは独立に駆動されていることを示唆する結果を得た。今後は、このゆっくりとした流れがどうやって駆動されるのか、そのメカニズムの解明を目指して引き続き実験を行う。

(14) **粉粒体の障害物周りの流れ場に関する実験的研究** (山口、稲垣、木村)

非常事態に、建物から大勢の人が急いで避難しようとするときに、狭い入り口付近で人が詰まって出にくくなるという現象がある。動物の群れが囲いから出る時にも、同様の流れの詰まりがおきる。この時に、出口付近に障害物を置くことで、詰まりを置きにくくすることが実験的に知られている。モデル系として、2次元の斜面流で障害物が及ぼす流れ場への影響を実験的に行った。障害物の大きさや出口からの距離に依存して、粒子の排出速度が変わることを確認した。今後は、障害物が流れ場に及ぼす影響をより定量的に調べ、流れの詰まりが解消されるメカニズムを明らかにしたい。

(15) **粉粒体の安息角に関する実験的研究** (山科、稲垣、木村)

粉粒体を平面に注ぐと、ある一定の角度を保って斜面を形成する。その角度を安息角というが、一般にはそれぞれの粒子の物性値の一つとして知られている。我々の実験で、この安息角が山のサイズや、底面の床のざらつき具合によって変わることが分かった。先行研究においては、安息角の山のサイズ依存性は詳しく調べられておらず、床の影響がどの程度山が大きくなっても残るのか、今後系統的にパラメータを振って実験を行う。

(16) **ろうそくの炎の振動現象** (大野、稲垣、木村)

兵庫教育大の猪本先生のと共同研究で、ろうそくを円筒容器で囲ったときに

観察される炎の振動現象について、実験を行った。特に、円筒容器の上部に小さな穴をあけて空気の流れを制限したときに、これまで観察されたことのないゆっくりとした炎を振動が観察された。この振動のメカニズムの解明について、今後さらに研究を進める。

(17) **粉体の浸透現象** (松田、稲垣、木村)

大きさの異なる二種類の大きさの粒子を網で仕切り、鉛直方向に加振したとき、小粒子が網を通過して大粒子の中に浸透していく現象を実験的に調べた。従来の水溶液の浸透現象と比較して、乾燥した粉粒体の浸透現象のメカニズムを解明するために、今後さらに研究を進める。

(18) **光弾性体円盤の巨視的物性** (村上、稲垣、木村)

光弾性体で円盤を作成し、多数の円盤を並べた状態で力を加えて、円盤媒質内部にどのように力が伝わるかについて実験的な研究を行った。偏光板で挟んだ状態で光弾性体円盤に力を加えたとき、円盤内部に現れるパターンの解析を試している最中である。今後、円盤一つ一つにかかる力を解析できるようにしたうえで、巨視的な応答との関係について研究を進める。

《 来年度の目標 》

研究 (1 - 18) のさらなる発展、及び教育の充実。

**発表論文**

《 原著論文 》

1. "Self-replicating segregation patterns in horizontally vibrated binary mixture of granules", Hiroyuki Ebata and Shio Inagaki, <https://arxiv.org/abs/2303.17145>

《 その他の論文 》

**著書**

**講演**

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

1. 液晶マイクロスイマー, 木村康之, 日本液晶学会ソフトマターフォーラム講演会 (オンライン, 招待講演) (2020年10月24日)  
2022.7.9 西日本非線形研究会 2022 (九州大学伊都キャンパス)
2. ”水中で自走するコレステリック液晶液滴の運動”, 津田健吾, 木村康之
3. ”粉体斜面流での障害物による流動と密度の変化”, 山口雅也, 稲垣紫緒
4. ”砂山斜面の角度の山サイズと粒径の依存性”, 山科スミレ, 稲垣紫緒
5. ”準開放円筒内におけるロウソクの振動現象”, 大野僚, 猪本 修, 宮内しほな, 稲垣紫緒
6. ”水中で自走するコレステリック液晶液滴の運動”, 津田健吾, 木村康之
7. ”円偏光により駆動された回転液晶液滴”, 齊藤圭太, 木村康之
8. ”液晶乱流系の時空間構造と非平衡輸送”, 田中健太郎, 木村康之
9. ”粉体斜面流での障害物による粒子の流動状態の変化”, 山口雅也, 稲垣紫緒
10. ”砂山斜面の角度のサイズと境界条件の依存性”, 山科スミレ, 稲垣紫緒
11. ”準開放円筒内におけるロウソク火炎の振動現象”, 大野僚, 猪本 修, 宮内しほな, 稲垣紫緒  
2022.12.3 第128回日本物理学会九州支部例会 (熊本大学黒髪南キャンパス)
12. ”アクティブコロイド粒子の集団運動” 井出健一郎, 齊藤圭太, 小林史明, 木村康之
13. ”コレステリック液晶コロイドの相互作用” 林和気, 木村康之
14. ”水中で自走するコレステリック液晶液滴の運動” 津田健吾, 齊藤圭太, 木村康之
15. ”金属絶縁体ヤヌス粒子の電場応答” 橋本明伸, 齊藤圭太, 小林史明, 木村康之
16. ”複雑流体中でのアクティブコロイドの運動” 河野龍之介, 齊藤圭太, 小林史明, 木村康之
17. ”3コンパートメントでの粉体時計” 河野快, 稲垣紫緒
18. ”光弾性体円盤の巨視的物性” 村上亮太, 稲垣紫緒
19. ”粉体の浸透圧” 松田朝之, 稲垣紫緒  
2023.03.22-25, 日本物理学会春季大会 (オンライン)
20. ”粉体の浸透現象” 松田朝之, 稲垣紫緒
21. ”金属-誘電体ヤヌス粒子の電場応答” 橋本明伸, 齊藤圭太, 小林史明, 岩下靖孝, 木村康之
22. ”複雑流体中での電場駆動ヤヌス粒子の運動” 齊藤圭太, 河野龍之介, 小林

史明, 岩下靖孝, 木村康之

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

顕微イメージングを用いた非平衡ソフトマター不均一系の局所力学応答測定

研究代表者：木村康之

科学研究費補助金、基盤研究 (C)

非熱的揺らぎの空間勾配と排除体積効果に駆動されるマクロな粒子系の非平衡輸送現象

研究代表者：稲垣紫緒

科学研究費補助金、若手研究

液晶乱流構造とレオロジー特性の解明研究代表者：小林 史明

科学研究費補助金、基盤研究 (B)

電場で誘起される液晶の自発流れの成長機構の解明

研究代表者：長屋 智之 (大分大学)

研究分担者：小林 史明

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

## 他大学での研究と教育

### 学部4年生卒業研究

河野 龍之介：(指導教員、木村康之)：高分子水溶液中でのアクティブコロイドの運動

松田 朝之：(指導教員、稲垣紫緒)：粉体の浸透現象

村上 亮太：(指導教員、稲垣紫緒)：光弾性体円盤媒質中の力の分布

## 修士論文

林和気：(指導教員、木村康之)：コレステリック液晶コロイドの研究

野見山直弥：(指導教員、木村康之)：画像相関を用いたソフトマター流体のダイナミクス測定

山口雅也：(指導教員、稲垣紫緒)：流体力学的に結合したコロイド粒子系の同期現象

山科スミレ：(指導教員、稲垣紫緒)：流体力学的に結合したコロイド粒子系の同期現象

大野燎：(指導教員、稲垣紫緒)：流体力学的に結合したコロイド粒子系の同期現象

米田翔一：(指導教員、稲垣紫緒)：流体力学的に結合したコロイド粒子系の同期現象

## 博士論文

### 外国人留学生の受け入れ

### 学外での学会活動

散乱研究会運営委員 (木村)

ソフトマター研究会運営委員 (木村)

Optics of Liquid Crystal 21 運営委員 (木村)

日本物理学会若手奨励賞領域 12 審査委員長 (木村)

日本液晶学会物理物性フォーラム委員 (木村)

### 受託研究・民間との共同研究

### その他の活動と成果

なし。

# 複雑流体

## 研究室構成員

前多 裕介 准教授  
《 大学院 博士課程 》  
加藤 修三  
《 大学院 修士課程 》  
Archit Negi 繁田 和幸 榎 航平 家永 竜  
柏原 智香 松浦 海人  
《 学部 卒業研究生 》  
鍋島 馨 下川 隆治

## 担当授業

生物物理学（前多）、基礎物理学実験・同演習（前多）、国際科学特論1（前多）、物理学ゼミナール（前多）

## 研究・教育目標と成果

### 1. アクティブマターの集団運動とその幾何的制御（前多、繁田、Negi、松浦）

自律的に動く要素（アクティブマター）が多数あつまると、運動方向の相関が長距離にわたって持続する集団運動が出現する。代表的なアクティブマターであるバクテリアは、高密度の集団において擬2次元平面内で大小さまざまな渦構造が入り乱れる乱流様の運動を示す。この懸濁液を円形境界のもとにおくと渦運動が出現し、複数の渦が接すると回転方向が揃う相や交互に入れ替わる相が出現する。しかし、相互作用する渦の回転方向の遷移に関する明確なルールは明らかにされておらず、本研究では境界形状を自在に設計する新たな手法を開発し、集団渦運動の転移に関わる幾何法則の解明を行った。バクテリア *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 は代表的なアクティブマターであり、これを用いて集団運動の幾何学的な制御をおこなった。この幾何学的制約下のバクテリア集団運動を解析したところ、ペアとなる渦の回転方向が揃うパターンと逆回転を示すパターンが切り替わる転移点は、渦のサイズと渦間距離で定められる条件に従うことを見出した。この転移点に関する幾何学的ルールはバクテリア集団運動のみならず、上皮細胞の一種である MDCK 細胞においても観察された。前年

度までには分子モータータンパク質に駆動される微小管フィラメントの集団運動においても、この集団運動の幾何的制御が成立することを見出している。以上から、バクテリア、細胞骨格フィラメント、培養細胞集団と相異なるアクティブマターの集団運動で共通する幾何法則を明らかにした。さらに、MDCK 細胞の集団運動をハイドロゲルのパターンで制御することにも成功し、2次元系における渦の相互作用だけでなく、ゲルの3次元形状を用いた制御原理についても研究を進めている。

## 2. アクティブマターの位相欠陥と非平衡ダイナミクス（前多、家永）

上記2で明らかにしたアクティブマターの集団運動の幾何的ルールは配向相互作用に起因するため、分子種や細胞種によらず成立すると考えられる。一方で、その幾何的ルールの破れは注目するシステムの特徴を定量的に計測する手法ともなり、多細胞秩序形成を支配する新たな物理的原理の探索につながると考えられる。この動機のもと、筋芽細胞（C2C12細胞）を用いて、それぞれの集団運動における幾何的ルールの計測を行った。このためにまず、培養細胞集団を幾何的形状のもとで拘束する新たな細胞スタンプ法を開発した。この微細加工技術を用いて、2つの円を重ね合わせた境界形状の範囲に細胞集団の運動を制限し、組織形状が細胞の配向パターン形成や集団運動に与える影響を解析した。解析の結果、C2C12細胞では集団運動によって配向を揃えていくものの、局所的には向きが揃わない特異点（位相欠陥）が生じることがわかった。この位相欠陥のうち $+1/2$ 欠陥は自発的な運動を示し、 $-1/2$ 欠陥と結合して消滅していく。その結果、幾何的境界条件におかれた細胞集団では位相欠陥のペア形成に一定のルールが現れることを明らかにした。この位相欠陥のルールを利用することで、細胞集団の密度を局所的にあげることや、細胞集団に収縮力を誘起することで細胞核の変形が起こることなども見出し、集団運動と位相欠陥の幾何的制御を多細胞系に拡張することに成功した。

## 3. 分子モーターの1分子計測（前多、柏原）

非平衡系とは、熱やエネルギーの流入出や散逸により、熱平衡から離れた状態を指す。細胞内環境は非平衡系の典型例であり、多数の生体分子が絡み合いエネルギーを散逸しながらゆらいでいることが知られている。細胞内で物質の運搬や力生成などの機能を果たす分子モータータンパク質は、ゆらぎの影響を受けながら、化学反応で生まれるエネルギーを利用したタンパク質の構造変化を周期的に繰り返すことで一方向の運動を実現している。このような分子モータータンパク質がゆらぎを伴う環境の中で動作するメカニズムを明らかにするため、1分子計測の実験手法と再構成系を用いた物理的アプローチの確立を目指している。本年度はキネシン分子モーターが微小管上を動くダイナミクスの1分子計測を行ってきた。キネシン分子モーターが表面に結合し

た量子ドットが微小管上を動く過程を蛍光顕微鏡で計測することで、1分子レベルの運動速度の測定と運動の持続性などを定量化することに成功した。今後は、アクチン細胞骨格系が示す大きなゆらぎのもとで、キネシン分子モーターがどのように運動するかを明らかにしていくことを目標としている。

#### 4. 細胞質溶液の液液相分離現象の研究（前多、加藤）

細胞はタンパク質やDNA、脂質膜などの柔らかい物質群からなる複雑なシステムである。細胞内部では多種多様な生化学反応の制御を行い、細胞膜界面では形状変化等の環境応答が行われるが、これらのダイナミクスを支えるのはソフトマター特有の自発的な秩序形成である。これまでに、ソフトマターの時空間構造形成のメカニズムの究明は、主として単純な分子を用いた理想的な径で研究が行われてきた。近年の微細加工技術の進展により我々は細胞サイズの空間を構築し細胞内現象を再構成する人工細胞研究を可能とする技術を開発して来た。本研究では、タンパク質合成活性を保持する細胞抽出液を細胞サイズの油中水滴に封入した人工細胞を構築することに成功した。この系においては、人工細胞が濃縮によって自発的に内部で液滴を生成し、その内容液のタンパク質成分が二相に分離する液液相分離現象を発見した。これまで二成分高分子溶液での相分離現象は知られていたが、その構成要素は実に単純で細胞内現象を反映するかという問題が伴っていた。しかし我々の実験により、細胞内環境に近い反応活性を持つ複雑溶液での初めての実証となり、細胞内現象と相分離現象をつなぐ新しいモデル系と位置付けることができる。重要なことに、我々が示した人工細胞系での相分離現象は、近年報告が相次ぐ「細胞内の液液相分離現象」と密接な関係があると期待される。ここで、相分離のダイナミクスを定量するため細胞サイズの円柱状マイクロウェルに溶液を封入し、細胞抽出液の相分離過程を観察した。その結果、臨界濃度に達すると上層膜のメニスカス形状に沿って相分離構造が形成され、液滴構造の合体が濡れ転移に駆動されることが示唆された。この時、液滴の平均サイズは含まれる高分子濃度に依存して上昇するため、溶液内部の物理的性質が重要な役割を果たしていると考えられる。

#### 5. ソフトマターの実験物理学（前多、榎、下川、鍋島）

弾性体は、その幾何学的構造が変形の仕方や運動に大きく影響を与える。中でもリボンのように幅を持った細長い弾性体に関する研究は、近年急速に発展を遂げている分野の一つである。このような形状の弾性体は、生き物の羽や魚の尾びれなど身の回りに幅広く存在しているものの、その力学応答性の研究に関してはいまだ発展途上の段階にある。そこで本研究では、回転に伴い変形する弾性リボンに注目し、その幾何学的変化と運動状態を実験と理論、数値シミュレーションにより解析した。リボンの幾

何学的特性と動力学を調べるために、回転により弾性リボンが変形と運動を見せるシンプルな系「弾性バブル」を作製し、その曲げ変形とねじれ変形について解析したところ、回転の角速度に応じて弾性バブルは曲げ状態・振動状態・ねじれ状態の三つの状態をみせることが分かった。曲げ状態ではリボン上端から下端までの距離が回転の角速度の増加とともに小さくなり、この関係性は回転に伴ってリボンを変形させる力学的仕事とリボンの弾性エネルギーのバランスから理論的にも説明することができる。さらに真空状態でも実験を行うことにより、振動状態・ねじれ状態は空気中特有の状態であることが判明した。弾性棒のモデルを用いた数値シミュレーションを行ったところ、曲げ状態とねじれ状態に関しては実験と一致する結果が得られており、我々が見出したリボンの形状転移は力学と幾何学が密接に絡み合う新たな弾性体ダイナミクスを反映するものと考えられる。そのほか、泡沫のレオロジー解析を行うなど、幅広くマクロなソフトマターの物理的研究を行なった。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

1. Maeda YT

Negative autoregulation controls size scaling in confined gene expression reactions  
Scientific Reports **12**, 10516 (2022)

2. Shigeta K, Fukuyama T, Takahashi R, Beppu K, Tanaka A, and Maeda YT

Collective motion of epithelial cells along a wrinkled 3D-buckled hydrogel  
RSC Advances **12**, 20174-20181 (2022)

3. Sakamoto R, Izri Z, Shimamoto Y, Miyazaki M, and Maeda YT

Geometric trade-off between contractile force and viscous drag determines the actomyosin-based motility of a cell-sized droplet  
Proc. Natl. Acad. Sci. USA **119**, e2121147119 (2022)

4. Fukuyama T, Yan LC, Tanaka M, Yamaoka M, Saito K, Ti SC, Liao CC, Hsia KC, Maeda YT\*, and Shimamoto Y\* (\*co-correspondence)

Morphological growth dynamics, mechanical stability, and active microtubule mechanics underlying spindle self-organization

Proc. Natl. Acad. Sci. USA **119**, e2209053119 (2022)

5. Sakamoto R, Miyazaki M, and Maeda YT

State transitions of a confined actomyosin system controlled through contractility and polymerization rate

Physical Review Research **5**, 013208 (2023)

6. Negi A, Beppu K, and Maeda YT

Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter

arxiv:2212.14701, now published in Physical Review Research

7. Ienaga R, Beppu K, and Maeda YT

Controlling topological defects and contractile flow in confined nematic cell population

arXiv:2212.13756, now published in Soft Matter

《その他の論文》

8. Beppu K, Maeda YT

Exploring order in active turbulence: Geometric rule and pairing order transition in confined bacterial vortices

Biophysics and Physicobiology **19**, e190020 (2022)

## 著書

## 講演

《海外での講演》

Kazuyuki Shigeta, Tatsuya Fukuyama, Riku Takahashi, Kazusa Beppu, Aya Tanaka, Yusuke T. Maeda

Collective motion of epithelial cells in a 3D wrinkled hydrogel

The World Congress of Biomechanics (WCB2022) , 2022年7月10日-14日

Yusuke T. Maeda

Geometry of phase transitions in confined active matter

15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) , 2022 年 8 月 21 日-24 日

Shuzo Kato, David Garenne, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda

Phase separation dynamics in cell-free expression systems

APS March Meeting 2023, 2023 年 3 月 20 日-22 日

《 国内での講演 》

加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介

無細胞発現系における液滴形成のダイナミクス

第 60 回日本生物物理学会年次大会, 2022 年 9 月 28 日-30 日

繁田和幸, 別府航早, 田中あや, 前多裕介

上皮細胞の集団運動とペアリング秩序転移

第 60 回日本生物物理学会年次大会, 2022 年 9 月 28 日-30 日

家永竜, 別府航早, 前多裕介

筋芽細胞集団が示す位相欠陥と収縮性流れの幾何的制御

第 60 回日本生物物理学会年次大会, 2022 年 9 月 28 日-30 日

Tomoka Kashiwabara, Syeda Rubaiya Nasrin, Arif Md Rashedul Kabir, Akira Kakugo,  
Yusuke T. Maeda

Single molecule observation of kinesin-1 on collectively aligned microtubules

第 60 回日本生物物理学会年次大会, 2022 年 9 月 28 日-30 日

前多裕介

生命システムを物理的制御で探る

関東非線形非平衡バイオソフトマターセミナー, 2022 年 11 月 19 日

家永竜, 別府航早, 前多裕介

筋芽細胞集団が示す位相欠陥と収縮性流れの幾何学的制御

第 10 回ソフトマター研究会, 2022 年 11 月 21 日-23 日

加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介

無細胞発現系の相分離ダイナミクスと塩依存的な形状緩和過程

第 10 回ソフトマター研究会, 2022 年 11 月 21 日-23 日

松浦海人, 前多裕介

溶液物性制御に基づく遊泳バクテリアのアクティブ乱流状態の解析

第 10 回ソフトマター研究会, 2022 年 11 月 21 日-23 日

Archit Negi, Kazusa Beppu, Yusuke T. Maeda

Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter

第 10 回ソフトマター研究会, 2022 年 11 月 21 日-23 日

Yusuke T. Maeda, Kazusa Beppu

Ordered patterns and geometric rule of multicellular systems explored in swimming bacterial population

第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 11 月 30 日-12 月 2 日

前多裕介

ソフトマターからアクティブマターへ：生命を捉える新たな視点

筑波大学 TARA センター 理論合成インシリコセミナー, 2023 年 1 月 11 日

榎航平, 萩原宙, 前多裕介

回転する弾性リボンの変形と圧縮による形態転移

日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日-25 日

繁田和幸, 別府航早, 前多裕介

上皮細胞における集団運動の幾何的制御と自律振動

日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日-25 日

家永竜, 別府航早, 前多裕介

筋芽細胞集団における位相欠陥と収縮流れによる形態制御原理

日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日-25 日

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

アクティブマターのキラルな秩序渦と乱流状態の幾何的普遍性の研究  
科学研究費補助金 基盤研究 (B)  
研究代表者：前多裕介

発動分子の自律的運動と機能設計のエネルギー論的研究  
科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「発動分子科学」計画研究  
研究代表者：前多裕介

アクティブゲルで切り拓く細胞の対称性と運動原理の非平衡力学  
科学研究費補助金 挑戦的研究 (萌芽)  
研究代表者：前多裕介

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》  
人工細胞再構成で切り拓く細胞内秩序形成のアクティブゲル物理学  
住友財団 基礎科学研究助成  
研究代表者：前多裕介

**日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)**

加藤修三  
細胞質の相分離とぬれの非平衡物理学  
日本学術振興会特別研究員 DC1

### **他大学での研究と教育**

前多裕介：龍谷大学農学部 「生物物理学」で3回の授業を行った。

### **学部4年生卒業研究**

鍋島 馨 (指導教員、前多裕介)  
粘弾性的泡沫のずり挙動：変形と塗り広がり

下川 隆治 (指導教員、前多裕介)  
弾性リボンの変形とキルヒホッフ理論による解析

## 修士論文

繁田 和幸（指導教員、前多裕介）

幾何的制御で探る細胞集団のアクティブ乱流と振動現象

榎 航平（指導教員、前多裕介）

回転する弾性リボンの変形と圧縮による形態転移

Archit Negi（指導教員、前多裕介）

Exploring confinement induced dynamics of active matter using simulations and artificial cells

## 博士論文

### 外国人留学生の受け入れ

Archit Negi（受入教員、前多裕介）

### 学外での学会活動

前多 裕介

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業さきがけ「細胞の動的・高次構造体」領域アドバイザー

### 受託研究・民間との共同研究

NTT 株式会社物性基礎科学研究所とのバイオソフトマターデバイスの開発に関する提携

### その他の活動と成果

加藤 修三

日本物理学会 学生優秀発表賞 受賞

別府 航早

井上科学振興財団 第 39 回井上研究奨励賞 受賞

# 複雑生命物性

## 研究室構成員

水野 大介 教授

江端 宏之 助教

《 大学院 博士課程 》

杉野 裕次郎

《 大学院 修士課程 》

熊丸 一平 富田 海理 杜 海洋 松岡 亮佑

吉良 和真 濱田 啓聖

《 学部 卒業研究生 》

安部 共法 田尾 優樹

《 研究生 》

## 担当授業

生物物理学 (水野大介)、電磁気学・同演習 I(水野大介)、物理学総合実験 (水野大介・江端宏之)

## 研究・教育目標と成果

《 今年度の目標 》

- コロイド系の局所非線形力学応答の普遍的性質の解明。(2,7)
- 細胞内部環境のアクティブガラス的振る舞いを、細胞抽出液や遊走バクテリア懸濁液等のモデル系と比較しつつ解明する。(3,5,8)
- 独自のフィードバックマイクロレオロジー計測法を開発し、細胞やバクテリアの集団運動における揺らぎと力学応答の非平衡関係を解明する。(4)
- 非平衡ゲルや遊走微生物懸濁液等の非平衡系の揺らぎの Levy 動力学と統計分布形状の特性を明らかにする。(5)
- 非平衡ソフトマターにおける揺動散逸定理の破れを観測し、非平衡散逸や構造緩和を生み出す実効温度が系の非平衡挙動を決定する機構を調べる。(3,2)

- 細胞を始めとする光学的に不均質な媒質中において、光捕捉による力の印加とレーザー干渉法に基づく粒子追跡を高い時空間分解能で精密に行うための技術を開発する。(1)

(1) **多重フィードバックと補償光学を用いた非平衡ソフトマターの揺らぎ応答解析** (杉野、水野)

多重フィードバックを用いて試料中の揺らぎに追随しつつ、補償光学技術を用いて不均一媒質を通過する際に生じるレーザー波面の乱れを補正し、精密な力の印加と干渉パターンの生成を実現する技術開発を進めている。

(2) **剛体球コロイド濃厚懸濁系の非線形・非平衡レオロジー** (松岡、吉良、水野)

ソフトマターの多彩な非線形流動挙動のメカニズムや法則性を調べるために、単純なモデル系である剛体球コロイド懸濁液のマイクロレオロジー計測を行った。コロイド懸濁液の非線形な流動挙動は、構成要素である粒子同士の相互作用とダイナミクスに起因する。そこで基本構成粒子の“メソスケール”の力学応答をマイクロレオロジー観測することで、非線形流動の機構を本質的に理解できる。そこで、コロイド懸濁液中の単独の構成粒子に光ピンセットを用いて力を加え、その際の非線形な力学挙動をマイクロレオロジー法により観測した。2重の時空間スケールのフィードバック制御を用いて実験を行い、巨視的には印加する外場の増大とともに thinning → thickening が生じるのに対して、微視的には thickening → thinning が生じることを見出した。また、巨視的な外場によって生じる流動化により実効温度が上昇すると仮定し、粒子は局所構造によるエネルギー障壁を超えることで移動すると考え、局所外力の加わった粒子の速度式を提案した。その結果、牽引実験における非線形な粘性率変化を説明できることを示した。

(3) **細胞内部環境のアクティブガラス的挙動** (杉野、田尾、江端、水野)

進化や発生の段階の異なる各種の細胞質の力学特性をマイクロレオロジーにより評価した。その結果、いずれもガラス転移近傍の振る舞いを示し、丁度細胞内濃度でジャミング転移を起こすことを見出した。他方で生きている細胞の内部環境は有限の流動性と巨大な非熱的揺らぎを示すことから、細胞は自らの代謝活性により細胞質を自発的に駆動することで本来ガラス化するべき状態を流動下させていることを見出した。また、生細胞内でのマイクロレ

オロジー測定により、理論的にジャミング転移点近傍で予想されている複素弾性率の周波数依存性  $G(\omega) \propto (-i\omega)^{0.5}$  が細胞質においても観測されることを示した。一方で、代謝を抑制し非熱揺らぎが低下した細胞では低周波で弾性的な挙動が現れることを見出した。これは、細胞質が代謝により流動性を保つアクティブガラスとして振る舞っていることを示唆している。

(4) **フィードバック増強マイクロレオロジーの開発と細胞・生体組織計測** (杉野、田尾、安部、江端、水野)

光トラップしたプローブ粒子の変位を4分割フォトダイオードで精密計測し、さらに計測信号をもとにピエゾ駆動ステージ、およびAODを高速フィードバック制御しながら active-passive マイクロレオロジー計測を行った。従来強すぎる非平衡揺らぎのためにプローブ粒子を安定捕捉できない試料(細胞内部や遊走バクテリア溶液)でマイクロレオロジー計測を行い、揺動散逸定理の破れや非平衡揺らぎの分布形状の解析を行った。その結果、細胞内部・遊走バクテリア溶液において、低周波での強い揺動散逸定理の破れを観測している。

(5) **遊走バクテリア懸濁液中における非平衡揺らぎの統計分布** (杜海洋、水野)

培養液中で遊走するバクテリア(大腸菌)や単細胞微生物(クラミドモナス)が生み出す非平衡揺らぎが、我々の提案する新しい極限安定分布に属することを明らかにした。その時間発展を解析することで、非平衡揺らぎに新しい極限分布が現実の物理系において普遍的に現れる機構とその出現条件を明らかにした。さらに、遊走微生物が存在を許された空間の次元と、現実の空間の次元を様々に制御した実験を行うことで、この新しい極限分布が現実世界で観測される非ガウス揺らぎを一般的に表現することを示しつつある。本年度は、理論を長距離相互作用を含む形式に拡張してさらに一般化した。

(6) **細胞内液一液相分離による微細液滴形成機構のマイクロレオロジー観測** (冨田、水野)

近年、直接検出することが困難な微弱な相互作用が細胞内で集団として働く姿を、in vitro の相分離や相転移現象として間接的に観察する試みがなされている。顕微鏡観察できるマクロなスケールの液滴(マクロ液滴)の観察が盛んに行われ、その結果、細胞内では微弱だが集団として働く相互作用が満ち

あふれており、幅広い場面で生体制御に関わっていると考えられはじめている。しかしながら、細胞内における液滴の物理的な理解は殆ど進んでおらず、液滴の発生と成長がどのような法則に従うのか明らかではない。我々は、細胞内でミクロに相分離した液滴の物理的性質の経時変化の計測を行い、凝集体の粘弾性が時間と共に液体状からゲル状へと変わっていくことを示した。これは、相分離液滴が時間とともにエイジングしていることを示唆している。

(7) **細胞質モデルとしての濃厚エマルジョンのマイクロレオロジー計測**（松岡、水野）

近年、代謝活動を行わない細胞抽出液では生体たんぱく質濃度付近で粘性が発散的にふるまいガラス化することが報告されている。また、細胞胞内において生体高分子が液液相分離を起こし液滴を形成する現象が観測されている。細胞質は剛体球コロイドに比べ、30%程度の低い固形物濃度でガラス化することが知られている。細胞質内で生体高分子が形成する液滴は内部に溶媒を含有しているために、液滴の充填率は高くなり得る。そのため、細胞質では相分離により形成された微細な液滴で混み合っている可能性がある。我々は細胞質のモデルとして濃厚エマルジョンの複素弾性率をマイクロレオロジーにて測定した。その結果、アモルファス固体などの不規則媒質に一般的に見られる異常散逸  $G'(\omega) \propto \omega^0$ ,  $G''(\omega) \propto \omega^{0.5}$  が観測されることを示した。また、ジャミング転移点前後において、粘弾性がジャミングの理論から予想されていたマスターカーブにのることを示した。

(8) **代謝維持装置を用いたアクティブガラスの非平衡レオロジー**（杉野、濱田、安部、江端、水野）

自己駆動するコロイドや微生物が混み合った懸濁液では、エネルギー形態の変換により生じた力に由来する非熱揺らぎが発生する。このようなアクティブガラス系では、高い粒子濃度においてもガラス化を免れて流動化する可能性が理論的・数値的な研究により指摘されてきた。一方、自己駆動粒子の濃厚系では化学物質、生理活性物質や代謝生成物の効率的な交換が必須であり、これまで実験的に3次元アクティブガラス系は実現していなかった。我々は、半透膜を介して生理活性物質や代謝生成物を交換することで、長時間遊走する大腸菌の高濃度懸濁液を作成し、3次元アクティブガラスの実験系を初めて実現した。遊走・非遊走大腸菌の濃厚懸濁液のマイクロレオロジー測定・画像解析から、自発的な力生成によるアクティブガラスの流動化を実験的に

初めて明らかにした。

《 来年度の目標 》

研究（1-8）のさらなる発展、及び教育の充実。

## 発表論文

《 原著論文 》

1. Nonlinear master relation in microscopic mechanical response of semiflexible biopolymer networks N. Honda, K. Shiraki, F. Van Esterik, S. Inokuchi, H. Ebata, D. Mizuno, *New Journal of Physics* **24**, 053031 (2022). DOI:10.1088/1367-2630/ac6902
2. Interplay among cell migration, shaping, and traction force on a matrix with cell-scale stiffness heterogeneity H. Ebata, S. Kidoaki, *biophysics and physicobiology* **19**, e190036 (2022). DOI:10.2142/biophysico.bppb-v19.0036
3. Activity-dependent glassy cell mechanics I: Mechanical properties measured with active microrheology. H. Ebata, K. Umeda, K. Nishizawa, W. Nagao, S. Inokuchi, Y. Sugino, T. Miyamoto, D. Mizuno, *Biophysical journal* **122**, 1781-1793 (2023). DOI:10.1016/j.bpj.2023.04.011

《 その他の論文 》

## 著書

## 講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

1. 《25th Anniversary Symposium for German-Japanese Non-Equilibrium Statistical Physics》

Critical Jamming and gel rheology of droplet suspensions in living cells (oral)  
Daisuke Mizuno

2. 《第 60 回生物物理年会》

Critical Jamming and gel rheology of droplet suspensions in living cells (シンポジウム講演)  
水野大介

3. 《日本物理学会 2022 年秋季大会》

アクティブな濃厚懸濁系としての細胞質レオロジー (口頭)  
水野大介, 松岡亮佑, 井口昇之, 杉野裕次郎, 江端宏之

4. 《第 128 回日本物理学会九州支部例会》

代謝抑制が誘導する細胞質粘弾性のエイジング現象 (口頭)  
田尾優樹, 江端宏之, 水野大介

5. 《「生命の情報物理学」第 6 回領域会議》

代謝抑制細胞のマイクロレオロジー (ポスター)  
田尾優樹, 江端宏之, 水野大介

6. 《「生命の情報物理学」第 5 回領域会議》

遊走微生物濃厚懸濁系における揺らぎとレオロジー (ポスター)  
濱田啓聖, 杉野裕次郎, 江端宏之, 水野大介

7. 《日本物理学会 2023 年春季大会, 遠隔》

細胞内力学の理解に向けた遊走微生物系の物理計測 (ポスター)  
濱田啓聖, 安部共法, 杉野裕次郎, 江端宏之, 曾和義幸, 水野大介

8. 《日本物理学会 2022 年秋季大会》

濃厚エマルジョンにおけるこみあい由来の粘弾性緩和挙動 (口頭)  
松岡亮佑, 井口昇之, 江端宏之, 池田昌司, 水野大介

9. 《第 10 回ソフトマター研究会》

濃厚エマルジョンにおけるこみあい由来の粘弾性緩和挙動 (ポスター)  
松岡亮佑, 井口昇之, 江端宏之, 池田昌司, 水野大介

10. 《日本物理学会 2023 年春季大会, 遠隔》  
濃厚コロイド懸濁液における混み合い由来のべき乗則緩和現象 (口頭)  
松岡亮佑, 井口昇之, 江端宏之, 池田昌司, 原雄介, 水野大介
11. 《日本物理学会 2023 年春季大会, 遠隔》  
局所的な外力印加下の濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (ポスター)  
吉良和真、柳島大輝、荊原佳祐、水野大介
12. 《「生命の情報物理学」第6回領域会議》  
局所的な外力印加下の濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (ポスター)  
吉良和真、柳島大輝、荊原佳祐、水野大介
13. 《第128回日本物理学会九州支部例会》  
微生物が遊走する高分子・コロイド懸濁系の非平衡ダイナミクス (口頭)  
安部共法、濱田啓聖、杉野裕次郎、江端宏之、水野大介
14. 《第70回レオロジー討論会》  
濃厚バクテリア懸濁液のアクティブレオロジー (口頭)  
杉野裕次郎、江端宏之、水野大介
15. 《第10回ソフトマター研究会》  
濃厚バクテリア懸濁液の非平衡レオロジー (口頭)  
杉野裕次郎、江端宏之、曾和義幸、水野大介
16. 《日本物理学会 2023 年春季大会, 遠隔》  
遊走大腸菌濃厚懸濁液の非平衡レオロジー (口頭)  
杉野裕次郎、江端宏之、曾和義幸、水野大介
17. 《第10回ソフトマター研究会》  
液-液相分離によって生じる細胞内凝集体のマイクロレオロジー (ポスター)  
富田 海理, 藤原 誠, 水野 大介
18. 《日本物理学会 2022 年秋季大会》

基材弾性率により形態制御された細胞の細胞質流動特性（口頭）  
江端宏之、水野大介

19. 《第10回ソフトマター研究会》

代謝依存・細胞骨格非依存の細胞質レオロジー特性（口頭）  
江端宏之、水野大介

20. 《アクティブマター研究会2023》

Metabolism-dependent and cytoskeleton-independent rheology of cell cytoplasm（口頭）  
江端宏之、水野大介

21. 《「生命の情報物理学」第6回領域会議》

非熱揺らぎに駆動された細胞質レオロジー（ポスター）  
江端宏之、水野大介

22. 《日本物理学会 2023年春季大会, 遠隔》

代謝依存的な細胞質の非平衡力学（口頭）  
江端宏之、水野大介

## 外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

科学研究費補助金、基盤研究(B)

非熱揺らぎの時空間スペクトル解析に基づく細胞質の非平衡挙動の解明  
研究代表者：水野大介

科学研究費補助金、新学術領域研究(公募)

細胞質中の非熱揺らぎの実態とその有用性の情報熱力学解析  
研究代表者：水野大介

科学研究費補助金、基盤研究(A)

非平衡系のガラス・ジャミング転移

研究代表者：宮崎 州正

研究分担者：水野大介

科学研究費補助金、基盤研究 (C)

非熱揺らぎによる高濃度コロイド懸濁液系の流動化メカニズム解明

研究代表者：江端宏之

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

## 他大学での研究と教育

### 学部 4 年生卒業研究

安部 共法：(指導教員、水野大介)：枯渇力が働く遊走微生物懸濁系の非平衡ダイナミクス

田尾 優樹：(指導教員、江端宏之)：代謝抑制に誘導されたアポトーシス細胞のマイクロレオロジー

### 修士論文

富田 海理：(指導教員、水野大介)：細胞内液一液相分離によって生じるオートファジー関連凝集体のマイクロレオロジー

熊丸 一平：(指導教員、水野大介)：細胞抽出液の代謝依存的エイジングと力学特性

### 博士論文

### 外国人留学生の受け入れ

修士 2 年 杜海洋

### 学外での学会活動

Active Matter Workshop 世話人（江端）

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

## 令和4年度 客員准教授

宮崎大学 教育学部 准教授 下村 崇

素粒子理論分野で、下村崇氏(宮崎大学 教育学部 准教授)が、昨年度より、客員准教授に着任している。

下村氏はサバティカルの制度を利用して令和3年10月から令和4年9月末まで素粒子理論研究室に継続的に滞在された。素粒子理論研究室では、津村准教授・大塚助教・内田助教と共同研究を実施し、直接検出実験を自然に回避する新しい擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質模型を構築し、Physical Review D 誌に1篇の論文を発表した。その他にも継続的に素粒子理論研究室で推進する研究への助言、学生および研究員への研究指導を行って頂いている。

文責:津村浩二

## 令和4年度 教職員一覧

研究グループ	教授	准教授/講師	助教/准助教	研究員等
素粒子理論	鈴木 博	津村 浩二 下村 崇(客員)	大塚 啓 内田 祥紀 (特プロ)	山津 直樹 (学術研究員)
理論核物理	緒方 一介	湊 太志	小川 翔也 (特プロ)	
宇宙物理理論	山本 一博	菅野 優美 南部 保貞 (特プロ)	倉持 結 (特プロ) 松村 央 (特プロ)	
粒子系理論	原田 恒司+	大河内 豊+ 小島 健太郎+ 中里 健一郎+	田尾 周一郎+	福井 徳朗+(助教)
素粒子実験	川越 清以 東城 順治	吉岡 瑞樹*	末原 大幹 森津 学 音野 瑛俊*	細川 律也* 小川 真治* (学振 PD) 水野 貴裕 (学術研究員) 重松 さおり* (TS)
実験核物理	若狭 智嗣 坂口 聡志	寺西 高 市川 雄一	西畑 洸希	森田 浩介++ (教授) 佐伯 恵子 (TS)
物性理論	福田 順一	松井 淳 (講師)	多羅間 充輔	
統計物理学		野村 清英		
凝縮系理論	野村 健太郎		仲井 良太 (特任) 小林 浩二 (特任)	
数理物理		成清 修		
磁性物理学	和田 裕文	光田 暁弘		
光物性		中村 祥子		
固体電子物性	木村 崇		山田 和正 大西 紘平 荒井 毅 (准助教)	Hu Shaojie (学術研究員) Dion Troy (学振 PD) 石間 美香 (TS)
複雑物性基礎	木村 康之	稲垣 紫緒	小林 史明	
複雑生命物性	水野 大介		江端 宏之	
複雑流体		前多 裕介		

基幹教育院+, 高等研究院++, RCAPP\*, TS = テクニカルスタッフ

加速器・ビーム応用科学センター	岩村 龍典(技術職員)
-----------------	-------------

## 令和4年度 各種委員一覧

部門長・専攻長・学科長： 木村(康)

副部門長： 若狭、水野

将来計画委員： ○若狭、東城、野村(健)、光田、前多、津村、[木村(康)]

人事 WG： ○若狭、鈴木、福田、木村(崇)、水野、[木村(康)]

入試委員長： ○福田(全ての入試関連委員会の統括)

教育課程委員： ○山本、△緒方、前多、野村(清)、坂口、大西、[木村(康)]

教育支援室： 山本、松井

助の会幹事： 西畑、江端(副幹事)

社会連携委員： 川越

奨学金資格検討委員： ○鈴木、津村、成清、市川、大西

経理委員： 水野、野村(健)

業績評価部会： 野村(健)、[木村(康)]

就職担当： 木村(崇)、光田

成績管理： 寺西(成績ソフト)、松井

図書委員： 成清、東城

情報委員： ○野村(清)、松井、寺西、山田

支線 LAN 管理者： 松井、山田

広報委員： ○前多、津村、坂口、末原、市川

エントランス展示： ○寺西、前多

大学院(大学)説明会： 光田(大学院5月)、松井(オープンキャンパス8月)、山田

年次報告： 成清、津村

談話会： 稲垣

教員積立会計： 菅野

教員免許更新講習： 和田、野村(清)

衛生管理： ○市川、松井、荒井、福田、山田

体験入学・オリエンテーション： ○稲垣、菅野、山田、光田、[寺西]、[坂口]、  
大西、荒井、森津、江端

いざない編集委員： 末原

なんでも相談窓口： 松井、江端

障害学生支援： ○坂口、成清、西畑、[木村(康)]

ハラスメント関連支援室： ○山本、稲垣、松井、西畑

科研費採択率向上委員： 和田

留学相談委員： 前多 (○は委員長、△は副委員長)

## 令和4年度 物理学教室談話会

世話人 稲垣 紫緒

### 第1回物理学教室談話会

講演題目: 結晶構造の記述子

講師: 小口 多美夫 氏(大阪大学 基礎工学研究科 附属スピントロニクス学術連  
携研究教育センター特任教授)

日時: 7月6日(水)14:50~16:20

場所:物理部門会議室 (W1-A-711)

### 第2回物理学教室談話会

講演題目: 流体力学を考慮したアクティブ粒子系の直接数値シミュレーション

講師: 山本 量一 氏(京都大学大学院工学研究科化学工学専攻教授)

日時:7月28日(木)16:30~18:00

場所:物理講義室(W1-D-315)

### 第3回物理学教室談話会

講演題目:観測的宇宙論と量子重力の交差点

講師: 野海 俊文 氏 (神戸大学大学院理学研究科 物理学専攻 准教授)

日時: 8月2日(火)16:40~18:00

場所:物理講義室(W1-B-211)

### 第4回物理学教室談話会

講演題目: 余剰次元の探索実験

講師: 村田 次郎 氏 (立教大学理学部・教授)

日時: 9月29日(木) 14:50~16:20

場所:物理講義室 (W1-B-211)

### 第5回物理学教室談話会

講演題目: New scenario of QCD axion clump formation

講師: 浦川 優子 氏 (高エネルギー加速器研究機構・准教授)

日時: 11月24日(木)16:40~18:10

場所:物理講義室 (W1-B-211)

### 第6回 物理教室談話会

講演題目: 高エネルギーガンマ線天文学の現状と将来

講師：手嶋 政廣 氏（東京大学宇宙線研究所）

日時：12月8日(木)16:40 - 18:00

場所：物理講義室 (W1-B-211)

#### 第7回 物理教室談話会

講演題目：TUCANによる中性子電気双極子モーメント探索実験

講師：川崎 真介 氏（高エネルギー加速器研究機構・准教授）

日時：12月22日(木)16:40～18:10

場所：物理講義室 (W1-B-211)

#### 第8回物理学教室談話会

講演題目：量子多体傷跡状態の代数的構成法

講師：桂 法称 氏 氏（東京大学・准教授）

日時：2月1日(水)16:30～18:00

場所：物理講義室(W1-D-315)

## 令和4年度 非常勤講師一覧

講師	所属	題目
小口 多美夫	大阪大学 基礎工学研究科 附属スピントロニクス学術連携研究教育センター	バンド理論の基礎と応用
山本 量一	京都大学大学院工学研究科	物理モデリングで複雑な系のダイナミクスを理解する
野海 俊文	神戸大学大学院理学研究科	量子重力と素粒子論・宇宙論
村田 次郎	立教大学理学部	近距離重力実験による余剰次元の探索
浦川 優子	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所	アキシオン宇宙論
手嶋 政廣	東京大学宇宙線研究所	高エネルギーガンマ線天文学
川崎 真介	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所	低速中性子を用いた基礎物理実験
松井 卓	九州大学大学院数理学研究院	量子スピン系の数理
桂 法称	東京大学大学院理学系研究科	量子多体傷跡状態の代数的構成法

## 令和4年度 外国人研究者等受入記録

所属・職・氏名	所在地	受入目的	受入期間	受入者
HU SHAOJIE	中国	学術研究員	令和4年11月1日～ 令和5年3月31日	木村 崇

## 令和4年度 教育課程委員会活動報告

山本 一博

2022 年 4 月 1 日における委員名簿と各委員の役割

役割	担当者
委員長	山本
時間割・シラバス	坂口
学科 FD	前多
コース分属	山本
中期計画	山本
過年度担当	松井、大西、山本
国際コース	緒方
特研配属	坂口
カリキュラム	野村
基幹教育科目	前多
アンケート	西畑
授業参観	オンラインで中断
文書確認	山本

2022 年度の教育課程委員会の活動を時系列順に列挙すると以下のようになる:

- ・ コロナ禍における授業方針の決定
- ・ アドバイザー担当決定
- ・ カリキュラムマップのブラッシュアップ
- ・ 学部新入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・ 過年度生に対する個別の履修指導
- ・ 大学院生新入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・ 学習支援室の体制の整備、役割(過年度生の学習支援など)の設定、TA の設定
- ・ 合理的配慮を必要とする学生への対応の連絡と調整 ・ 講義、シラバス入力の設定
- ・ 学生の入試形態別学力の追跡調査
- ・ 新入生 基礎学力調査の実施 ・「大学の实力調査」への対応
- ・ 教職免許法改正に向けた担当教員の調整
- ・ 2020年度からの基幹教育カリキュラムの変更点の点検と検討
- ・ 基幹教育科目部局担当コマに関連する調整
- ・ 後期の授業時間割の確認、調整

- ・ 過年度生の 2 年次進級判定の準備
  - ・ 国際コース配属学生への対応
  - ・ 学部入学者に係る個人用パソコンの仕様の設定
  - ・ 次年度の講義担当希望調査、原案作成および調整
  - ・ 学生実験担当者のミーティング
  - ・ 授業アンケート実施・問題点への対応
  - ・ 国際コースに関連した外国語を用いた科目の設定案作成、調整
  - ・ 担任、アドバイザー、科目担当者等を交えた成績不振者との面談と修学指導
  - ・ 過年度生のコース分属認定と専攻科目の履修に関する(個別)指導
  - ・ 他学科科目等の単位認定申請に対する対応
  - ・ 2023年度入学者向けの専攻科目一覧案及び時間割案作成
  - ・ 物理学科ファカルティディベロプメント(FD)
- 『物理数学の教育と演習授業における効果的な学習』の実施
- ・ 学外非常勤講師授業計画作成
- 『修得単位自己チェック表』の確認
- ・ 大学院特別講義番号の設定
  - ・ 障がいのある学生の修学支援実態調査への対応
  - ・ 2022年度入学者対象のコース配属予備調査
  - ・ 特別研究生配属調整
  - ・ 次年度進級・新入生・編入生ガイダンス計画
  - ・ コース配属
  - ・ 次年度理学部・理学府履修の手引きの確認作業

当該年度は、前年度より継続的に拡大する Covid-19 の蔓延による緊急事態宣言やまん延防止措置等で、引き続き大学からの行動制限が発令されている状況の中、これまでに確立した Web 会議システムを用いた授業スタイル、とりわけ対面参加者の人数を制限した状況でのハイブリッド(ハイフレックス)型講義の実施などを積極的に実施し、物理学科では可能な限り対面型での授業実施を行った。また、今年度入学生よりクォーター制に合わせたカリキュラムが2年目となった。研究室配属に関する方法を検討し直し、学生の希望に沿いながら、また配属数がゼロとなる研究室がないような改革を行なった。また、引き続き、教育カリキュラムなどに学生の意見をより反映させる仕組みを構築したい。特に、F D で問題となった1年次、2年次における物理数学を含むカリキュラムは今後の検討課題である。また、博士学生の充足率が問題となり、博士学生の経済的・キャリアパスの支援と取り組みと合わせて今後の課題である。

## 令和4年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

「物理数学の教育と効果的な演習に向けて」

開催日時:令和5年3月13日(月) 13:00~14:30

開催場所:Zoom ミーティングによるオンライン会議

講師: 理学研究院物理学部門・助教 大塚 啓 先生

理学研究院物理学部門・助教 小川翔也 先生

物理学部門では、大学院理学研究院・大学院理学府の中期目標・中期計画を軸にファカルティ・ディベロップメントを行っている。本年度は、物理数学の教育と演習授業における効果的な学習をテーマとしたFD セミナーを開催した。物理数学は物理学の体系的な学習には基礎となるものであり、その理解は力学・電磁気学・統計力学・量子力学のいずれにおいても不可欠といえます。特に、物理数学の基本的な知識はその後の専門科目においても必要となることが多く、初年次から系統的な学習が行われているかを部門教員で共有することが重要ということが教育課程委員会での議論に上がりました。そこで本年度のFD では2年次の物理数学演習と4年次の物理学総合演習を担当する先生2名にご講演をお願いし、物理数学のカリキュラムに関する現状をご説明していただくとともに、授業担当経験からうかがえる学生の習熟度について分析をしていただいた。授業内での演習問題への取り組みから、微分・積分、線形代数、ベクトル解析、フーリエ級数展開などに関する基礎的な理解が4年次になっても不十分なケースも見られることが指摘された。

続いて、自由討論が行われ、物理数学に関するカリキュラムについて議論がなされた。1年次前期の物理学入門 I で線形代数や微分・積分などの基本的な内容をカバーするものの、後期には物理数学に特化した講義がないことから継続的な学習という点では工夫の余地があるという意見があった。また、実際の学力を調査していくために、2年生に進学した時点で物理数学の小テストを行う案が議論された。これをもとに令和5年度より前期の必修授業の中で物理数学に関する確認テストを行い、継続的な理解度チェックを行っていく具体的な指針が示された。以上のように、物理数学の効果的な教育を通じて当研究院・当専攻の授業の理解度を高める方策を共有する場となった。

## 令和4年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科(情報理学コースを含む)	57	58
物理学科3年次編入	3	—
修士課程(物理学専攻)	45	42
博士課程(物理学専攻)	14	5

※修士課程 45

内訳 4月入学(41)、10月入学:国際コース(4)

## 令和4年度 就職・進学状況

パンデミックも終息宣言となり、経済が回復し、雇用の需要が一気に回復した時期でもあったため、世の中的に、売り手市場となり、九大全体、更には、物理学科・専攻としても、求人倍率は大幅に向上した。一方、就職活動のやり方に関しては、オンライン面接が継続して実施されており、学生にとっては、以前よりも幅広い活動ができる状況になってきていると考えられる。また、日本経済団体連合会の要請から、就職選考活動の時期や内定を出せる時期が大きく制限されているため、インターンシップを介して、優秀な学生と接触する動きも有り、逆に学生にとっても、企業の内側を知ることのできる良い機会として、インターンシップは、極めて重要な存在となっている。一方で、昔と比べると、推薦書の重みが大きく変わってきている。後付け推薦などを要求する企業も多く、就職担当教員としては、学生らが後悔しない企業に就職できるように、サポートしていきたい。

以下に、内定先一覧を示す。学部生は90%以上が修士課程(他大学を含む)に進学しており、大半が修士課程の内定先である。

### 【令和4年度卒業生の内定先一覧】

株式会社リンクコーポレートコミュニケーションズ、JFE システムズ株式会社  
日本電気株式会社、九州 NS ソリューションズ株式会社、日本電信電話株式会社  
日立製作所、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社、  
三菱重工業株式会社、株式会社とめ研究所、トヨタ自動車株式会社、川崎重工業株式会社、株式会社内田洋行、九州電力株式会社及び九州電力送配電株式会社、株式会社シティアスコム、株式会社 SRD、株式会社 SANKYO、英進館株式会社、住友重機械工業株式会社イオンテクノロジー事業部、株式会社ニトリ、西日本旅客鉄道株式会社、株式会社中外医科学研究所、株式会社東京企画、パナソニック株式会社、長崎県高等学校教員

## 令和4年度 体験入学・公開講座報告

担当:稲垣 紫緒

本年は新型コロナウイルス感染防止対策を鑑み、定員35名の現地開催と Zoom オンライン会議を併用したハイブリッド開催として、令和5年3月28日(火)に23名限定の対面講義と、47名のオンライン講座のハイブリッド形式で「第26回体験物理学」を開催した。実際のセミナーの内容、スケジュール、担当者は下記のプログラムに示す。物理学部門では、毎年3月の春休み期間を利用して、高校1・2年生を対象とした体験入学を実施している。このうち講義部分を公開講座として広く開放することとし、大学への3年次編入を考えている高等専門学校生への説明会を兼ねている。例年と同様に、福岡県内の全ての高校と周辺県の有力高校に案内状を送り参加者を募集した。近年、理科離れや学力低下が叫ばれるようになり、理科に対する興味・関心や学習意欲を喚起する必要性がますます高まっている。体験入学は今年度で26回目を数え、当部門がいち早くその重要性に気づき活動してきたものと自負している。体験入学参加者の住所は福岡を中心に、大分、長崎、佐賀、鹿児島など広範囲にわたり、広く認知されている。対面講義とオンライン講義の希望者はちょうど半分ずつに分かれており、ハイブリッド形式による開催は遠隔地からの参加を希望する学生にとってメリットがあることがうかがえた。参加者からは、素粒子と宇宙の関係、日常に潜む現象の物理学についてなど、数多くの質問があり、物理に興味を持ってもらう意義が果たされている。女子学生の参加者も20名ほどおり、女子学生の進学希望者増加に効果が期待される。

本年度も新型コロナウイルス感染対策のために体験実験を実施することが困難であったため、午前の部には物理学科紹介に続いて2件のセミナーを行い、素粒子物理学・宇宙物理学・物性物理学の最先端の内容について体験授業を行った。質問も数多く出たことやイベント終了後のアンケートでも2件ともセミナーの難易度は適切で講義内容も関心が深いという意見が大多数を占めたことから、高校生・高専生の興味を引きつけるものであったことが伺える。

後の部には大学生・大学院生・教員を交えた懇談会とオンライン研究室見学ツアー(素粒子実験研究室、複雑生命物性研究室)を行った。大学での物理学の学習や、研究の進め方などについて重点を置きながら2研究室の紹介を行って頂いた。大学院生との座談会では物理学科を目指したきっかけ、大学時代の過ごし方など、学生自身の体験と大学で学ぶ物理の魅力を参加者と情報共有することができた。事後アンケートでは、この企画は大変好評で、体験入学イベント終了後にも参加生徒から質問をメールで頂く等、概ね好評であったと考えている。一方で、体験実験が開催されなかつ

た点に惜しむ声もあった。次回開催では新型ウィルス対策を行った上での体験実験プログラムの開催を検討するなど、体験物理学イベントの内容を充実させて行くことが重要である。

[プログラム]

	3月28日(火)
9:40～	対面講義会場・オンライン会場入室開始
10:00～10:40	開校式
10:40～11:10	「素粒子の究極理論を探る」(講師:大塚啓 助教)
11:10～11:25	15分休憩
11:25～11:55	「磁石の物理」(講師:光田暁弘 准教授)
昼休み	
13:00～14:30	オンライン研究室ツアーと大学生との懇談会
14:30～14:45	閉校式

参加募集 HP

【3/28】第26回体験物理学～物理の世界を体験しよう～

[https://www.phys.kyushu-u.ac.jp/koho/event/event\\_230116a.html](https://www.phys.kyushu-u.ac.jp/koho/event/event_230116a.html)

「九州大学理学部物理学科 公開講座」

[https://www.phys.kyushu-u.ac.jp/koho/event/event\\_230116b.html](https://www.phys.kyushu-u.ac.jp/koho/event/event_230116b.html)

## 令和4年度 社会貢献活動報告

社会連携委員長 川越清以

### 1 先端科学普及事業(高校への出張講義など)

以下の高校において、模擬講義及び理学部・物理学科の説明(入試状況, カリキュラム, 就職状況等)を行った。

福岡県立宗像高等学校

開催日:2022年 9月17日(土)

対象:1・2年生 参加人数20名程度

講師:緒方一介 教授

### 2 先端科学体験事業(高校生の体験入学など)

第26回体験物理学～物理の世界を探検しよう～

開催日:2023 年 3月28日(火)

対象:高校生 参加人数 50名

ハイブリッド形式(対面:九州大学理学部)

担当:稲垣紫緒 准教授、菅野優美 准教授

### 3 オープンキャンパス

昨年に引き続き、オンラインで開催

- 物理学科説明会:令和4年8月6日(土) 午前10時～正午
  - (1)物理学科および物理学コースの紹介 部門長 木村康之 教授
  - (2)情報理学コースの紹介 コース長 志堂寺和則 教授
  - (3)進路・就職について 就職担当 木村崇 教授
  - (4)研究紹介「ソフトマター物理学の世界」稲垣紫緒 准教授
- 研究紹介ポスター展示: 令和4年8月よりClusterワールドで公開
- 「受験生向け特設サイト(九州大学HP内)」にて、令和4年8月1日より一般公開(現在も公開中)

- 理学部の紹介動画、パンフレット、各学科・研究室の紹介動画、模擬授業など、多様な企画を掲載

#### 4 中等教育担当教員研修事業(高校教育を対象としたリカレント教育)

開催日:2022 年 8月10日(水)

対象:福岡県高校理科教諭 参加人数 33名

実施場所:九州大学理学部

担当:木村崇 教授、津村浩二 准教授

#### 5 展示 WG 令和4年度(エントランスホール)

- 1) ナノ構造で顕在化する量子伝導現象とその可能性(ケース)
- 2) 九州大学における加速器開発の歴史(ケース)
- 3) 物理学部門の概要—物性物理学分野(パネル)
- 4) 物理学部門の概要—粒子物理学分野(パネル)