

物理教室年次報告書（暫定版）

令和3年度

2022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3年度の研究・教育活動報告	
素粒子理論	2
理論核物理	20
宇宙物理理論	30
粒子系理論物理学	45
素粒子実験（準備中）	52
実験核物理	54
物性理論	77
統計物理学	85
凝縮系理論	89
磁性物理学	93
量子微小物性	99
固体電子物性	109
複雑物性基礎	117
複雑流体	127
複雑生命物性	137
客員教授	146
教職員一覧	147
各種委員一覧	148
物理学教室談話会	149
非常勤講師一覧	152
外国人研究者等受入記録	153
教育課程委員会活動報告	154
物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告	156
入学者数と卒業者数	157
就職・進学状況	158
体験入学・公開講座報告	159
社会貢献活動報告	161

はじめに

本年次報告は、九州大学理学研究院物理学部門の2021年度の活動をまとめたものです。2021年度は、2019年度末からはじまった新型コロナウイルス感染が引き続き拡大と収束を繰り返す状況にありました。この困難な状況下で本学にふさわしい水準の研究・教育活動が行えたことは、物理学部門の皆さんが臨機応変にご対応・ご尽力いただいた賜物であり、あらためて御礼申し上げます。コロナ対応に工夫を凝らすなかで、情報技術を活用した効率的で場所を選ばない活動が一般的となり、地方を拠点とする私たちには災い転じて福となる効果も得られたように思います。

物理学部門の人事に関することとしては、10月に素粒子実験研究室に森津学助教、複雑生命物性研究室に江端宏之助教が着任され、1月には素粒子理論研究室に大塚啓助教が着任されました。他方、8月に松本琢磨助教、郷慎太郎助教、12月に藪中俊介助教、3月に池田陽一准教授、植松祐輝助教が他機関・他大学にそれぞれ転出されました。また3月には、森田浩介先生と渡部行男先生が定年退職されました。皆様の今後の活躍を願っております。

次に表彰関連では、学生の別府航早さんが日本物理学会学生優秀発表賞、森川億人さんが素粒子メダル奨励賞、坂本 遼太さんがKyushu U 3MT Competition, Runner-up award、第17回日本生物物理学会若手奨励賞、加藤修三さんが第6回日本生物物理学会学生発表賞、杉山晃一さんが日本放射化学会第65回討論会若手優秀発表賞の表彰を受けております。

教育関連では、9月に学士1名、修士1名、博士1名、3月に学士52(41)名(括弧内は物理学コース)、修士40名、博士7名(物理学専攻)を送り出しました。様々な活動や交流が制限される困難な状況のなか立派に修学された皆さんが、物理学科・物理学専攻で学んだことを生かし、新しいステージでも力強く活躍されることを期待しております。

運営面では、2018年度から和田裕文教授が理学研究院長を務められてきましたが、今年はその任期の最終年度であり、理学研究院全体の一層の発展のために大きな貢献をされました。木村康之教授も執行部の一員として理学研究院の運営にご尽力されました。2022年度からは新研究院長のもとで、木村崇教授と鈴木博教授が執行部で活動されます。

2022年度の物理学部門長は、2度目の大役となりますが、木村康之教授が務められることになりました。コロナ禍に加え昨今の厳しい社会情勢の影響を被る状況下ではありますが、木村先生を中心に物理学部門の一層の発展を期待すると共に、本報告の読者の方には、今後ともご指導、ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

物理学教室の活動に関する詳しい情報は、ウェブサイト

<http://www.phys.kyushu-u.ac.jp>

にあります。ニュース等は随時更新されていますので、是非御覧下さい。

物理学部門 部門長 水野大介

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

《 博士研究員 》

山津直樹 内田祥紀

《 大学院 博士課程 》

《 大学院 修士課程 》

宮川侑樹 阿部元一 西村皐 宮尾光

《 学部 卒業研究生 》

小倉智大 小野田壮真 甲斐貴文 土場優雅

中嶋陽平

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

研究・教育目標と成果

グラディエントフローを用いたエネルギー運動量テンソルの構成における $t \rightarrow 0$ への外挿公式の研究（鈴木博）

（この研究は高浦大雅氏（高エネルギー加速器研究機構）との共同研究です。）ゲージ理論の複合演算子のグラディエントフローを用いた非摂動的な構成は、格子ゲージ理論におけるエネルギー運動量テンソルの相関関数の測定などに極めて有効な手法を与える。ただし、この方法ではフローさせる時間 t の $t \rightarrow 0$ の極限を取る必要がある

が、この極限は有限の UV カットオフ（格子間隔）に対しては取れないため、数値シミュレーション測定値の $t \rightarrow 0$ への外挿を行う必要がある。従来この外挿には線形関数などが試行的に使われてきたが、数値計算の精度が上がるにつれ、より理論的基礎のはっきりした外挿公式が望まれるようになった。ここでは、摂動級数の誤差の $t \rightarrow 0$ の振る舞いがくりこみ群で制御される観点から、エネルギー運動量テンソルに対して $t \rightarrow 0$ への外挿公式の形を議論した。今後、この考察の数値シミュレーションへの応用が期待される。

グラディエントフロー厳密くりこみ群のベクトル型ゲージ理論への拡張（宮川侑樹・鈴木博）

K. ウィルソンにより創始された厳密くりこみ群は、スケール変換のもとでの物理系の応答を系統的に捉える枠組みである。この枠組みは特に（摂動論を越えた範囲でも）場の量子論を定式化するために極めて基本的である。しかしながら通常の厳密くりこみ群は運動量切断を用いて定式化されるため、素粒子理論で重要なゲージ対称性を明白に保つことができない点が問題である。ここでは、運動量切断の代わりにゲージ共変な拡散方程式（グラディエントフロー方程式）を用いることで明白なゲージ対称性を保つ、グラディエントフロー厳密くりこみ群 (Gradient Flow Exact Renormalization Group: GFERG) をディラックフェルミオンを含むベクトル型ゲージ理論に拡張した。この定式化では特にカイラル対称性が Ginsparg–Wilson 関係式を通して実現される点が興味深く、カイラルアノマリーのくりこみ群変換のもとでの振る舞いの研究などにも有用と考えられる。

QED におけるグラディエントフロー厳密くりこみ群の摂動論的解析（宮川侑樹・鈴木博）

（この研究は園田英徳氏（神戸大学）との共同研究です。）我々がゲージ理論に対して近年提唱しているグラディエントフロー厳密くりこみ群 (GFERG) は、運動量切断の代わりにゲージ共変な拡散方程式を用いる厳密くりこみ群の定式化である。この定式化は明白なゲージ対称性を保つことができるため、厳密くりこみ群の非摂動論的応用においてより満足のいく近似法（ゲージ対称性を保った truncation）を可能にすると期待される。一方、この定式化は運動量切断を用いないため、結果とする汎関数積分の有限性が明白ではない。こうした疑問に答えるためには、まず摂動論的な解析を行うことで理解を深めることが重要である。ここでは、最も簡単なゲージ理論である量子電磁力学 (QED) における GFERG を考え、そこでの Wilson 作用をゲージ結合定数の 2 次のオーダーまで求めた。結果として、汎関数積分の有限性を保証する、また期待される摂動論的くりこみ群関数（ベータ関数）を再現する Wilson 作用が得られた。この

結果は、この定式化の正当性を支持するものになっている。

グラディエントフロー厳密くりこみ群における 1PI Wilson 作用の定式化 (鈴木博)

(この研究は園田英徳氏 (神戸大学) との共同研究です。) 厳密くりこみ群の非摂動的な応用においては、汎関数積分の重みを与える Wilson 作用自身ではなく、そのルジャンドル変換に相当する一粒子既約 (1PI) 作用を考えることが主流になっている。これは、Wilson 作用に比べて 1PI 作用は頂点関数を直接に表すため、作用の非摂動的 ansatz を置く際 1PI 作用の方がより「経済的」であるためである。ここでは、我々が近年提唱しているグラディエントフロー厳密くりこみ群 (GFERG) における 1PI 作用を与えるルジャンドル変換を定式化した。結果とする 1PI 作用は確かに期待される性質を持っている。また、この 1PI 作用が満たすくりこみ群方程式を導出した。これは通常の厳密くりこみ群における 1PI 作用に対するくりこみ群方程式 (いわゆる Wetterich 方程式) に比べて、明白なゲージ対称性を保つために極めて複雑になるが、解くべき方程式の複雑性を考えても明白なゲージ対称性には応用上の優位性があると考えている。非摂動的な問題への応用が待たれる。

PQ 機構としてのバリオン数の破れの研究 (津村浩二・竹内健悟)

(この研究は大畠隆弘氏 (京都大) との共同研究です。) 強い力を支配する理論である QCD において、CP 対称性は偶発的に保存しています。この CP 対称性を自然に導く方法が PQ 機構で、PQ 対称性と呼ばれる大域的対称性を理論に導入することで実現されます。しかしながら、大域的対称性の起源は明らかではなく、その起源が我々の世界で実現されているバリオン数の保存則と関係しているのではないかと可能性を追求しました。結果として、多様なバリオン数の破れの現象を導くモデルを構築することに成功しました。

擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質と大統一理論についての研究 (津村浩二・山津直樹)

(この研究は阿部慶彦氏 (京都大)、藤間崇氏 (金沢大) との共同研究です。) 暗黒物質はその存在が確実視されているものの、その直接検出には成功していません。長足の観測の進展により、とても強い制限がつけられるようになったため、何か直接検出を抑制する機構が働いている可能性が検討されるようになりました。そのような可能性の一つが擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質です。南部ゴールドストーンボソンは対称性の破れに伴って生じるため、その起源が大統一理論であるようなモデルを提唱しました。

FASER 実験による非弾性暗黒物質の検証可能性（下村崇）

（この研究は野村敬明、Jinmian Li（四川大学）との共同研究です。）暗黒物質と縮退した質量を持つ暗黒粒子が存在し、それらが相互作用で入れ替わる場合を非弾性暗黒物質と呼ぶ。先行研究で暗黒光子の崩壊から暗黒粒子を作り、その暗黒光子の崩壊を探することでどこまで非弾性暗黒物質を探索できるかが明らかにされていた。この研究では暗黒光子の崩壊から暗黒粒子が作れないスペクトラムの場合、どこまで探索可能かを調べた。暗黒光子が自発的対称性の破れによって質量を得ている場合、対称性の破れによるスカラー粒子が存在する。このスカラー粒子は同時に暗黒物質/粒子にも質量を与えていると考えられるため、その崩壊から暗黒粒子が生成され得る。これを利用して中間子の崩壊からスカラー粒子が作られ、その崩壊から暗黒粒子が生成される場合を解析した。その結果、これまでよりも重い質量領域を探索できる事を明らかにした。また典型的なスペクトラムにおいて、フェルミオン暗黒物質の場合は暗黒物質の残存量を説明できるパラメーター領域が存在するが、スカラー暗黒物質の場合は全てのパラメーター領域が排除されている事を示した。今後は FASER ν 実験と組み合わせた場合にどこまで探索領域が広がるかを調べていく。また自己相互作用暗黒物質の場合の感度を明らかにしていく予定である。

レプトンフレーバーの破れを媒介する軽いボソンの検証可能性（下村崇）

（これは主に荒木威氏（奥羽大）、浅井健人氏（東大宇宙線研）、田窪洋介氏（KEK）、音野瑛俊氏（九大）との共同研究です。）GeV 以下の新粒子を含む低スケールの新たな物理法則の可能性に着目し、暗黒セクターにニュートリノの質量の起源がある場合のレプトンフレーバーの破れの項への制限と FASER 実験による検証可能性を調べた。この研究では暗黒セクターへのポータル粒子として、CP 偶または奇のスカラー粒子、およびゲージ粒子を考え、湯川型、ベクトル型、双極子型のレプトンフレーバーを破る相互作用が現れるための条件を議論した。またその様な相互作用が存在すると、過去に行われた E137 実験（電子-陽電子衝突実験）においてレプトンフレーバーを破る相互作用からポータル粒子が生成され得る事に気づき、実験結果を用いてフレーバーを破る結合定数への制限を明らかにした。これらの結果をもとに、今年始まった FASER 実験での探索可能性についての解析を行い、FASER2 実験ではこれまで探索不可能だったパラメーター領域を探索できる事を明らかにした。この成果は現在論文にまとめている最中である。今後は暗黒セクターでのニュートリノ質量生成機構を持つ具体的なモデルの構築を行なっていく予定である。

高次元理論が示唆する 4 次元モジュラーフレーバーモデル（大塚啓）

（この研究は菊地渉太氏、小林達夫氏、内田光氏（北海道大学）、谷本盛光氏（新潟

大)、山本恵氏(広島大)との共同研究です。)湯川結合のもつ対称性を明らかにするあたり、近年発展が著しいモジュラー対称性に基づくフレーバー模型(“モジュラーフレーバー模型”)に注目した。従来のフレーバー模型とは異なり、モジュラーフレーバー模型はモジュラー形式で制限された湯川結合を扱い、少ないパラメーターで素粒子のフレーバー構造並びに(レプトンセクターの)CP対称性の破れに対する予言を行うことが可能である。本研究では、高次元理論に基づき4次元モジュラーフレーバー模型の導出方法を提案した。余剰次元空間がモジュラー対称性(幾何学的対称性)をもつ場合、モジュラー形式で記述される余剰次元空間上の物質場の波動関数及び湯川結合が得られる。このシナリオは、余剰次元空間の構造に依らず、モジュラー対称性を保つ広範なコンパクト化機構で実現可能である。

超対称性の破れと A_4 モジュラー対称性に基づくニュートリノ質量生成(大塚啓)

(この研究は岡田寛氏(APCTP)との共同研究です。)本研究では、 $SL(2, \mathbb{Z})$ モジュラー対称性に埋め込まれる A_4 対称性 (A_4 モジュラー対称性) がレプトンセクターのフレーバー対称性である模型に注目した。これまで、 A_4 モジュラー対称性に基づくフレーバー模型はレプトンセクターのフレーバー構造を理解する有力な模型の一つとして知られていたが、超対称性の破れ、特に超対称性の破れに伴い質量を獲得する超対称性粒子の解析については議論されていなかった。本研究では、超対称性粒子が引き起こすニュートリノの質量生成機構を議論し、超対称性粒子のループ補正の寄与は無視できないことを指摘した。

超対称性の破れとモジュラー対称性(大塚啓)

(この研究は菊地渉太氏、小林達夫氏、那須海渡氏、高田翔平氏、内田光氏(北海道大学)との共同研究です。)4次元超重力理論の枠組みで、超対称性粒子の質量や結合項がモジュラー対称性を保つかどうかを議論した。特に、弦理論の予言するコンパクト空間の計量のゆらぎであるモジュライ場が超対称性の破れを引き起こす場合、超対称性粒子の質量項、3点結合はモジュラー対称性を保つことを明らかにした。そのため、湯川結合と超対称性粒子間の3点結合は、同じフレーバー構造で決定される。本研究結果は、超対称性の破れのスケール以下の有効理論、特に素粒子標準模型有効場の理論における現象論解析において重要になる。

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(大阪大学)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す。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ますが、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新たに評価できるようになります。新しいスカラー粒子、新しいフェルミオン粒子を付加した拡張ヒッグス有効理論において、相互作用の係数同士が満たすべき関係式を導出しました。

背景磁場を含む 6 次元理論の自然さ問題 (津村浩二・内田祥紀)

余剰次元の存在を仮定する理論は、素粒子標準模型が持ついくつかの問題を解決することができます。中でも背景磁場を含む理論は、フェルミオンをカイラルにできる、世代数を説明できるなど、魅力的な模型になっています。対称性が自発的に破れた余剰次元模型において、背景磁場を導入することは困難であることを見出しました。今後は、さまざまな対称性のもとでのゲージ場質量を評価し、標準模型が持つ問題にアプローチできるか調べる予定です。

電弱対称性相と左右対称性相、相転移現象 (山津直樹)

(これは主に船津周一郎氏 (華中師範大学)、幡中久樹氏、細谷裕氏 (大阪大学)、折笠雄太氏 (チェコ工科大学) との共同研究である。) $SU(3) \times SO(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統一理論での有限温度でのヒッグスの有効ポテンシャル解析からこれまで考えていなかった対称性を持った相 (左右対称性相) を発見し、従来から知られていた電弱対称性相も含めてそれらの相構造を解析しました。その結果、左右対称性相からの電弱対称性相への相転移現象がカルツァ-クライン質量のスケールより若干低いスケールで起こることが判明しました。近年のアメリカのレーザー干渉計重力波天文台 LIGO での重力波の観測以後、ブラックホールや中性子などの衝突や合体により発生する重力波だけでなく、電弱対称性などの相転移現象から生じる重力波についての観測可能性なども議論されています。そのため、新しく見つけた相左右対称性相から電弱対称性相への相転移現象から発生する重力波の強さを解析しました。結果、将来の宇宙空間で重力波観測を行う実験であるレーザー干渉計宇宙アンテナ LISA の感度でも見えない極めて弱い重力波しか発生しないことが判明しました。

アハロノム-ボーム位相に伴う量子異常の変化 (山津直樹)

(これは主に船津周一郎氏 (神戸大学)、幡中久樹氏、細谷裕氏 (大阪大学)、折笠雄太氏 (チェコ工科大学) との共同研究である。) 最近ゲージ・ヒッグス統一理論での有限温度効果の研究から相転移現象においてアハロノム-ボーム (AB) 位相の変化によりカイラルフェルミオンが消失または生成するという奇妙な現象が発見されました。この現象の基本的な性質を調べるためにまず Toy 模型として $SU(2)$ ゲージ・ヒッグス模型での質量スペクトル、ゲージ結合定数、 $SU(2)$ の部分群の $U(1)$ ゲージ対称性の量子異常係数の AB 位相への依存性を調べました。平坦な余剰次元についての解析から量子

異常が突然消失したり生成しているわけではなく AB 位相を変えると質量スペクトルの特定の AB 位相の値でレベルクロッシングと呼ばれる質量が縮退する現象が起こり、その前後でモードの転換が起こっているため質量の固有状態で軽い方からモードに名前を付けたりする場合には別のモードとの結合を見ているだけということが判明しました。さらに、曲がった余剰次元空間の場合にも解析を進めたところこちらでは質量スペクトルに特別な AB 位相の値でレベルクロッシングのような現象は起こりませんが、AB 位相の変化に伴い質量固有状態でモードを定義するとモード間の混合により結合定数が連続的に変化することがわかり、結果として特定のフェルミオンからの量子異常係数への寄与は連続的にノンゼロからゼロ (またはその逆) に変化していくことが判明しました。今後はより現実的な模型についての量子異常の解析を行う予定にしています。

LHC 実験での Z' と W' ボソン探索からの制限 (山津直樹)

(これは主に船津周一郎氏 (神戸大学)、幡中久樹氏、細谷裕氏 (大阪大学)、折笠雄太氏 (チェコ工科大学) との共同研究である。) 近年セルンの大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) Run-2 での質量を持つ荷電ベクトルボソン (W') や質量を持つ中性ベクトルボソン (Z') の解析結果が ATLAS と CMS グループから公開されました。以前から提唱されていた $SU(3) \times SO(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統一模型については LHC Run-1 の解析が行われていましたが、今回はその模型と最近提唱された $SO(11)$ ゲージ・ヒッグス大統一理論の有効模型についての LHC Run-2 の Z' と W' ボソン探索を用いて模型の制限を調べました。結果として、以前から知られていた模型について LHC Run-1 からカルツァ-クライン質量に対して 8 TeV 程度以上という制限から Run-2 では 9 TeV 程度上、新たな模型では Run-2 からカルツァ-クライン質量に対して 13 TeV 程度以上という制限がつけられました。また、新たな模型について LHC Run-3 では 18 TeV 程度まで探索可能、今後の高輝度化した HL-LHC 実験では 22 TeV 程度まで探索可能であることが判明しました。

発表論文

《 原著論文 》

$t \rightarrow 0$ extrapolation function in the small flow time expansion method for the energy-momentum tensor:

Hiroshi Suzuki and Hiromasa Takaura,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **2021** (2021), 073B02
[arXiv:2102.02174 [hep-lat]]

Gradient flow exact renormalization group: Inclusion of fermion fields:
Yuki Miyakawa and Hiroshi Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2021** (2021), 083B04
[arXiv:2106.11142 [hep-th]]

Manifestly gauge invariant exact renormalization group for quantum electrodynamics:
Yuki Miyakawa, Hidenori Sonoda and Hiroshi Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2022** (2022), 023B02
[arXiv:2111.15529 [hep-th]]

One-particle irreducible Wilson action in the gradient flow exact renormalization group formalism:
Hidenori Sonoda and Hiroshi Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2022** (2022), 053B01
[arXiv:2201.04448 [hep-th]]

Baryon number non-conservation as Peccei-Quinn mechanism:
Takahiro Ohata, Kengo Takeuchi, Koji Tsumura,
Physical Review **D104**, 035026 (2021)
[arXiv:2104.14139 [hep-ph]]

Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter Model Inspired by Grand Unification:
Yoshihiko Abe, Takashi Toma, Koji Tsumura, Naoki Yamatsu,
Physical Review **D104**, 035011 (2021)
[arXiv:2104.13523 [hep-ph]]

Electron beam dump constraints on light bosons with lepton flavor violating couplings:
Takeshi Araki, Kento Asai, Takashi Shimomura,
Journal of High Energy Physics **11** (2021), 082
[arXiv:2107.07487 [hep-ph]]

Anomaly Flow by an Aharonov-Bohm Phase:

Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2022** (2022) 043B04
[arXiv:2202.01393 [hep-ph]]

Signals of W' and Z' Bosons at the LHC in the $SU(3) \times SO(5) \times U(1)$ Gauge-Higgs
Unification:

Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,
Physical Review **D105**, 055015 (2022)
[arXiv:2111.05624 [hep-ph]]

Electroweak and Left-Right Phase Transitions in $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ Gauge-Higgs
Unification:

Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,
Physical Review **D104**, 115018 (2021)
[arXiv:2111.05624 [hep-ph]]

《Proceedings》

Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of $SU(3)$
Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method:

Kazuyuki Kanaya, Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa,
Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda,
[arXiv:2110.10900 [hep-lat]]

《その他の論文》

Inelastic Dark Matter from Dark Higgs Boson Decays at FASER:

Jinian Li, Takaaki Nomura, Takashi Shimomura,
[arXiv:2112.12432 [hep-ph]].

4D modular flavor symmetric models inspired by higher dimensional theory:

Shota Kikuchi, Tatsuo Kobayashi, Hajime Otsuka, Morimitsu Tanimoto, Hikaru Uchida
and Kei Yamamoto,
[arXiv:2201.04505 [hep-ph]]

Radiative neutrino masses from modular A_4 symmetry and supersymmetry breaking:

Hiroshi Okada and Hajime Otsuka,
[arXiv:2202.10089 [hep-ph]]

Modular symmetry of soft supersymmetry breaking terms:

Shota Kikuchi, Tatsuo Kobayashi, Kaito Nasu, Hajime Otsuka, Shohei Takada and Hikaru Uchida,
[arXiv:2203.14667 [hep-ph]]

Bhabha Scattering in the Gauge-Higgs Unification:

huichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,
[arXiv:2203.16030 [hep-ph]]

Axial anomaly in the gradient flow exact renormalization group:

Yuki Miyakawa,
[arXiv:2201.08181 [hep-th]]

著書

なし

講演

《 海外での講演 》

Universal formula for the energy–momentum tensor via the gradient flow:

Hiroshi Suzuki,

invited talk at Physik-Department T30F, Technische Universität München、2021年4月23日、Technische Universität München、München、Germany、オンライン

Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter from Grand Unified Theory:

Koji Tsumura,

invited talk at The 7th Quantum Science (QS) symposium -The main symposium of ICCMSE 2021-Computational Chemistry and Computational Physics、2021年9月4-7日、Galaxy Hotel、Crete、Greece、オンライン

Dark photon from scalar boson decays at FASER:

Takashi Shimomura,

Searching for long-lived particles at the LHC and beyond: Ninth workshop of the LLP Community, 2021年5月25-28日

Fermion Pair Production at e^-e^+ Linear Collider Experiments in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification:

Naoki Yamatsu,

ILC Workshop on Potential Experiments (ILCX2021), 2021年10月26-29日、オンライン

Fermion Pair Production at e^-e^+ Linear Collider Experiments in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification:

Naoki Yamatsu,

The XXVIII International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 2021), 2021年8月23-28日、オンライン

Scattering amplitudes in generalized Higgs effective field theory:

Yoshiki Uchida,

parallel talk at ILC Workshop on Potential Experiments (ILCX2021), 2021年10月26-29日、オンライン

《国内での講演》

Gradient flow exact renormalization group

鈴木博

セミナー講演、2021年5月17日、名古屋大学理学部（オンライン）

Gradient flow exact renormalization group

鈴木博

セミナー講演、2021年5月18日、大阪大学理学部（オンライン）

Gradient flow exact renormalization group

鈴木博

セミナー講演、2021年5月21日、高エネルギー加速器研究機構理論センター（オンラ

イン)

有限温度量子色力学のダイナミクス

鈴木博

JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第13回シンポジウム、2021年7月9日、オンライン

Gradient flow exact renormalization group: A perturbative analysis

鈴木博

日本物理学会2021年秋季大会、2021年9月14日、オンライン

有限温度量子色力学における物理量の第一原理計算

鈴木博

第8回HPCIシステム利用研究課題成果報告会、2021年10月29日、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

セミナー講演、2022年1月12日、京都大学理学部（オンライン）

SFtX法による $N_f = 2 + 1$ フレーバー QCD の熱力学量

鈴木博

日本物理学会第77回年次大会2021、2022年3月16日、オンライン

擬南部ゴールドストーン暗黒物質と大統一理論

津村浩二

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

PQ機構としてのバリオン数の破れ

津村浩二

素粒子物理学の進展 2021、2021年9月6-10日、オンライン

Vector Portal and Anomalies

下村崇

セミナー講演、2021年10月26日、九州大学理学部（オンライン）

Hidden structures in the landscape of heterotic line bundle models

大塚啓

セミナー講演、2022年2月1日、九州大学理学部（オンライン）

Anomalies on Warped Space in Gauge-Higgs Unification

船津周一郎, 幡中久樹, 細谷裕, 折笠雄太, 山津直樹

日本物理学会第77回年次大会 2021、2022年3月15-19日、オンライン

Anomaly flow by AB phases

細谷裕, 船津周一郎, 折笠雄太, 山津直樹, 幡中久樹

日本物理学会第77回年次大会 2021、2022年3月15-19日、オンライン

Signals of W' boson at the LHC in the GUT-inspired gauge-Higgs unification

船津周一郎, 幡中久樹, 細谷裕, 折笠雄太, 山津直樹

日本物理学会第77回年次大会 2021、2022年3月15-19日、オンライン

擬南部-ゴールドストーン暗黒物質の起源と大統一理論

阿部慶彦, 藤間崇, 津村浩二, 山津直樹

日本物理学会 2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

Anomalies in Gauge-Higgs Unification

船津周一郎, 幡中久樹, 細谷裕, 折笠雄太, 山津直樹

日本物理学会 2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

W' and Z' bosons in the GUT-inspired gauge-Higgs unification at the LHC

船津周一郎, 幡中久樹, 細谷裕, 折笠雄太, 山津直樹

日本物理学会 2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter model inspired by grand unification

山津直樹

ニュートリノ新学術研究会、2022年3月8日、千葉市生涯学習センター+オンライン

Anomaly Flow by an Aharonov-Bohm Phase

山津直樹

新ヒッグス勉強会第32回定例会、2022年2月19日、オンライン

ゲージ・ヒッグス大統一理論と有効模型

山津直樹

素粒子現象論研究会 2021、2021年11月6-8日、大阪市立大学

Fermion Pair Production at the ILC in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification

山津直樹

ILC夏の合宿 2021、2021年9月21-24日、オンライン

Fermion Pair Production at e^-e^+ Linear Collider Experiments in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification

山津直樹

基研研究会 素粒子物理学の進展 2021、2021年9月6-10日、オンライン

背景磁場を含む6次元理論の自然さ問題

内田祥紀

日本物理学会 2022年年次大会、3月15-19日、オンライン

拡張ヒッグス有効理論の幾何学的な定式化

内田祥紀

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

拡張ヒッグス有効理論の定式化と応用

内田祥紀

2nd EFT study meeting、2021年11月3-5日、岩手網張温泉

フェルミオンを含む拡張ヒッグス有効理論における正規座標系の構築

内田祥紀

日本物理学会 2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

フェルミオンを含む拡張ヒッグス有効理論の定式化とその応用

内田祥紀

素粒子物理学の進展 2021、2021年9月6-10日、オンライン

ヒッグス有効理論の概観とその発展

内田祥紀

1st EFT study meeting、2021年6月30日-7月2日、岩手網張温泉

Formulation of new normal coordinate system in generalized HEFT

内田祥紀

セミナー講演、2021年5月25日、大阪大学理学部（オンライン）

Generalization of Higgs Effective Field Theory

内田祥紀

セミナー講演、2022年4月23日、九州大学理学部（オンライン）

ベクトル型ゲージ理論に対するゲージ不変な厳密くりこみ群方程式

宮川侑樹

熱場の量子論とその応用、2021年8月30日、オンライン

ベクトル型ゲージ理論に対するゲージ不変な厳密くりこみ群方程式

宮川侑樹

日本物理学会2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

ベクトル型ゲージ理論に対するゲージ不変な厳密くりこみ群方程式

宮川侑樹

瀬戸内サマーインスティテュート、2021年9月27日、オンライン

ベクトル型ゲージ理論に対するゲージ不変な厳密くりこみ群方程式

宮川侑樹

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

Manifestly gauge invariant exact renormalization group for quantum electrodynamics

宮川侑樹

日本物理学会第77回年次大会2021、2022年3月15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 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)
軽いゲージ粒子をとおして探るニュートリノ質量と暗黒物質の起源
研究代表者：下村崇

科学研究費補助金、基盤研究 (B)
レプトンフレーバーを手がかりとする新物理探索
研究分担者：下村崇 (研究代表者：佐藤丈)

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
研究分担者：下村崇 (研究代表者：津村浩二)

科学研究費補助金、若手研究
オービフォー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、特別研究員奨励費
滑らかなカラビ・ヤウ多様体上のヘテロ型弦理論における素粒子現象論
研究代表者：大塚啓

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》
なし

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

山津直樹：2021年度後期(2021年9月13日-2022年2月28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

小倉智大：(指導教員、津村浩二)：素粒子標準模型と場の量子論の研究
小野田壮真：(指導教員、津村浩二)：素粒子標準模型と場の量子論の研究
甲斐貴文：(指導教員、津村浩二)：素粒子標準模型と場の量子論の研究
土場優雅：(指導教員、津村浩二)：素粒子標準模型と場の量子論の研究
中嶋陽平：(指導教員、津村浩二)：素粒子標準模型と場の量子論の研究

修士論文

宮川侑樹：(指導教員、鈴木博)：ベクトル型ゲージ理論に対するゲージ不変な厳密くりこみ群方程式

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：
素粒子論グループ事務局
理化学研究所仁科加速器研究センター初田量子ハドロン研究室客員研究員
筑波大学計算科学研究センター運営協議会委員
京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員

第 15 回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞選考委員
平成 31 (2019) 年度科学研究費助成事業審査第一部会第 15 小委員会 II 委員
Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

津村浩二：

東京大学素粒子物理国際研究センター 客員准教授
素粒子論グループ 事務局連絡責任者
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 (企画会員 WG 幹事)

下村崇：

日本物理学会 素粒子論領域運営委員
日本物理学会 学生優秀発表賞 素粒子論領域審査委員会 委員

大塚啓：

高エネルギー加速器研究機構 協力研究員

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

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

森川億人氏 (現大阪大学) と高浦大雅氏 (現 KEK 理論センター) が、当研究室での研究 “Identification of perturbative ambiguity canceled against bion” により、第 16 回 (2021 年度) 素粒子メダル奨励賞を受賞

理論核物理

研究室構成員

池田 陽一 准教授

松本 琢磨 助教

《 大学院 博士課程 》

小川 翔也 金 龍熙

《 大学院 修士課程 》

李 東ウク 北川 祐

《 学部 卒業研究生 》

橋本明伸 梶原孝文 (9月まで)

担当授業

量子力学 I・同演習 (池田陽一)、物理学入門 IIB (池田陽一)、物理数学 I (池田陽一)、物理学総合演習 (池田陽一)、物理学ゼミナール (池田陽一)、物理学特別研究 I (池田陽一)、物理学特別研究 II (池田陽一)

研究・教育目標と成果

機械学習によるハドロン量子状態の分類

(池田陽一、D. L. B. Sombillo[阪大 RCNP]、佐藤透 [阪大 RCNP]、保坂淳 [阪大 RCNP])

量子色力学の非自明な量子性・非可換性により、様々なハドロン間相互作用が現れることが知られており、これに起因し創発するハドロンの量子状態も束縛・共鳴・仮想状態と様々である。特に近年の高エネルギー実験の発展により、これまでとは一線を画すハドロン共鳴状態が存在する可能性が報告されている。これらのハドロン共鳴状態の存在可能性について、機械学習を用いて実験データを分析する人工知能の構築を行った。ここでは、ハドロンのチャンネル結合までを考慮し、量子散乱理論から許される最も一般的な S 行列の形を用いて教師データを作成した。深層ニューラルネットワークに、カリキュラム・ラーニング法を適応し学習を加速化させ、ハドロン量子状態を複素リーマン面上で分類することができる人工知能の構築した。学習させた人工知能を、核子- π 中間子系の S_{11} などに応用し、量子状態の分類に成功していることを

確かめた。

格子量子色力学によるハドロン間相互作用

(池田陽一、HAL QCD Collaboration)

ハドロン間の相互作用について、クォークの動力学をフルに取り入れた、第一原理計算である格子量子色力学により導出を行った。スーパーコンピュータ「富岳」を用いて、クォーク多体系の相対論的散乱方程式の解である「同時刻南部-Bethe-Salpeter 波動関数」を計算し、そこから相互作用を導出する。今年度は、LHC run-3 で測定可能なチャームハドロン間の相互作用、および J-PARC での中心的課題であるカイラル対称性の回復に関するストレンジクォークを含むハドロン間相互作用を計算した。

新型コロナウイルス感染症の感染者数拡大への数理的アプローチ

(池田陽一、佐々木健志 [阪大 CiDER]、中野貴志 [阪大 RCNP])

COVID-19 の感染者推移の分析には、感染者が平均場をなすと仮定している伝統的な感染症数理モデルが用いられてきた。これらのモデルでは、平均場をなすという仮定は言い換えれば、感染者が指数関数的に増加すると仮定することに他ならない。そのため、感染者数の理論値が極端に大きくなり、人流抑制などの対策が要求された。一方で、実際の感染者数データとモデルの予言値は全く整合しなかった。本研究では、COVID-19 のようなヒトからヒトと感染が広がる感染症には、平均場の仮定が良くないことに着眼し、ヒトとヒトとのコンタクト相互作用およびコミュニティ性考慮した、新しい感染症数理モデルであるリンク切れモデルを構築した。この成果を学術論文にまとめ、テレビ・新聞等のメディア媒体からの情報発信を行った。さらに、自治体への情報提供にも利用した。

弱束縛核分解反応における様々な高次効果の系統的研究

(松本琢磨、Jagjit Singh [大阪大学核物理研究センター研究員]、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授])

不安定核のような弱束縛核の研究において分解反応は重要な研究手法である。特に重い標的を用いたクーロン分解ではハロー構造の探索に用いられる。その際に様々な高次の分解効果、多段階結合、核力分解、クーロン核力の干渉などが反応過程においては重要になる。ただし、このような効果を見逃した近似計算を実験の解析に用いられることも多い。そこで本研究ではこのような高次の分解効果が断面積にどの程度影響を与えるかを、入射エネルギー、入射粒子に関して系統的に調査した。

本研究では CDCC を用いて、 ^{11}Be 、 ^{17}F と ^{208}Pb 標的の反応を解析した。結果として、多段階結合の効果は核力分解において重要であること、クーロン分解では ^{11}Be に

関してはその効果が小さく、 ^{17}F ではクーロンと核力分解の効果として現れることが示された。その他の効果についても調査し、その結果を Progress of Theoretical and Experimental Physics に掲載された。本研究は Jagjit 氏を中心に推進された。

^6He の共鳴状態 2_1^+ への非弾性散乱における multi-step 効果の研究

(小川翔也 (D3)、松本琢磨、金田佳子 [京都大学]、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター])

^6He は最も軽い 2 中性子ハロー核であり、その基底状態や共鳴状態の構造が逆運動学的な (p,p') 反応により精力的に調べられている。我々は連続状態離散化チャンネル法 (CDCC) を用いてこの反応を解析し、one-step 計算との比較から反応の多段階効果が無視できないことを明らかにした。しかしながら、CDCC では Pseudo state 法を用いて連続状態を記述するため、1 つの共鳴状態が複数の状態に分裂しており、one-step 計算の結果が模型空間の大きさに依存してしまう。そのため、単純に one-step 計算と CDCC の結果を比較するだけでは段階効果を過大評価してしまう可能性がある。本研究では、このことを詳細に調べるため、模型空間の大きさと one-step 計算の収束性を解析した。さらに、模型空間の大きさに依存しない one-step 計算を提案し、 $^6\text{He}(p, p')$ 反応における多段階効果を解析した。

この成果は論文としてまとめ、Physical Review C に掲載された。

^6He の共鳴状態 2_1^+ におけるダイニュートロンの研究

(小川翔也 (D3)、松本琢磨)

^6He の共鳴状態 2_1^+ はその共鳴エネルギーや崩壊幅は良く知られているが、内部構造については未だ明らかにされていない。これに対し、近年、分解反応における共鳴状態の崩壊モードを解析した実験・理論的研究によって、2 中性子がコンパクトに分布したダイニュートロンの存在が示唆されている。しかしながら、その解析には観測量における非共鳴な連続状態の寄与を完全に分離できていないため、共鳴状態の性質を反映した結果であるかは不明瞭である。本研究では共鳴状態の寄与を分離するために、共鳴状態における分解断面積を新たに定義し、その n - n 分布を解析した。その結果として、分解断面積の n - n 分布に現れる shoulder peak は、 2_1^+ のダイニュートロンから生じる可能性を示した。

この成果は論文としてまとめ、Physical Review C に掲載された。

カイラルダイクォーク模型による T_{QQ} テトラクォークの解析

(金龍熙 (D1)、池田陽一、Yan-Rui Liu [山東大学]、岡真 [JAEA, RIKEN]、鈴木溪 [JAEA])

ハドロンの実験観測の進歩とともに、クォーク・反クォークを合わせて 4 つ以上含

有する異種ハドロンの候補とされるものが今世紀より発見されている。クォーク・反クォーク各々2つで構成されるテトラクォークの場合、 $X(3872)$, $Z_c^+(4430)$ などが挙げられるが、現在まで発見されているもののほとんどは“ $c\bar{c}q\bar{q}$ ” ($q = u, d, s$) という構成要素であると予測されている。2021年7月29日、2つのチャームクォークと2つの軽い反クォーク ($cc\bar{q}\bar{q}$) から成る「 T_{cc}^+ テトラクォーク」という異種ハドロンの候補が LHCb 実験で観測されたことが報告された。本研究ではこの T_{QQ} テトラクォークについて、ダイクォークのカイラル有効模型を用いてエネルギー・スペクトル・構造の観点で解析を行った。

主な結果として、ダイクォークのカイラル有効模型による基底状態の T_{QQ} の質量値は、ヘビークォーク2つによるヘビーダイクォーク (QQ) を仮定して得られた先行研究の数値結果と似ていることが分かった。特に T_{bb} テトラクォークは、ダイクォーク描像によるコンパクトな構造ではしきい値 ($B - B^*$) よりも低い質量値が与えられ、先行研究と同様に束縛状態として発見される可能性が高いことが指摘された。本研究の成果は Physical Review D へ掲載された。

$\alpha\Xi N$ の3体構造と ΞN 総合作用

(李東ウク (M2)、肥山詠美子)

三核子間相互作用はハイパー核物理で非常に重要である。相互作用を調べるには散乱データと束縛核が求められるが、現在グザイ-核子間散乱の結果は存在しないため、束縛核の構造を調べる必要がある。 Ξ ハイパー核を探すため、理論と実験の両側で多様な努力が施された。近年 J-PARC 施設で Ξ ハイパー核の生成実験が行われ、Irrawaddy event, Kiso event で、複数の束縛した Ξ ハイパー核が発見された。以上の束縛核から Ξ -核子間相互作用が束縛核が維持できるほど平均的に引力であることは分かったが、アイソスピン・スピンのどの部分が引力に寄与をするかのような情報を得るには足りない。 Ξ -核子間相互作用をより深く理解するために、多様な Ξ ハイパー核が求められる現状である。従って、今後どのような Ξ ハイパー核が束縛状態として存在するかどうかが理論的に研究することが求められている。このよう状況下で、本研究は質量数 $A = 6$ の Ξ ハイパー核に注目した。先行研究の結果から $\alpha\Xi N$ 3体系は束縛されることが期待され、次のような要領で計算を行った。

ΞN 相互作用は現実的核力、つまり、Nijmegen hard-core model (ND)、Extended soft-core model (ESC08C)、HALQCD のポテンシャルを用いる。 $\alpha\Xi$ 相互作用は、前述の ΞN 相互作用を G 行列理論により有効相互作用にし、それを α の波動関数で fold したものを使う。 αN 相互作用は、 αN の散乱実験を再現したものを使う。ガウス関数展開法を用いて、束縛状態の有無と束縛エネルギーを調べる。ESC08C の場合、 $I = 1, J^\pi = 1^-, 2^-$ で、束縛核が Ξ ハイパー核が現れ、HALQCD のポテンシャルの場合 $I = 0, J^\pi = 1^-$ で

束縛核が現れた。以降の ${}^6\text{Li}$ をターゲットにする K^- 反応実験から今回計算した核の生成が期待でき、どのポテンシャルを取り入れるかに対する議論が可能になる。

深層学習及び有効レンジ展開を用いたハドロン量子状態の分類

(北川佑 (M1)、池田陽一)

識別することが難しい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。最終的な学習の教師データは、S波の散乱振幅を有効レンジ展開で近似したものをを用いて生成する。なお、今年度は深層学習が二体散乱の量子状態の分類に適用できるかどうか確かめるために、近似した散乱振幅の運動量の2乗の項を無視したものをを用いて教師データを生成し、ニューラルネットワークの構築と学習を行った。来年度は、S波の散乱振幅を有効レンジ展開で近似したものから生成した教師データで学習を行い、量子状態を高い精度で分類できるニューラルネットワークを完成させることを目指す。

発表論文

《 原著論文 》

A New Compartment Model of COVID-19 Transmission – The Broken-Link Model:

Y. Ikeda, K. Sasaki, and T. Nakano,

Int. J. Environ. Res. Public Health **2022**, 19, 6864 (2022).

Model independent analysis of coupled-channel scattering: A deep learning approach:

D. L. B. Sombillo, Y. Ikeda, T. Sato, and A. Hosaka,

Phys. Rev. D **104**, no.3, 036001 (2021).

Investigation of multi-step effects for proton inelastic scattering to the 2_1^+ state in ${}^6\text{He}$:

S. Ogawa, T. Matsumoto, Y. Kanada-En'yo, K. Ogata,

Phys. Rev. C **104**, 044608 (2021).

Dineutron in the 2_1^+ state in ${}^6\text{He}$:

S. Ogawa, T. Matsumoto,

Phys. Rev. C **105**, L041601 (2022).

Systematic study on the role of various higher-order processes in the breakup of weakly-bound projectiles

Jagjit Singh, Takuma Matsumoto, Kazuyuki Ogata

Progress of Theoretical and Experimental Physics 073D01, 2021.

Heavy baryon spectrum with chiral multiplets of scalar and vector diquarks:

Yonghee Kim, Yan-Rui Liu, Makoto Oka, and Kei Suzuki

Phys. Rev. D **104**, 054012 (2021).

Doubly heavy tetraquarks in a chiral-diquark picture:

Yonghee Kim, Makoto Oka, and Kei Suzuki

Phys. Rev. D **105**, 074021 (2022).

《Proceedings》

Unveiling the pole structure of S-matrix using deep learning:

D. L. B. Sombillo, Y. Ikeda, T. Sato, and A. Hosaka,

Rev. Mex. Fis. Suppl. **3**, no.3, 0308067 (2022). Proceedings of 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (HADRON 2021), 26 July-1 August 2021, Mexico City, Mexico.

Classifying Near-Threshold Enhancement Using Deep Neural Network:

D. L. B. Sombillo, Y. Ikeda, T. Sato and A. Hosaka,

Few Body Syst. **62**, no.3, 52 (2021). Proceedings of The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020), 1 - 5 March 2021, Kanzawa, Japan.

Study on the 2_2^+ Resonance in ${}^6\text{He}$ via Analysis of ${}^6\text{He}(p,p')$ Reactions:

S. Ogawa, T. Matsumoto,

Few Body Syst. **63**, 35 (2022).

《その他の論文》

著書

K 値とはなにか—新型コロナウイルスの拡散と収束—, 物理科学, この1年 2022 (丸善出版).

佐々木健志, 池田陽一, 中野貴志

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

COVID-19 の数理分析:

池田陽一, 佐々木健志

大阪大学感染症総合教育研究拠点 (CiDER) オンラインセミナー「感染症対策を振り返る」, 2022 年 1 月 12 日, オンライン開催.

感染者数推移から解き明かす新型コロナの流行メカニズム:

中野貴志, 池田陽一

SpringX 超学校 CiDER(大阪大学感染症総合教育研究拠点) x ナレッジキャピタル 正しく学ぶ! 感染症から「いのち」と「暮らし」を守る講座 (第 8 回)

2021 年 11 月 26 日, YouTube Live によるオンライン開催.

${}^6\text{He}+p$ 非弾性散乱における multi-step 効果の研究:

小川翔也, 松本琢磨, 金田佳子, 緒方一介

日本物理学会秋季大会 (2021 年), 2020 年 9 月 16 日, オンライン

${}^6\text{He}$ の共鳴状態におけるダイニュートロンの研究:

小川翔也, 松本琢磨

日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年), 2022 年 3 月 16 日, オンライン

ダイクォーク模型による T_{QQ} テトラクォークの構造:

金龍熙, 岡真, 鈴木溪

日本物理学会秋季大会 (2021 年), 2021 年 9 月 14 日, オンライン

ダイクォーク模型による T_{QQ} テトラクォークの構造:

金龍熙、岡真、鈴木 溪

ストレンジネス核物理の将来を考える研究会、2021年9月21日、オンライン

ダイクォーク模型による T_{QQ} テトラクォークの構造:

金龍熙、岡真、鈴木 溪

物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

Structures of doubly heavy T_{QQ} tetraquarks from a diquark model:

金龍熙、岡真、鈴木 溪

第7回クラスター階層領域研究会、2021年12月28日、ELPH (東北大学)

ダイクォーク模型による T_{QQ} テトラクォークの構造 (2):

金龍熙、岡真、鈴木 溪

日本物理学会第77回年次大会、2022年3月16日、オンライン

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、若手研究 B

格子 QCD ハドロン間相互作用によるエキゾチック・ハドロンの構造と生成の研究

研究代表者：池田陽一

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 C

第一原理計算と深層学習によるハドロン間相互作用の研究

研究代表者：池田陽一

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本財団・大阪大学感染症対策プロジェクト

コミュニティ間の相互作用を考慮した感染症数理モデルの構築

研究代表者：池田陽一 (大阪大学感染症総合教育研究拠点 クロスアポイントメント)

富岳一般課題 令和3年度公募 (B期)

第一原理計算で明らかにするチャームハドロンの相互作用

研究代表者：池田陽一

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 (D1): 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

池田陽一：クロスアポイントメントで、大阪大学感染症総合教育研究拠点 准教授を務めた。研究成果を原著論文で出版し、一般向けにテレビ出演と新聞で発表した。

学部4年生卒業研究

橋本明伸 (指導教員 池田陽一)：高密度天体の構造

修士論文

戴 健為 [Dai Jianwei] (指導教員 池田陽一、Philipp Gubler)：Studying ω -meson in nuclear matter by simulating low energy proton-nucleus reactions

李東ウク (指導教員 肥山詠美子)： $\alpha\Xi N$ の3体構造と ΞN 総合作用

博士論文

小川翔也: (指導教員 池田陽一): Study on the resonant structure via the analysis of breakup reaction

外国人留学生の受け入れ

戴 健為 [Dai Jianwei]

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

テレビ出演：池田陽一、“人流抑制より、換気が重要,” テレビ朝日系列、名古屋テレビ、朝の情報番組「ドデスカ!」ニュースコーナー, 2022年4月19日放送.

新聞取材協力：池田陽一、“人流抑制より効果的な新型コロナ対策とは,” 2022年4月14日 毎日新聞朝刊1面.

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

《 博士研究員 》

松村央 倉持結 Ar Rohim

《 大学院 博士課程 》

土肥明 (理研 JRA 研究員委託) 上田和茂 杉山祐紀

《 大学院 修士課程 》

三木大輔 山下晃毅 七條友哉 西田到生

《 学部 卒業研究生 》

銚之原恒平 西村郁哉 太田英寿 下鶴大輔

《 訪問研究者 》

南岳 Ar Rohim

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・同演習 (山本一博), 物理学ゼミナール (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)(1 コマ), 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)

研究・教育目標と成果

量子情報科学と宇宙・重力の研究教育 (山本一博)

量子情報科学分野は、次世代の量子通信や量子計算への応用を見据えて急速に発展している。例えば、量子もつれを利用して量子状態を伝達する量子テレポーテーションが、衛星を用いた地球規模の実験で成功し、地球規模での量子通信への一歩となっている。また、精密な測定実験技術は、量子測定、量子制御に関わる実験・理論を急速に発展させている。これらの量子情報科学の発展は、重力波観測や巨視的量子系の実現、ブラックホールの情報喪失問題や量子開放系のダイナミクスといった理論物理学の原

理的問題に対しても非常に大きな影響を与えている。量子情報科学を用いた宇宙・重力の研究は理論物理分野の新しい潮流となっており、本研究室においても量子情報科学と基礎物理の融合研究を推進している。下に述べるように重力の量子性の理論的研究やその実験的検証に向けた理論予言は、本研究に関連する主要テーマである。量子と古典との境界を探るための巨視的量子現象とデコヒーレンスや、量子センシングといった量子技術に現れる重力の効果も研究テーマである。また、宇宙の始まりのインフレーション宇宙における時空の量子揺らぎに関する研究も従来から進めているテーマの一つである。近年、量子情報科学分野の若手研究者の育成は社会的要請となっており、本研究室では、量子情報科学と基礎物理学の両分野の知識を兼ね備え、新しい量子物理分野に貢献できる若手研究者の育成を目標としている。

重力の量子性の研究とレゲットガーグ不等式の応用 (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、これまであまり考えてこられなかった問題である。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。当研究室においてもこれまで松村氏、三木氏、杉山氏、七條氏とこの問題に関する研究を進めてきた。令和3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。特に令和3年度は、ガーグ不等式の破れの研究を開始した。レゲットガーグ不等式は、巨視的実在性を検証する道具で、量子的状态の重ね合わせに付随して現れる実在性の破れを、レゲットガーグ不等式の破れによって検証できる。重力を巨視的量子系としてとらえ、その巨視的実在性の破れを重力の量子性としてとらえる試みである。Carney et al. (2021) によるハイブリッド系の重力による量子もつれの先行研究を応用して、two-time quasiprobability を用いたレゲットガーグ不等式の破れについて、詳細な解析を行なった。その結果、一般に two-time quasiprobability は負の値を取り、Leggett-Garg 不等式が破れることを示し、重力相互作用による巨視的実在性の破れという量子性検証の可能性を明らかにした。振動子の初期状態をスクイズド状態に採用することなどにより、Leggett-Garg 不等式が破れのシグナルが増大することも示した。今後は、量子もつれとの関係や実験による検証の可能性は今後の課題である。

量子エンタングルメントを用いたグラビトンの間接検出 (菅野優美)

グラビトンを間接的に検出するための具体的な実験デザインを考案した。過去にインフレーションを経験したグラビトンの量子揺らぎが現在増大していることを利用する

と、マイケルソン干渉計の腕の端に吊り下げた、エンタングルした巨視的な鏡が、デコヒーレンスを起こし、そのデコヒーレンス時間を測定することで、グラビトンの存在が間接的に検出できることを示した。この間接検出には、グラビトンの量子揺らぎが現在どれだけ増大しているかが重要である。来年度は、インフレーション後の宇宙の進化も考慮に入れ、グラビトンの揺らぎの増大にどれくらい影響があるかを調べる。

アクシオンダークマターからの量子性検出 (菅野優美)

ダークマターの候補の1つであるアクシオンを検出する方法を考えた。最近の量子情報理論の発達で、量子性とは何かが定義され、量子性を判定するための様々な指標が考案されている。その中の1つの指標を用い、アクシオンの量子性を検出機に移すことが可能であることを示した。今後は、宇宙の進化の影響も考慮に入れ、アクシオンの量子揺らぎが現在どれくらい増大しているのかを調べる。

アクシオンとグラビトンのスキューズ状態 (菅野優美)

アクシオンもグラビトンも宇宙初期の量子揺らぎから直接生成され、その後の進化でスキューズ状態になることが示唆されている。どれだけスキューズされるかは、アクシオンやグラビトンを現在観測するために重要になる。アクシオンはグラビトンと違い、質量を持っているため、スキューズされにくくなることが分かった。今後は、他の物質との相互作用を考慮に入れ、どれだけデコヒーレンスを起こすかを調べる。

位置の重ね合わせ状態にある物体間の重力が引き起こす量子発展 (松村央)

位置の重ね合わせ状態にある2物体間の重力相互作用は、その物体間に量子もつれを引き起こすことが知られている。この重力による量子もつれは、量子重力で予想される現象の1つである、重力場の量子的な重ね合わせの証拠になると期待されており、近年、その実験検証や理論解析の目覚ましい発展が見られている。本研究では、位置の重ね合わせ状態にある2物体の重力相互作用による時間発展を、量子もつれ写像と非分離操作と呼ばれる2つの量子発展に着目して解析した。その結果、重力相互作用が引き起こす量子もつれ写像と非分離操作は同一になることを示した。この性質は重力相互作用の量子性を特徴づける新しい方法を提供すると考え、今後はその具体的な方法論の構築に取り組んでいく。光学機械振動子系における重力による量子もつれ(量子力学特有の相関)についての研究を行った。いくつかの先行研究とは異なり、本研究では非摂動・非線形に系を取り扱うことで、厳密に光学機械振動子系の量子状態の発展を求めた。その解析を通して、重力による量子もつれ生成機構の物理的起源を解明し、その生成時間について厳密な表式を求めた。また、キャビティからの光子漏れによって生じる量子デコヒーレンス(量子性の喪失現象)を想定した解析も行い、量子もつれが十分に生成されるためのキャビティの散逸係数に対する条件を導いた。将来の

展望としては、より実験的なセットアップに基づく理論的研究を推し進めていく。光の状態を単一光子状態だけでなく、コヒーレント状態やスクイズド状態に拡張した場合の解析や、機械振動子に生じるノイズを系統的に取り扱うことで、重力の量子的性質の検証に有効な実験提案を行っていく。

連続系における量子測定に関する研究 (倉持結)

量子論を含む一般的な理論の枠組である一般確率論上の測定について、その post-processing 順序の次元について調べ、常に無限次元となることを証明した。またその結果を用いて量子チャンネルの post-processing 順序の無限次元性を証明した (arXiv:2111.14129)。今後はこれらの成果を以前の測定のコンパクト凸構造に関する研究と組み合わせることを目標とする。

自主勉強会である「量子情報勉強会」を主催し、量子情報の基本的な内容について講義を研究室のメンバーに対して行なった。

重力場中の量子状態における相対論的効果 (Ar Rohim)

一般相対性理論は、量子力学との融合に関わる問題として、重力場に束縛された中性子の量子力学的な束縛状態の検証実験が行われている。これらの実験は、量子力学における等価原理の理解や検証に役立つと考えられている。中性子の重力場中の束縛状態に着目し、その相対論的効果を研究している。この束縛状態は、低エネルギーの中性子が、床境界面でバウンスする状態のエネルギー固有状態に対応する。この問題を、整合的に相対論的取り扱いをするため、クラインゴールドン方程式、及びディラック方程式を用いた解析を行なっている。具体的には、一様加速度系であるリンドラー空間が、等価原理から定常重力場と見なすことができるため、リンドラー空間に境界条件を導入した、クライン-ゴールドン方程式、ディラック方程式を解析し、定常状態でのエネルギー固有値を導出して、相対論効果とその起源に関する考察を行なった。ディラック粒子の束縛エネルギーに対して、境界条件が重要な役割を果たしていることを示した。特に、MIT bag 模型に基づいた境界条件を拡張したカイラル MIT 境界条件を採用する任意性に着目し、カイラル MIT 境界条件を採用した、有限サイズの 1 次元系に閉じ込めたディラック粒子のエネルギー固有値と固有状態を精査し、非相対論的極限での振る舞いや相対論的極限での特徴を明らかにした。ディラック粒子の境界条件の一般性とそのエネルギー固有状態への影響を明らかにした。さらに、ディラック粒子の閉じ込め問題において、境界でのスピン状態の変化について、解析を行ない、1 次元系に閉じ込めたディラック粒子は、一般的なカイラル MIT 境界条件に応じて、反射の前後でスピン状態を変化させ、その繰り返しをしている様子を明らかにした。付随した問題として、カシミア効果の研究を推進している。

単独・降着中性子星の内部構造が及ぼす中性子星の熱的進化の影響 (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を記述する状態方程式と関係すると思われる。本年は、ハドロン・クォーククロスオーバー EOS での冷却計算のためのコーディングとクロスオーバー領域における比熱、熱伝導率、ニュートリノ放射率の記述について考えた。後者はまだ完成していないため来年度の前半で完成させ、実際に冷却計算を行いたい。また、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。SN 1987A の中心天体が中性子星であるかどうかは、中性子星の熱的成分を直接的に検出可能な X 線検出器によって最終的に確かめられると思われるので、将来的な X 線観測で SN 1987A の中心天体の正体が明らかになりそうかを調べた。その結果、もしそれが中性子星であれば、次世代の X 線天文衛星 Lynx によって 15 年後に検出される可能性を指摘した。また、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 (= Lynx の感度から検出可能な光度の上限が小さくなる) ことがわかった。この内容は投稿寸前である。

さらに、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) を用いて、状態方程式を観測されたいくつかの X 線バースト天体から制限可能であるかを詳しく調べた。結果として、観測されている Clocked Burster GS1826-24 や 1RXS J180408.9-342058 の光度曲線から EOS や質量、強いニュートリノ放射過程の有無を制限できる可能性も示した。これらを 2 本の論文にまとめている段階である。

5 次元 Kerr-AdS 時空中の真空崩壊と準固有振動 (上田和茂、大下翔誉、古賀一成)

本テーマでは、粒子系理論研究室研究室の古賀氏と、理化学研究所の大下氏と共同で、5 次元回転ブラックホール周りの場の安定性に関する議論を行っている。真空泡と呼ばれる偽真空崩壊の相転移面に対し殻近似を用いて重力場とスカラー場のユークリッド作用を計算し、真空崩壊率を計算するフォーマリズムに回転の寄与を加味すると、回転の小さい領域では回転のない場合と比べて崩壊率が上がることが 4 次元の場合には示されている。今年度は 5 次元の回転ブラックホールの場合の定式化が完了したので、次年度は数値的な評価を行い論文としてなるべく早く発表したい。また 5 次元時空のスカラー準固有振動に関する研究では、ブラックホール質量の小さい領域で不安定となるモードと、振動数の複素空間上にホーキング温度に比例する間隔で分布する減衰率の高い振動モードに周期性を呈するモードが現れることが明らかとなった。

オプトメカを用いた重力による量子もつれに関する研究（三木大輔）

重力を量子化する量子重力に関する理論的な研究は盛んに行われてきたが、実験的な検証は不十分であり、理論の確立には至っていない。そこで、量子もつれに注目した重力の量子的な振る舞いの検証が注目されている。量子もつれは量子情報理論で知られる量子相関であり、古典的な発展では生成することができない。この性質を利用し、検証モデルとして提案された BMV 模型では、2つの空間的な位置の重ね合わせ状態にある物体において、重力ポテンシャルが重ね合わせの原理に従うならば、量子もつれが生じることが示された。従って、重力による量子もつれの生成は重力が量子力学の枠組みに従っていることの検証となる。特に今年度は、実験的な検証が期待されるオプトメカ系及び qubit とオプトメカを組み合わせた Hybrid 系に着目して研究を進めた。前者では、重力相互作用する2つの鏡は光との相互作用により巨視的な重ね合わせ状態となり、重力相互作用することで量子もつれが生成される。一方、鏡は波動関数がガウス型でない非ガウス状態になっている。非ガウス状態の量子もつれの一般的な評価は難しいが、非ガウス性を特徴づける統計量であるキュムラントに着目し、量子もつれの評価法を構築し、評価を行った。また後者では、非古典性を特徴づける Wigner 関数に着目し研究を進めた。Hybrid 系では、量子性を特徴づける Leggett-Garg 不等式の破れや visibility については先行研究が行われており、Wigner 関数の観点からそれらや量子もつれとの間の関連性について研究を進めたが、まだ明らかにはできていない。今後の課題としては、オプトメカ系においては熱ゆらぎなどの実験に対応した解析、Hybrid 系においては Leggett-Garg 不等式や visibility の更なる理解と解析が必要である。

超地平線スケールの非一様性を持つ暗黒エネルギー宇宙における大規模構造形成（山下晃毅, 山本一博, 南岳, 杉山祐紀）

現在の宇宙膨張はダークエネルギーと呼ばれる何らかのエキゾチックなエネルギーによって駆動されていることが分かっている。膨張加速を説明する最も一般的なモデルである宇宙定数モデルは、広範な観測の結果と矛盾しておらず、現在でも有力なものと考えられているが、未解決問題も含んでいる。標準的な宇宙論的モデルは大規模な等方性と均質性を前提としているが、WMAP データの解析によると、宇宙には少量の異方性が存在する可能性があることがわかっている。CMB 実験や LSS 観測でも、同様に大域的・統計的等方性の破れを支持するものがあるため、近年は加速する宇宙の様々な側面を研究するために、多数の異方性を持つ宇宙論モデルが構築されている。今回はそのような異方性を持つ宇宙論モデルの中でも、超曲率モード暗黒エネルギーという大規模非一様性を持つダークエネルギーのモデルを単純化したもの考えた。このモデルは、現在のホライズンスケールより十分大きなスケール（超曲率スケール）で $O(1)$ の揺らぎを持つスカラー場のポテンシャルエネルギーが加速膨張を説明するモデルであり、大スケールでの非一様性を持つので宇宙原理を破るモデルである。昨年度に引き続き、この超ホ

ライズン暗黒エネルギー模型において、宇宙論的摂動論の枠組みを応用して超ホライズンスケールでの非一様性が構造形成に及ぼす影響を調べた。数値計算を注意深く実行し、密度揺らぎとパワースペクトルへの非一様性による影響の大きさを定量的に評価した。成果は、Physical Reivew Dに掲載された。

発表論文

《原著論文》

A. Matsumura, Y. Nambu, K. Yamamoto, Leggett-Garg inequalities for testing quantumness of gravity, *Phys. Rev. A* 106, 012214 (2022)

Ar Rohim, K. Yamamoto, Effects of chiral MIT boundary conditions for a Dirac particle in a box, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021, 113B01 (2021)

Ar Rohim, K. Ueda, K. Yamamoto, Shih-Yuin Lin Relativistic quantum bouncing particles in a homogeneous gravitational field, *International Journal of Modern Physics*, 30, 2150098 (2021)

S. Kanno, A. Matsumura, J. Soda, Harvesting quantum coherence from axion dark matter, *Modern Physics Letters A* 37, No. 05, 2250028 (2022)

S. Kanno, J. Soda, J. Tokuda, Indirect detection of gravitons through quantum entanglement, *Phys. Rev. D* 104 083516 (2021)

K. Ueda, A. Higuchi, K. Yamamoto, Ar Rohim, Y. Nan, Entanglement of the Vacuum between Left, Right, Future, and Past: Dirac spinor in Rindler spaces and Kasner spaces, *Phys. Rev. D* 103 125005 (2021)

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 super-horizon 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. Rev. D 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 Model, International Journal of Modern Physics E 22500069 (2022)

H. Sotani, A. Dohi, Gravitational wave asteroseismology on cooling neutron stars, Phys. Rev. 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, 6 (2021)

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, Phys. Rev. D 104, 123004 (2021)

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》

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement, S. Kanno, Copernicus Webinar Series, ONLINE, June 8 (2021)

Exploring the Early Universe with Gravitons, S. Kanno, 1001 Space Nights Online Seminar of ISSIBJ, International Space Science Institute, ONLINE, February 28 (2022)

Entanglement due to gravity in path-superposed objects, Akira Matsumura, Invited seminar, Isfahan University of Technology, ONLINE, January 24 (2022)

Effects of Nuclear Equation of State on Type-I X-ray Bursts and Implication for Clocked Burster GS 1826 – 24, A. Dohi, N. Nishimura, M.-a. Hashimoto, Y. Matsuo, T. Noda, and S. Nagataki, 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC-XVI), ONLINE, September (2021)

Impact of neutron star structure and cooling on Type-I X-ray burst, A. Dohi, N. Nishimura, M.-a. Hashimoto, Y. Matsuo, T. Noda, and S. Nagataki, Nuclear burning in massive stars – towards the formation of binary black holes – Kyoto and Monash Universities and Online, July (2021)

《国内での講演》

Testing Newtonian Entanglement, K. Yamamoto, KEK IPNS-IMSS-QUP Joint workshop, KEK, ONLINE, Feb. 9 (2022)

重力相互作用するハイブリッド系におけるレゲット-ゲージ不等式の破れ, 松村央, 南部保貞, 山本一博, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2022年3月16日

初期宇宙とグラビトン探索, 菅野優美, 素粒子物理学の進展 2021, 京都大学基礎物理学研究所 (オンライン), 9月6日 (2021)

Squeezed quantum states of axions, S. Kanno, Workshop on Very Light Dark Matter 2021, 東京大学 Kavli-IPMU (オンライン), 9月27日 (2021)

ハンブリー・ブラウンとトウイス干渉計による原始重力波の量子性検出, 菅野優美, 巨視的量子現象と量子重力, 京都大学基礎物理学研究所, 2021年10月11日

原始揺らぎの量子性は観測できるか?, 菅野優美, 第34回理論懇シンポジウム, 東京大学宇宙線研究所 (オンライン), 2021年12月22日

Indirect detection of gravitons through quantum decoherence, S. Kanno, KEK IPNS-IMSS-QUP Joint workshop, 2月9日 (2022)

エンタングルメントを用いたグラビトンの間接検出, 菅野優美, 日本物理学会2022年春季大会 (オンライン), 2022年3月15日

Field-induced entanglement in spatially superposed objects, A. Matsumura, Invited seminar, JGRG webinar, ONLINE, July 15 (2021)

Field-induced entanglement in spatially superposed objects, 松村央, 日本物理学会秋季大会, 神戸 (オンライン), 2021年9月16日

重力による量子もつれ: 松村央, 招待講演, 基研研究会「巨視的量子現象と量子重力」, 京都, 2021年10月13日

Entanglement-free witness for non-classical gravity, A. Matsumura, JGRG30, ONLINE, December 6 (2021)

測定の post-processing 順序の次元について, 倉持結, 第 45 回量子情報技術研究会, (オンライン) 2021 年 11 月 30 日

Neutron Star Cooling in Scalar-Tensor Theories, A. Dohi, R. Kase, R. Kimura, K. Yamamoto, and M.-a. Hashimoto, JGRG30, poster presentation, ONLINE December 6-10 (2021)

X 線バースト天体 1RXS J180408.9-34205 による中性子星の状態方程式の制限, 土肥明, 岩切渉, 西村信哉, 野田常雄, 橋本正章, 長瀧重博, 日本天文学会 2022 年春季大会, (オンライン) 2022 年 3 月 2 日

パイオン生成過程が及ぼす降着中性子星の光度の影響, 土肥明, Helei Liu, 第 127 回物理学会九州支部例会, (オンライン) 2021 年 12 月 4 日

GS 1826-24 の X 線バースト観測による中性子星の物理過程の制限, 土肥明, 西村信哉, 松尾康秀, 橋本正章, 野田常雄, 長瀧重博, 日本天文学会 2021 年秋季大会, (オンライン) 2021 年 9 月 14 日

Type-I X-ray burst as a tool to probe the physics of interior neutron stars, 土肥明, (招待講演) 中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2021, (オンライン) 2021 年 8 月 11 日

Rindler 領域と Kasner 領域における Dirac 場の量子真空の解析, 上田和茂, 日本物理学会九州支部例会, (オンライン) 2021 年 12 月 4 日

Recent Progress on Analysis of Quantum Fields in Curved Spacetime, 上田 和茂, QG セミナー, 名古屋大学, 2021 年 11 月 22 日

Numerical Investigation of Quasi-normal Mode in Kerr – AdS₅ Black Hole, K. Ueda, JGRG30, ONLINE, December 9 (2021)

準固有振動モードの数値解析で探る 5 次元 Kerr-AdS ブラックホールの性質について, 上田和茂, 日本物理学会 (オンライン), 2022 年 3 月 15 日

Jordan frame と Einstein frame における 1 ループ有効ポテンシャルの差異, 杉山祐紀,

熱場の量子論とその応用 (オンライン) 2021年8月30-9月1日

ダイナミカルな電磁場に起因するエンタングルメント, 杉山祐紀, Setouchi Summer Institute 2021 (オンライン) 2021年9月27日

ダイナミカルな電磁場に起因するエンタングルメント, 杉山祐紀, 重力と量子に関する九大名大ジョイントミニワークショップ, 九州大学 10月3日

ダイナミカルな電磁場に起因するエンタングルメント, 杉山祐紀, 巨視的量子現象と量子重力, 京都大学基礎物理学研究所 2021年10月13日

The effect of dynamical electromagnetic fields on entanglement, Yuuki Sugiyama, JGRG30, poster presentation ONLINE, December 6-10 (2021)

荷電粒子間のエンタングルメント生成に対する光子場の影響, 杉山祐紀, 日本物理学会, (オンライン) 2022年3月16日

光学振動子系における非ガウス状態の量子もつれ, 三木大輔, 第51回天文・天体物理若手夏の学校, (オンライン) 2021年8月24日

光学振動子系における重力の量子性の検証, 三木大輔, 松村央, 山本一博, 日本物理学会 2021年秋季大会, (オンライン) 2021年9月16日

重力の量子性と非ガウス性, 三木大輔, 重力と量子に関する九大名大ジョイントミニワークショップ, 九州大学, 2021年10月2日

光学振動子系における非ガウス状態の量子もつれ, 三木大輔, 巨視的量子現象と量子重力, 京都大学, 2021年10月13日

重力の量子性と非ガウス状態の量子もつれ, 三木大輔, 松村央, 山本一博, 第45回量子情報技術研究会, (オンライン) 2021年12月1日

Non-Gaussian entanglement in gravitating masses, D. Miki, The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, ONLINE December 6 (2021)

大規模な非一様性を持つ宇宙での銀河の構造形成について, 山下晃毅, 第10回観測的

宇宙論ワークショップ、(オンライン) 2021年11月17日

Large-scale structure with superhorizon isocurvature dark energy, 山下晃毅、日本物理学会九州支部例会、(オンライン) 2021年12月4日
2021年12月4日

ひも模型と揺らぎのスペクトル解析, 七條友哉、第51回天文・天体物理若手夏の学校、(オンライン) 2021年8月24日

光学機械振動子系のビーム模型に基づいた定式化, 七條友哉、日本物理学会九州支部、(オンライン) 2021年12月4日

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、基盤 C(一般), アクシオ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

《 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)

先導的人材育成フェローシップ (杉山祐紀)

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

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement, Sugumi Kanno, Seminar, Chinese Academy of Sciences, (ONLINE), 6月22日 (2021)

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement, Sugumi Kanno, KEK 理論セミナー, KEK, (ONLINE), 7月20日 (2021)

エンタングルメントを使ったグラビトンの間接検出, 菅野優美, 理論物理学研究室コロキウム, 立教大学 (オンライン), 2021年10月26日

Indirect detection of gravitons through quantum entanglement, Sugumi Kanno, RCNP Theory Seminar, 大阪大学 (オンライン), 2021年11月29日

七條友哉、杉山祐紀、松村央：10月18日ー22日の間、学習院大学に訪問して松本伸之准教授と共同研究を行った。

学部4年生卒業研究

下鶴大輔:(指導教員、山本一博):The Effect of Squeezed-Coherent Gravitational Waves on Cavity

西村郁哉:(指導教員、山本一博):量子テレポーテーションとその応用

太田英寿:(指導教員、菅野優美):インフレーション宇宙モデルの研究

銚之原恒平:(指導教員、菅野優美):原始ブラックホールに関する概要

修士論文

三木大輔:(指導教員、山本一博):粒子系及び光学機械振動子系における重力による量子もつれ

山下晃毅:(指導教員、山本一博):超地平線スケールの非一様性を持つ暗黒エネルギー宇宙における大規模構造形成

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

物理学会九州支部会計 (菅野優美)

理研ワーキンググループ「GW-EOS」世話人 (土肥明)

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

山本一博：重力と量子に関する九大名大ジョイントミニワークショップ 2021 開催、10月 2-3 日、九州大学 (福岡)

山本一博：宇宙と重力につながる量子力学の世界、令和 3 年九州大学オープンキャンパス、2021 年 8 月 7 日、オンライン、九州大学 (福岡)

山本一博：一般相対論の世界、令和 3 年九州大学理学部先端自然科学講演会、2021 年 8 月 6 日、オンライン、九州大学 (福岡)

山本一博：先導的人材育成フェローシップ量子分野会議開催、2022 年 2 月 22 日、オンライン、九州大学 (福岡)

菅野 優美：SUSY 2021, CONVENER (Gravitational Waves as Probes for New Physics): SUSY 2021、8 月 23-38 日、Online (CHINA)

菅野優美：山本一博：「巨視的量子現象と量子重力」研究会開催、10 月 11-14 日、京都大学基礎物理学研究所 (京都)

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

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 谷脇俊介 Carolina Sayuri Takeda

《 大学院 修士課程 》

尹強 塚原壮平 榎本雄介

《 訪問研究者 》

中里健一郎 (基幹教育院)

担当授業

素粒子理論 (小島健太郎)、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)、課題協学科目 (原田恒司、大河内豊、小島健太郎)、基幹教育セミナー (原田恒司、大河内豊、小島健太郎、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)、Degree Project 1 (田尾周一郎)、共創プロジェクト (田尾周一郎)

研究・教育目標と成果

有限温度有効ポテンシャルと宇宙初期のバリオン生成 (原田恒司、田尾周一郎、尹強)
繰り込み群によって改善された有効ポテンシャルの計算を有効場の理論を用いて行う Manohar と Nardoni の方法を有限温度系に対して行った。また、その応用例として、宇宙初期のバリオン生成について特に電弱相転移におけるバリオン生成を中心に、先行研究の評価を行った。

超弦理論における触媒効果を用いた 4 次元時空の構成 (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。

超弦理論における触媒効果を用いた4次元時空の構成 (大河内豊、谷脇俊介)

昨年に引き続き、SU(6) 対称性をもつカイラルなゲージ理論の層構造を調べている。特に、より詳細な部分を検討した。

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 Λ CDM モデルを超える物理の存在を示唆している。我々は、昨年に引き続き、コンパクトな余剰次元空間に伴うゲージ場が与える真空エネルギーを考慮し、Early dark energy を与える模型を検討した。また、模型の予言を詳細に調べ、宇宙論的予言が余剰次元のサイズやダークセクターの物質場の質量などの理論のパラメータとどのような相関を持つか明らかにした。加えて、研究論文の作成を進めた。

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。このフラックスは、低エネルギーにおける対称性や質量スペクトルに大きな影響を与えるため、興味深い。近年、フラックス背景場中における対称性や質量スペクトルを、4次元有効理論の観点から高次のモードも含めて詳細に調べる研究が進展してきている。我々は、特に非可換ゲージ理論に基づく模型に注目し、先行研究のレビューを行い、背景場フラックスが不安定化される可能性について検討した。

T^2/Z_3 オービフォールドを持つ6次元時空上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、高次元時空上の大統一理

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、大統一对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透過な同値類が定義できる。我々は、ゲージ群の表現空間において境界条件を表す行列が、その同値類の中に常に対角型なものを含むかどうかを明らかにすべく、境界条件の性質を調べた。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。

クインテッセンスが創発するバブル宇宙 (古賀一成)

5次元バブル宇宙におけるインフレーション導入のためのクインテッセンスとその触媒効果の研究。これまでの真空崩壊でのバブル宇宙のモデルでは、初期のインフレーションを終わらせる機構が存在していなかったため、5次元にクインテッセンスを導入することでバブル生成後のインフレーションを終わらせ、さらに現在の宇宙膨張のエネルギーを与えるモデルを提案した。

Kerr-AdS5 準固有振動の研究 (古賀一成)

Kerr-AdS5 の摂動に対する安定性の解析の研究。これまで知られていた準固有振動よりもさらに広いパラメータ範囲で調べることにより詳細な性質を明らかにすることができた。これにより、BH の触媒効果による量子的な寿命と摂動による古典的な寿命の比較が可能となった。また4次元シュワルツシルトにおいて示唆されていた、準固有振動とブラックホールのエリア量子化の関係について、本研究で得られた結果から議論をした。

発表論文

《原著論文》

リベラルサイエンス講義「数理という道具を手に入れよう」の開発,
藤原なつみ, 中里健一郎, 原田恒司,
基幹教育紀要 第8巻, (2022,02) pp. 101-110

“Catalytic creation of a bubble universe induced by quintessence in five dimensions,”
Issei Koga and Yutaka Ookouchi,
Phys. Rev. D 104, 126015

《その他の論文》

著書

山田礼子（編著）, 木村拓也（編著）, 田尾周一郎他（著）「学修成果の可視化と内部質保証」玉川大学出版部（2021.11）

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

「位相の遅れに注目した音響ドップラー効果の定式化とその活用」

小島健太郎、原田恒司

2021年度日本物理教育学会年会 第37回物理教育研究大会, オンライン, 2021年8月10日

「超弦理論における準安定状態の崩壊と Trans-Planckian 検閲官予想」

塚原壮平、古賀一成、大河内豊

日本物理学会 2021年秋季大会, オンライン, 2021年9月17日

「Generalized Global Symmetry」

大河内豊

研究会「瀬戸内サマーインスティテュート」 オンライン, 2021年9月27,28日

「超弦理論における偽真空の崩壊と Trans-Planckian 検閲官予想」

塚原壮平、古賀一成、大河内豊

瀬戸内サマーインスティテュート, オンライン, 2021年9月28日

「The beginning of an inflationary universe out of a Kerr-AdS₅ black hole」

古賀一成

YITP Workshop “Recent Progress of Quantum Cosmology,” オンライン, 2021年11月9日

「Two approaches to the dark energy on bubble universe in string theory」

大河内豊

研究会「Kagoshima Workshop on Quantum Aspects of Gravitation」 サンあもり 鹿児島、口頭発表、2022年1月8日

「入門レベルの物理学講義における反転学習と協調学習の導入 ー実践事例をふまえた成果、課題、展望ー」

小島健太郎

名古屋大学高等教育研究センター 第202回招聘セミナー 物理学講義実験研究会セミナー オンライン, 2021年1月26日

「5次元U(1)ゲージ理論による Early Dark Energy」

大久保勇利、小島健太郎

日本物理学会 第77回年次大会, オンライン, 2022年3月15日

「5次元回転ブラックホールの触媒効果と創発されるインフレーション宇宙」

古賀一成、大下翔誉、上田和茂

日本物理学会 第77回年次大会, オンライン, 2022年3月15日

「弦理論における真空崩壊と寿命計算」

塚原壮平、大河内豊

日本物理学会第77回年次大会, オンライン, 2022年3月17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 B

超弦理論から創発される一般化された超重力理論における D ブレインとブラックホール

研究代表者：吉田健太郎、研究分担者：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

《 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

山形大学理学部にて、“一般化された大域的対称性とその応用”に関する集中講義を行った。1月21日から23日大河内豊

学部4年生卒業研究

修士論文

尹強（指導教員：原田恒司、田尾周一郎）：複数の質量スケールを持つ系に対して有効場理論を用いて得られる RG 改善有効ポテンシャルとその有限温度への拡張

塚原壮平（指導教員：大河内豊）：弦理論における準安定状態の崩壊と触媒効果

博士論文

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：

2021 年度 京都大学 基礎物理学研究所 共同利用運営委員

2021 年度日本物理学会 若手奨励賞 審査委員

2021 年度素粒子・原子核理論グループ事務局 会員登録係責任者

2021 年度日本物理学会 素粒子論領域運営委員

小島健太郎：

日本物理教育学会九州支部, 理事

日本物理教育学会九州支部研究大会, 実行委員

日本物理教育学会 第 38 回物理教育研究大会, 実行委員

日本物理教育学会 物理教育, 編集委員

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

小島健太郎, 田尾周一郎：

令和 3 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：

学習支援システム (M2B) 講習会 (オンライン開催) M2B 学習支援システム講習会中級編の講師担当 (2021 年 9 月)

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

森田浩介 教授 若狭智嗣 教授 浅井雅人 (RCSHE) 教授
寺西高 准教授 坂口聡志 准教授 市川雄一 准教授
長江大輔 (RCSHE) 准教授
郷慎太郎 助教 西畑洸希 助教
岩村龍典 技術職員

《 博士研究員 》

鷲山広平 (特任助教, RCSHE)

《 大学院 修士課程 》

足立智輝 甲斐民人 河本彩帆 後藤滉一
富松太郎 中島優人 永田優斗 松尾仁
武藤大河 村上郁斗 米村千恵子 安藤蒼太
石橋優一 井元悠介 岸本侃己 小谷基樹
篠原悠介 杉山晃一 松永壮太郎 山下涉

《 学部 卒業研究生 》

荒殿和希 梶原孝文 竹中京平 田中久登
能見幹都 松浦開 松本悠椰

担当授業

物理学ゼミナール (森田浩介)、物理学特別講義I (最先端物理学) (森田浩介、坂口聡志)、力学基礎 (若狭智嗣) 力学・同演習 (若狭智嗣)、原子核物理学 (若狭智嗣)、力学概論 (寺西高)、物理実験学 (寺西高)、実験核物理学 (森田浩介、寺西高) 原子核・高エネルギー実験学 (寺西高)、力学基礎演習 (坂口聡志)、物理学の進展 (坂口聡志)、身の回りの物理学B (坂口聡志、市川雄一)、物理学入門II (坂口聡志)、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) 基礎物理実験学・同実験 (市川雄一)、物理学総合実験 (郷慎太郎、西畑洸希、寺西高、坂口聡志、市川雄一)

研究・教育目標と成果

新元素の合成研究（森田浩介、坂口聡志、郷慎太郎、長江大輔、浅井雅人）

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、理研に常駐している特定プロジェクト教員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、Si検出器の波形解析による粒子識別法の開発、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}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° 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}V ビームを標的に照射し、 0° 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}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。

本年度は田中・坂口を責任著者とした投稿論文の執筆を進め、共著者への回覧を行った。

低エネルギー重イオン検出用 MCP-ToF 検出器の開発（甲斐民人、村上郁斗、松永壮太郎、長江大輔、坂口聡志、郷慎太郎、森田浩介）

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反応研究を計画している。低エネルギー二次ビームの像は大きく広がっているため、大口径かつ低物質量の検出器が必要であり、我々は薄膜と有感領域 $\phi 75$ mm 大口径 MCP（マイクロチャンネルプレート）を用いた二次ビームの速度測定用の ToF（飛行時間）検出器の開発を行っている。

本年度は大口径 MCP を用いた検出器を CAD 上で設計し、実機の製作、加速器からのビームを用いた性能評価を行った。まず九大加速器センターにおいて巻線機を設計・開発し、ワイヤーグリッドを組み立てた。薄膜に金を蒸着し、二次電子放出膜を作成した。これらと各部品を組み立て、実機を製作し、放電試験やオフライン試験を行い動作を検証した。その後、タンデム加速器を用いて加速した ^{28}Si ビームを有感領域の様々な点に照射し、各点での性能評価を行った。得られた時間分解能は中心で 250 ps (FWHM) 程度、検出効率は 97%であった（目標：170 ps (FWHM)、90%以上）。時間分解能は中心から 25 mm 離れた領域まではほぼ一定であったが、検出効率は 85%程度まで低下した。時間分解能の向上のためには加速電圧を上げることやワイヤーの間隔を狭めることが考えられる。検出効率の向上のためには、二次電子放出膜の蒸着物質の変更、三角板への独立電位の印加による振り込み電場の形成などが考えられる。

位置敏感型 MCP-ToF 検出器の開発（長江大輔）

飛行する粒子の位置と時間情報を準非破壊的に取得できる、薄膜と MCP を用いた位置敏感型飛行時間（MCP-ToF）検出器の開発を進めている。この検出器ではビーム照射により、薄膜から発生した二次電子を電場を用いて、MCP へ導き、位置情報、時間情報を得ている。昨年度までに位置分解能 2 mm 程度、時間分解能は 150 ps 程度が得られていたが、いずれも改善が必要であった。本年度は位置分解能、時間分解能の低下を招く二次電子の飛行時間の広がりを抑えるよう、検出器を小型化させ、二次電子飛行距離の短縮を図った。性能の評価は量子科学技術研究開発機構の加速器施設 HIMAC において、 ^{84}Kr ビームを用いて行った。位置分解能、時間分解能ともに向上は認められたが、どちらも十分な性能には達しておらず、引き続き開発を進める予定である。

新元素探索実験のための Si 検出器の波形解析による粒子識別の研究（武藤大河、郷慎太郎、浅井雅人）

新元素探索実験では、核反応で生成する大量の妨害核種や散乱粒子から目的とする超重核を分離・同定する必要がある。分離に関しては、ガス充填型反跳生成核分離装置を用いて他の核反応生成物や散乱粒子から目的とする超重核を物理的に分離する。その後更に、飛行時間検出器 MCP-TOF、両面ストリップ Si 検出器 DSSD、DSSD の背後に設置された VETO 検出器等を用いて、DSSD に打ち込まれた粒子の同定と DSSD 内部で α 崩壊して放出される α 線の検出、それらの時間相関の測定を行い、超重核を同定する。しかし、MCP-TOF の検出効率はずしも 100% ではないため、もし DSSD の検出信号だけで粒子識別が可能であれば、DSSD で検出されたすべての事象に対して何らかの粒子識別情報が得られるため、粒子識別の信頼性が格段に向上すると期待される。本研究では、理研の 119 番元素探索実験で用いられている DSSD の波形データを解析し、プリアンプ波形の立ち上がり時間の解析によって、DSSD を貫通した軽粒子、DSSD を貫通しなかったが飛程の長い軽粒子、飛程の短い軽粒子、重粒子及び崩壊 α 線を識別可能であることを実証した。今後は電極配置の異なる DSSD を用いて波形解析を行い、粒子識別性能の向上を目指す。

シリコン検出器の波高欠損およびエネルギー分解能の研究（石橋優一、武藤大河、浅井雅人）

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。波高欠損量は、入射粒子のエネルギー、原子番号、質量数、検出器特性に依存し、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。昨年度、九州大学タンデム加速器を用いて、Li, Si, Ge, I の重イオンビームに対する波高欠損とエネルギー分解能を測定し、これまで使われてきた波高欠損の経験式が高エネルギー領域で再現性が悪いこと、波高欠損量とエネルギー分解能の間に強い相関があることを見出した。本年度は、より高いエネルギー領域で且つ核分裂片のエネルギー領域をカバーする 50~150 MeV におけるデータを取得するため、原子力機構タンデム加速器を用いて Co から Au までの様々な原子番号を持つ粒子に対する波高欠損とエネルギー分解能を系統的に測定した。今後本研究で得られたデータを詳細に解析し、波高欠損の新しい経験式を導出することで、超重核や核分裂片のエネルギー測定精度を向上させ、新元素探索や核分裂機構の研究に役立てる。更に波高欠損のメカニズムについても新しい知見が得られると期待される。

アインスタイニウム標的を用いた中性子過剰フェルミウム領域核の核分裂機構の研究（石橋優一、浅井雅人）

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。ところが中性子過剰フェルミウム (Fm) 領域核では、 ^{256}Fm までは典型的な非対称核分裂を示すが、 ^{258}Fm で突然極めて分布幅の狭い対称核分裂に変化する。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}Es 標的に原子力機構タンデム加速器からの ^{18}O ビームを照射し、多核子移行反応により中性子過剰 Fm 領域核を合成し、オンライン同位体分離装置 ISOL を用いて生成核を同位体分離し、自発核分裂片の運動エネルギーと質量分布を精密に測定することに成功した。本年度は、対称核分裂と非対称核分裂の混合が期待される ^{259}Md の自発核分裂の測定を開始し、来年度にかけてデータを蓄積することで、中性子過剰 Fm 核領域における特異な核分裂機構の解明を目指す。

重アクチノイド核の核分光研究 (富松太郎、杉山晃一、郷慎太郎、坂口聡志、浅井雅人)

原子番号が 100 を超える超重元素領域においては、陽子魔法数 114、中性子魔法数 184 の二重閉殻構造による強い安定性のために、これまで発見されているごく短寿命 (秒-分単位) の超重核と比べて、圧倒的に長い寿命 (年単位) をもつ超重核が存在できる領域が予言されている。この人類未踏の原子核領域を「安定の島」と呼ぶ。しかし、従来の原子核反応ではこれらの原子核は合成することはできず、合成に至る道筋も明らかになっていない。「安定の島」の原子核に期待される安定性を定量化するための原子核の基礎データが必要とされている。重アクチノイド核の励起状態に「安定の島」の閉殻構造を成す軌道が大きく関与するため、本研究室では重アクチノイド核のアイソマー核分光実験研究を推進している。本年度は原子力研究開発機構にて加速器実験を実施した。アクチノイド標的 (^{248}Cm) に対し多核子移行反応を用い、周辺核のアイソマー核分光測定を実施した。

中性子過剰 Ni 同位体の質量測定 (永田優斗、長江大輔)

金やウランのような重元素の合成過程を説明する仮説の一つに、高速中性子捕獲過程がある。この過程では超新星爆発や中性子星合体のような非常に中性子が過剰な環境下において、短時間の内に連続的に中性子を捕獲することにより、中性子が非常に過剰な領域を経由して、重元素が合成されると考えられている。この過程には、中性子

数が魔法数となる箇所で、中性子捕獲反応がこれ以上進まなくなる滞留核が存在すると考えられており、この滞留核の決定が高速中性子捕獲過程経路の解明に繋がる。滞留核の決定には、滞留核とその近傍にある原子核の正確な質量値が重要となる。本研究では、中性子数 $N = 50$ 付近にあると考えられている滞留核の探索を目的として、中性子過剰 Ni 同位体、 ^{74}Ni ($N = 46$) の質量を理化学研究所に建設された重イオン蓄積リング「稀少 RI リング」を用いて測定した。得られた ^{74}Ni の質量を用いて、魔法数の有無に敏感な物理量である二中性子分離エネルギーを導出したところ、中性子数の増加に伴う、一般的な緩やかな減少は確認されたものの、魔法数をもつ原子核に見られる二中性子分離エネルギーの急激な低下は見られなかった。以上より、 ^{74}Ni に魔法性は無く、高速中性子捕獲過程における滞留核でないと結論づけられた。

原子核密度汎関法に基づく四重極集団模型による遷移領域核の記述（鷲山広平）

核図表を眺めると、陽子数や中性子数が魔法数近傍では球形核領域が広がり、魔法数から離れた質量領域では回転楕円体のような変形核が多数現れる島が存在する。そして、球形核領域と変形核領域の間には、原子核の形が球形から変形に移り変わる遷移領域が存在する。この領域の原子核（遷移領域核）のエネルギーは変形に対して緩やかに変化する。従って、これらの原子核の記述には、原子核の変形空間における形の揺らぎを考慮して様々な変形状態を扱う必要があり、エネルギー極小値のみを考慮する平均場近似では不十分である。そこで我々は、このような原子核を取り扱える理論的枠組みを構築する目的で、密度汎関法に基づく四重極集団模型を用いて、原子核の基底状態及び低励起状態の記述を行った。また、先行研究では近似的手法で評価していた模型内の四重極変形に対する慣性質量を、本研究では Skyrme 型密度汎関法に基づく局所乱雑位相近似法 (LQRPA) を用いて正しく行なった。本研究では、まず、四重極変形空間上で LQRPA 法を用いて慣性質量を評価する数値計算コードを開発した。次に、本手法を遷移領域核 ^{106}Pd の低励起状態の記述に応用した。得られた結果をまとめると、(1) 近似的手法による慣性質量に比べ LQRPA による慣性質量が大きな値を示した。(2) その増幅度合いは原子核の変形度に強く依存した。(3) LQRPA で得られた慣性質量に基づく低励起状態のエネルギーの計算値は実験データを再現した。本研究で開発した手法の有用性を確認できたので、今後は様々な遷移領域核の理論的記述を進めていく。

高速データ収集システムのリアルタイム・モニタの実装と偏極ナフタレン標的の陽子偏極度較正（足立智輝、西畑洗希、若狭智嗣）

理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) にて行われる $d+p$ スピン相関係数測定に用いられるデータ収集系 (Data Acquisition; DAQ) を開発すると共に、標的である

偏極ナフタレンの陽子偏極度の較正を行った。VME ベースの DAQ システム babirl を導入すると共に、ANAROOT と呼ばれる解析環境を babirl と統合することにより、オンラインでのリアルタイム・モニタを実現した。性能として、2 kcps のデータレートに対してデータ収集率 83.3% を実現すると共に、MWDC からの 768 本の多チャンネル読み出しにも成功した。

次に、本 DAQ システムと本研究室で開発している焦点面偏極度計 (Focal Plane Polarimeter; FPP) 2nd-FPP を用いて、東北大学 CYRIC にて 80 MeV 陽子ビームを用いた、スピン相関係数測定に用いる偏極ナフタレンの陽子偏極度の較正を行った。 p - p 散乱の非対称性を計測し、既知の偏極分解能 A_y の値 0.083 を用いて、偏極ナフタレンの陽子偏極度を $p = 0.13 \pm 0.09 \pm 0.13$ と決定した。

中性子・ガンマ線分別能力を有するプラスチックシンチレータのシミュレーションとビームテストによる性能評価 (河本彩帆、西畑洗希、若狭智嗣)

九州大学加速器・ビーム応用科学センター (CABAS) における陽子や中性子測定には、発光物質の減衰時間の違いを利用して中性子とガンマ線の分離が可能な、Eljen 社製のプラスチックシンチレータ EJ-276 の利用を検討している。本研究では、シミュレーションとの比較や東北大 CYRIC による 80 MeV 陽子ビームを用いた実験から、その有用性を検討した。

まずガンマ線源および宇宙線の損失エネルギーのシミュレーションを GEANT4 を用いて行った。 ^{241}Am の光電効果ピーク、 ^{60}Co と ^{137}Cs のコンプトン端、および宇宙線の最小電離によるピークをほぼ再現することに成功した。次に、東北大 CYRIC にて 80 MeV 陽子を用いたビームテスト実験を行った。シンチレータの発光量と陽子エネルギーの関係を求めたところ、一般的に広く使用されている NE-102 シンチレータよりクエンチングの影響が小さいことが分かり、EJ-276 を用いた検出器の有用性が確認された。

核子ノックアウト反応による媒質効果の解明に向けた反跳陽子偏極度計の性能向上 (米村千恵子、西畑洗希、若狭智嗣)

我々のグループでは、100 MeV 以下の反跳陽子への偏極移行量測定用の焦点面偏極度計 (Focal Plane Polarimeter:FPP) 2nd-FPP の開発を行っている。現在の 2nd-FPP の構成では位置分解能が十分でないことが分かっているため、今年度は、飛跡再構成における位置分解能高精度化のため 2nd-FPP に新しく 4 台 6 面の MWDC を導入した。MWDC 導入による性能向上を確認するために、東北大学 CYRIC にて 80 MeV 陽子を 2nd-FPP に直接入射し、シンチレータ中の炭素および水素との散乱イベントを測定した。

シンチレータでの発光量の相関から、先行研究で指摘されていたオーバーフローの解決が確認できた。また、MWDC の導入によって、位置分解能の向上により p - p 弾性散乱と p -C 弾性散乱をより前方角度にて分離することができた。この角度分解能の向上により、偏極度計の性能の指標である Figure of Merit は約 3 倍向上することが期待される。また、実験結果は核反応シミュレーションによる予想と無矛盾であることが確認できた。

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、原子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。本研究に関しては、突然の変形発現が注目を集めている中性子過剰核 ^{99}Zr の励起状態の電気四重極モーメント測定が、理化学研究所 RIBF の課題採択委員会にて採択されている。

2021 年度は、次年度に RIBF で予定されている加速器実験に向けて、ガンマ線検出器の開発、二次標的の開発、セットアップのアップグレード、データ取得系の開発を行った。

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。本研究では独自の核スピンメーザーという手法を用いて、核スピンの歳差運動を精密に制御・観測することで、EDM の観測を目指している。

2021 年度に理化学研究所より測定装置一式を九州大学に移設した。セル作成のための真空装置、偏極度評価のための NMR 測定装置、核スピンメーザー装置の構築に着手している。特に NMR 測定装置に関しては、従来作成されたサンプルセルを用いて ^{129}Xe の偏極を確認する信号を得ることに成功した。引き続き、各実験装置の構築および高度化に取り組む予定である。

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るなど、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}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。本研究では、原子核のスピンの向きが揃った (スピン偏極した) Mg のベータ崩壊の空間的異方性を用いることで、その娘核の Al 原子核の励起状態のスピンを実験的に決定できる独自の手法を用いた。今年度までに実施したデータ解析の結果、7つの状態のスピンを含む詳細な ^{31}Al の準位構造を決定することができた。現在、得られた結果を大規模殻模型計算と比較し、構造解析を行っている。

中性子非束縛状態測定のためのベータ遅延中性子検出器の開発 (西畑洸希、岸本侃己)

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るため、その核構造の理解のため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および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ている。それらの原子核のベータ崩壊に伴って放出される典型的な中性子エネルギーは $0.1 - 5$ MeV 程度であるため、そのエネルギー範囲の中性子が測定可能な検出器を新たに設計し製作した。その性能評価のために中性子放出強度が既知の原子核を用いて実験を行った。実験は量子科学技術研究開発機構の重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて、中性子放出強度が既知の不安定 ^{16}C 、 ^{17}N 、 ^{18}N 原子核を生成して行った。簡易的な解析では、新たに作成した中性子検出器の飛行時間スペクトルにおいて、それぞれ ^{16}C 、 ^{17}N 、 ^{18}N のベータ崩壊に伴う中性子ピークを確認することができた。詳細なデータ解析は現在実施中である。

^{12}C 第 2 励起状態の対崩壊分岐比決定のための実験手法開発 (中島優人、寺西高)

^{12}C 第 2 励起状態の基底状態への対崩壊分岐比の実験値の精度は、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決定精度を支配しており、その向上が長年の懸案になっている。本学タンDEM加速器施設では逆運動学条件の非弾性散乱 $\alpha(^{12}\text{C}, \alpha_2)$ により ^{12}C 第 2 励起状態を生成し、対崩壊分岐比を決定する計画を進めている。本年度は、本測定用のセットアップを用いて ^{12}C 第一励起状態からの γ 線および ^{16}O 第一励起状態からの電子・陽電子対に対する検出効率を測定し、これらが GEANT4 シミュレーションにより再現できることが示された。これにより本測定の実現に一歩近づいた。

アバランシェフォトダイオードの低エネルギー荷電粒子に対する応答 (後藤滉一、寺西

高)

アバランシェフォトダイオード (APD) は、放射線検出用としては、これまでのところ主にシンチレーション光検出器として用いられてきた。今回我々は、低エネルギー核反応における反跳重イオン検出器として、表面付近に増倍層を持つリバー型 APD (面積 $10 \times 10 \text{ mm}^2$) を用いることを着想し、 ^{241}Am α 線および ^{12}C ビーム (3 – 24 MeV) の直接検出テストを実施した。結果として粒子の飛程が数 μm のとき、電荷信号が大きく増倍されることが確認でき、そのような粒子の弁別にリバー型 APD が有用である可能性が示された。

逆運動学水素誘起核反応実験のための水素化チタン標的の開発 (松尾仁、寺西高)

低エネルギー水素誘起核反応を逆運動学条件で測定する際には、エネルギー損失の少ない水素標的が必要となる。本研究では、チタン薄膜をターゲットホルダーにセットした状態で水素化処理することができる、内径 36 mm の石英管を使用した水素炉を新たに開発した。製作した水素化チタン標的の水素付加量は ^{241}Am α 線によるエネルギー損失測定により決定した。さらに 19.0 – 23.4 MeV の ^{12}C ビームを標的に照射し、陽子共鳴散乱の測定により、深さ方向の水素分布および厚さの均一性の評価を行った。結果として、水素化チタン標的の基本的な製作手法およびその評価方法を確立することができた。

発表論文

《原著論文》

Chemical Characterization of a Volatile Dubnium Compound, DbOCl_3 :

N. M. Chiera, T. K. Sato, R. Eichler, T. Tomitsuka, M. Asai, S. Adachi, R. Dressler, K. Hirose, H. Inoue, Y. Ito, A. Kashihara, H. Makii, K. Nishio, M. Sakama, K. Shirai, H. Suzuki, K. Tokoi, K. Tsukada, E. Watanabe, and Y. Nagame
Angew. Chem. Int. Ed. **60**, 17871 (2021).

α condensed states in ^{13}C using α inelastic scattering:

K. Inaba, Y. Sasamoto, T. Kawabata, M. Fujiwara, Y. Funaki, K. Hatanaka, K. Itoh, M. Itoh, K. Kawase, H. Matsubara, Y. Maeda, K. Suda, S. Sakaguchi, Y. Shimizu, A. Tamii, Y. Tameshige, M. Uchida, T. Uesaka, T. Yamada, H. P. Yoshida
Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2021, Issue 9, 093D01

(2021).

First experimental determination of the radiative-decay probability of the 3-1 state in ^{12}C for estimating the triple alpha reaction rate in high temperature environments:

M. Tsumura, T. Kawabata, Y. Takahashi, S. Adachi, H. Akimune, S. Ashikaga, T. Baba, Y. Fujikawa, H. Fujimura, H. Fujioka, T. Furuno, T. Hashimoto, T. Harada, M. Ichikawa, K. Inaba, Y. Ishii, N. Itagaki, M. Itoh, C. Iwamoto, N. Kobayashi, A. Koshikawa, S. Kubono, Y. Maeda, Y. Matsuda, S. Matsumoto, K. Miki, T. Morimoto, M. Murata, T. Nanamura, I. Ou, S. Sakaguchi, A. Sakaue, M. Sferrazza, K. N. Suzuki, T. Takeda, A. Tamii, K. Watanabe, Y. N. Watanabe, H. P. Yoshida and J. Zenihiro
Phys. Lett. B **817**, 136283 (2021).

First high-precision direct determination of the atomic mass of a superheavy nuclide:

P. Schury, T. Niwase, M. Wada, P. Brionnet, S. Chen, T. Hashimoto, H. Haba, Y. Hirayama, D. S. Hou, S. Iimura, H. Ishiyama, S. Ishizawa, Y. Ito, D. Kaji, S. Kimura, H. Koura, J. J. Liu, H. Miyatake, J. Y. Moon, K. Morimoto, K. Morita, D. Nagae, M. Rosenbusch, A. Takamine, Y. X. Watanabe, H. Wollnik, W. Xian, and S. X. Yan
Phys. Rev. C **104**, L021304, (2021).

α -decay-correlated mass measurement of $^{206,207g,m}\text{Ra}$ using an α -TOF detector equipped multireflection time-of-flight mass spectrograph system:

T. Niwase, M. Wada, P. Schury, P. Brionnet, S. D. Chen, T. Hashimoto, H. Haba, Y. Hirayama, D. S. Hou, S. Iimura, H. Ishiyama, S. Ishizawa, Y. Ito, D. Kaji, S. Kimura, J. Liu, H. Miyatake, J. Y. Moon, K. Morimoto, K. Morita, D. Nagae, M. Rosenbusch, A. Takamine, T. Tanaka, Y. X. Watanabe, H. Wollnik, W. Xian, and S. X. Yan
Phys. Rev. C **104**, 044617, (2021).

High-spin states in ^{35}S :

S. Go, E. Ideguchi, R. Yokoyama, N. Aoi, F. Azaiez, K. Furutaka, Y. Hatsukawa, A. Kimura, K. Kisamori, M. Kobayashi, F. Kitatani, M. Koizumi, H. Harada, I. Matea, S. Michimasa, H. Miya, S. Nakamura, M. Niikura, H. Nishibata, N. Shimizu, S. Shimoura, T. Shizuma, M. Sugawara, D. Suzuki, M. Takaki, Y. Toh, Y. Utsuno, D. Verney, and A. Yagi
Phys. Rev. C **103**, 034327 (2021).

Three-quasiparticle isomers in odd-even $^{159,161}\text{Pm}$: Calling for modified spin-orbit interaction for the neutron-rich region:

R. Yokoyama, E. Ideguchi, G. S. Simpson, Mn. Tanaka, Yang Sun, Cui-Juan Lv, Yan-Xin Liu, Long-Jun Wang, S. Nishimura, P. Doornenbal, G. Lorusso, P.-A. Söderström, T. Sumikama, J. Wu, Z. Y. Xu, N. Aoi, H. Baba, F. L. Bello Garrote, G. Benzoni, F. Browne, R. Daido, Y. Fang, N. Fukuda, A. Gottardo, G. Gey, S. Go, S. Inabe, T. Isobe, D. Kameda, K. Kobayashi, M. Kobayashi, I. Kojouharov, T. Komatsubara, T. Kubo, N. Kurz, I. Kuti, Z. Li, M. Matsushita, S. Michimasa, C. B. Moon, H. Nishibata, I. Nishizuka, A. Odahara, Z. Patel, S. Rice, E. Sahin, H. Sakurai, H. Schaffner, L. Sinclair, H. Suzuki, H. Takeda, J. Taprogge, Zs. Vajta, H. Watanabe, and A. Yagi
Phys. Rev. C **104** L021303 (2021).

β -delayed neutron emission of r-process nuclei at the $N = 82$ shell closure:

O. Hall, T. Davinson, A. Estrade, J. Liu, G. Lorusso, F. Montes, S. Nishimura, V. H. Phong, P. J. Woods, J. Agramunt, D. S. Ahn, A. Algora, J. M. Allmond, H. Baba, S. Bae, N. T. Brewer, C. G. Bruno, R. Caballero-Folch, F. Calviño, P. J. Coleman-Smith, G. Cortes, I. Dillmann, C. Domingo-Pardo, A. Fijalkowska, N. Fukuda, S. Go, C. J. Griffin, R. Grzywacz, J. Ha, L. J. Harkness-Brennan, T. Isobe, D. Kahl, L. H. Kheim, G. G. Kiss, A. Korgul, S. Kubono, M. Labiche, I. Lazarus, J. Liang, Z. Liu, K. Matsui, K. Miernik, B. Moon, A. I. Morales, P. Morrall, M. R. Mumpower, N. Nepal, R. D. Page, M. Piersa, V. F. E. Pucknell, B. C. Rasco, B. Rubio, K. P. Rykaczewski, H. Sakurai, Y. Shimizu, D. W. Stracener, T. Sumikama, H. Suzuki, J. L. Tain, H. Takeda, A. Tarifeño-Saldivia, A. Tolosa-Delgado, M. Wolińska-Cichocka, and R. Yokoyama
Phys. Lett. B **816** 136266 (2021).

Analyzing Power Measurement for p - ^3He Elastic Scattering at Intermediate Energies:

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

Few-Body Syst. **62**, 112 (2021).

Reanalyzes for $^{42-51}\text{Ca}$ scattering on a ^{12}C target at 280 MeV/nucleon based on chiral g folding mode with Gogny-D1S Hartree-Fock-Bogoliubov densities:

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

Results Phys. **31**, 104923 (2021).

Reaction cross section of proton scattering consistent with PREX-II:

T. Wakasa, *et al.*

Results Phys. **29**, 104749 (2021).

Neutron skin thickness of ^{208}Pb determined from the reaction cross section for proton scattering:

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

Phys. Rev. C **104**, 024606 (2021).

Proton- ^3He elastic scattering at intermediate energies:

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

Phys. Rev. C **103**, 044001 (2021).

Three-body breakup of ^6He and its halo structure:

Y. L. Sun, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Satou, J. Lee, T. Matsumoto, K. Ogata, Y. Kikuchi, N. Aoi, Y. Ichikawa, K. Ieki, M. Ishihara, T. Kobayshi, T. Motobayashi, H. Otsu, H. Sakurai, T. Shimamura, S. Shimoura, T. Shinohara, T. Sugimoto, S. Takeuchi, Y. Togano, K. Yoneda

Phys. Lett. B **814**, 136072 (2021).

Production of the most neutron-deficient Zn isotopes by projectile fragmentation of ^{78}Kr :

A. Kubiela, H. Suzuki, O. B. Tarasov, M. Pfutzner, D. -S. Ahn, H. Baba, A. Bezbakh, A. A. Ciemny, W. Dominik, N. Fukuda, A. Giska, R. Grzywacz, Y. Ichikawa, Z. Janas, L. Janiak, G. Kaminski, K. Kawata, T. Kubo, M. Madurga, C. Mazzocchi, H. Nishibata, M. Pomorski, Y. Shimizu, N. Sokolowska, D. Suzuki, P. Szymkiewicz, A. Swiercz, M. Tajima, A. Takamine, H. Takeda, Y. Takeuchi, C. R. Thornsberry, H. Ueno, H. Yamazaki, R. Yokoyama, K. Yoshida

Phys. Rev. C **104**, 064610 (2021).

Persistence of the $Z = 28$ shell gap in $A = 75$ isobars: Identification of a possible $(1/2^-)\mu\text{s}$ isomer in ^{75}Co and β decay to ^{75}Ni :

S. Escrig, A. I. Morales, S. Nishimura, M. Niikura, A. Poves, Z. Y. Xu, G. Lorusso, F. Browne, P. Doornenbal, G. Gey, H. -S. Jung, Z. Li, P. -A. Söderström, T. Sumikama, J. Taprogge, Zs. Vajta, H. Watanabe, J. Wu, A. Yagi, K. Yoshinaga, H. Baba, S. Franchoo, T. Isobe, P. R. John, I. Kojouharov, S. Kubono, N. Kurz, I. Matea, K. Matsui,

D. Mengoni, P. Morfouace, D. R. Napoli, F. Naqvi, H. Nishibata, A. Odahara, E. Sahin, H. Sakurai, H. Schaffner, I. G. Stefan, D. Suzuki, R. Taniuchi, V. Werner, D. Sohler
Phys. Rev. C **103**, 064328 (2021).

Impact of shell evolution on Gamow-Teller β decay from a high-spin long-lived isomer in ^{127}Ag :

H. Watanabe, C. X. Yuan, G. Lorusso, S. Nishimura, Z. Y. Xu, T. Sumikama, P. -A. Söderström, P. Doornenbal, F. Browne, G. Gey, H. S. Jung, J. Taprogge, Zs. Vajta, H. K. Wang, J. Wu, A. Yagi, H. Baba, G. Benzoni, K. Y. Chae, F. C. L. Crespi, N. Fukuda, R. Gernhauser, N. Inabe, T. Isobe, A. Jungclaus, D. Kameda, G. D. Kim, Y. K. Kim, I. Kojouharov, F. G. Kondev, T. Kubo, N. Kurz, Y. K. Kwon, G. J. Lane, Z. Li, C. -B. Moon, A. Montaner-Piza, K. Moschner, F. Naqvi, M. Niikura, H. Nishibata, D. Nishimura, A. Odahara, R. Orlandi, Z. Patel, Zs. Podolyak, H. Sakurai, H. Schaffner, G. S. Simpson, K. Steiger, H. Suzuki, H. Takeda, A. Wendt, K. Yoshinaga
Phys. Lett. B **823**, 136766 (2021).

Three-quasiparticle isomers in odd-even $^{159,161}\text{Pm}$: Calling for modified spin-orbit interaction for the neutron-rich region:

R. Yokoyama, E. Ideguchi, G. S. Simpson, M. Tanaka, Y. Sun, C. -J. Lv, Y. -X. Liu, L. -J. Wang, S. Nishimura, P. Doornenbal, G. Lorusso, P. -A. Söderström, T. Sumikama, J. Wu, Z. Y. Xu, N. Aoi, H. Baba, F. L. Bello Garrote, G. Benzoni, F. Browne, R. Daido, Y. Fang, N. Fukuda, A. Gottardo, G. Gey, S. Go, S. Inabe, T. Isobe, D. Kameda, K. Kobayashi, M. Kobayashi, I. Kojouharov, T. Komatsubara, T. Kubo, N. Kurz, I. Kuti, Z. Li, M. Matsushita, S. Michimasa, C. B. Moon, H. Nishibata, I. Nishizuka, A. Odahara, Z. Patel, S. Rice, E. Sahin, H. Sakurai, H. Schaffner, L. Sinclair, H. Suzuki, H. Takeda, J. Taprogge, Zs. Vajta, H. Watanabe, A. Yagi
Phys. Rev. C **104**, L021303 (2021).

Application of a novel gas phase synthesis approach to carbonyl complexes of accelerator-produced 5d transition metals:

M. Götz, A. Yakushev, S. Götz, A. Di Nitto, Ch. E. Düllmann, M. Asai, B. Kindler, J. Krier, B. Lommel, Y. Nagame, T. K. Sato, H. Suzuki, T. Tomitsuka, K. Tokoi, A. Toyoshima, and K. Tsukada
Radiochim. Acta **110**, 75 (2022).

First observation of the $\pi 0h_{11/2} \times \nu 0h_{9/2}$ partner orbital configuration in the odd-odd ^{138}I nucleus:

B. Moon, A. Gargano, H. Naidja, C. -B. Moon, A. Odahara, R. Lozeva, S. Nishimura, C. Yuan, F. Browne, P. Doornenbal, G. Lorusso, Z. Patel, S. Rice, M. Si, L. Sinclair, P. -A. Söderström, 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

Phys. Rev. C **105**, 034334 (2022).

《その他の論文》

核スピンから探る原子核・素粒子・宇宙:

市川雄一

原子核研究 第66巻 —2021年夏の学校特集号— pp.13-22 2022年1月

日本の核物理の将来レポート (2021年版) :

(市川、坂口が執筆・編集に参加)

原子核研究 第66巻 suppl.2 2021年12月

低エネルギースピンの物理 —スピン核分光実験—:

市川雄一

原子核研究 第66巻 特集号「日本のスピン物理学の展望」 pp.78-89 2021年8月

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

スピン整列変形核を用いた融合反応機構研究の可能性:

坂口聡志

オンライン研究会「核分裂を始めとする重たい核の物理」, 2021年6月9日

粒子線飛行時間検出器・位置検出器の開発:

長江大輔

日本量子医科学会第1回学術大会、2021年12月10日、オンライン

原子核物理学実験における偏光ガンマ線観測実験の将来:

郷慎太郎

新学術領域「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」高精度硬X線、ガンマ線偏光計を用いた原子物理・原子核物理実験の検討」小研究会、2021年8月19日、オンライン

アクチノイド標的を用いたアイソマー核分光:

富松太郎、郷慎太郎、杉山晃一、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、坂口聡志、森田浩介、Riccardo 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、Tung Thanh Pham、庭瀬暁隆

日本物理学会 2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

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、鷲山広平、坂口聡志、森田浩介、Riccardo 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、Tung Thanh Pham、庭瀬暁隆

日本放射化学会第65回討論会、2021年9月22-24日、オンライン

密度汎関数法による四重極集団ハミルトニアンの集団慣性質量の記述:

鷲山広平、日野原伸生、中務孝

日本物理学会 2021年秋季大会、2021年9月14-17日、オンライン

Nuclear Spin-Isospin Responses Studied by Nuclear Reactions; A tribute to Munetake Ichimura:

Tomotsugu Wakasa

24th International Spin Symposium (SPIN2021), 2021年10月, ハイブリッド形式で
開催

微視的集団慣性質量の記述に基づく核分裂の研究とその応用:

鷲山広平

原子核理論研究室セミナー、京都大学、2021年11月12日

Si 検出器の波形解析による軽粒子識別:

武藤大河、Pierre Brionnet、浅井雅人、郷慎太郎、Robert Grzywacz、羽場宏光、加治
大哉、木村創太、Thomas King、森本幸司、Krzysztof Rykaczewski、坂口聡志、酒井
英行、森田浩介、庭瀬暁隆、田中聖臣

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

核分裂片測定のためのシリコン検出器の波高欠損の研究:

石橋優一、武藤大河、浅井雅人、森田浩介、坂口聡志、郷慎太郎、塚田和明、佐藤哲
也、伊藤由太

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

稀少 RI リングを用いた、中性子過剰核 ^{74}Ni の質量測定:

永田優斗、長江大輔、山口由高、Naimi Sarah、阿部康志、神田真矩、大津美沙紀、関
響咲、篠崎稔、山口貴之、鈴木健、要直登、矢野朝陽、森口哲朗、小沢顕、花井周太
朗、堂園昌伯、大田晋輔、道正新一郎、洲寄ふみ、鈴木伸司、若杉昌徳

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

炭素 12 の逆運動学 α 非弾性散乱を用いたホイル状態の対崩壊分岐比測定方法の開発:

中島優人、寺西高、後藤滉一、松尾仁、井元悠介、小谷基樹、松本悠椰、田中久登

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

APD を用いた原子核反応実験用放射線検出器の開発:

後藤滉一、寺西高、中島優人、松尾仁、井元悠介、小谷基樹、田中久登、松本悠椰

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

原子核反応実験のための水素化チタン標的の開発:

松尾仁、寺西高、後藤滉一、中島優人、井元悠介、小谷基樹、田中久登、松本悠椰

第127回日本物理学会九州支部例会、2021年12月4日、オンライン

陽子-炭素弾性散乱ビームを用いた陽子偏極度計 2nd-FPP の性能評価:

米村千恵子、坂木重仁、若狭智嗣、西畑洗希、足立智輝、河本彩帆、関口仁子、渡邊跡武、中居真太郎、齋藤由子、伊藤正俊

第 127 回日本物理学会九州支部例会、2021 年 12 月 4 日、オンライン

ワイヤーチェンバの位置分解能向上のための VME データ収集システムのオンライン化開発:

足立智輝、若狭智嗣、西畑洗希、米村千恵子、河本彩帆、山下渉、横田望海、岸本侃己、関口仁子、三木謙二郎、渡邊跡武、立石健一郎、齋藤由子、北山翔、丸田祥輝、亀谷晃毅、伊藤正俊

第 127 回日本物理学会九州支部例会、2021 年 12 月 4 日、オンライン

FAM-QPRA に基づく四重極集団模型による遷移領域核の記述:

鷲山広平、日野原伸生、中務孝

日本物理学会第 77 回年次大会、2022 年 3 月 15–19 日、オンライン

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:

安藤蒼太、市川雄一、佐藤智哉、篠原悠介、西畑洗希、岸本侃己、山下渉、横田望海、郷慎太郎、高峰愛子、上野秀樹、旭耕一郎

日本物理学会第 77 回年次大会、2022 年 3 月 15–19 日、オンライン

スピン整列不安定原子核を用いたベータ核磁気共鳴法の開発:

西畑洗希、Gladkov Aleksey、上野秀樹、市川雄一、高峰愛子、山崎展樹、佐藤智哉、田島美典、今村慧、川田敬太、竹内由衣花、螺良健一、田中聡、土居三瑠、伊藤愛美、秋元彩、西村昌輝、旭耕一郎、三原基嗣、足立智輝、河本彩帆、北川敦志、佐藤真二

日本物理学会第 77 回年次大会、2022 年 3 月 15–19 日、オンライン

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、基盤研究 (B)

99 番元素 Es 標的を用いた重アクチノイド核の特異な核分裂機構の解明

研究代表者：浅井雅人

文部科学省科学研究費補助金、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

文部科学省科学研究費補助金、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

文部科学省科学研究費補助金、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

文部科学省科学研究費補助金、挑戦的研究（開拓）

112~116番元素のイオン化エネルギー測定による新たな周期律の構築

研究代表者：浅井雅人

文部科学省科学研究費補助金、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}Xe スピン緩和機構の解明

研究代表者：市川雄一

文部科学省科学研究費補助金、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)

文部科学省科学研究費補助金、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)

文部科学省科学研究費補助金、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 》

令和3年度QRプログラム、わかばチャレンジ、九州大学
放射線計測による核スピン歳差運動の精密測定 —不安定核原子 EDM 測定にむけて—
市川雄一

令和3年度黎明研究採択課題、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 先端基礎
研究センター
Isomer spectroscopy on actinide targets: a link to the island of stability
郷慎太郎

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

荒殿和希：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)： p -C 弾性散乱の微分断面積測定

梶原孝文：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)： p -C 弾性散乱での微分断面積の導出

竹中京平：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)：陽子-炭素弾性散乱における微分散乱断面積の測定

田中久登：(指導教員、寺西高)： ^{241}Am を用いた ^{237}Np 励起状態の寿命測定

能見幹都：(指導教員、坂口聡志)：太陽電池検出器のエネルギーおよび時間分解能の研究

松浦開：(指導教員、坂口聡志)：太陽電池検出器の放射線耐性の研究

松本悠椰：(指導教員、寺西高)： ^{241}Am を用いた ^{237}Np 励起状態の寿命測定

修士論文

足立智輝：(指導教員、若狭智嗣)：高速データ収集システムのリアルタイム・モニタの実装と偏極ナフタレン標的の陽子偏極度較正

甲斐民人：(指導教員、坂口聡志・長江大輔・森田浩介)：中性子過剰核ビームのための MCP-ToF 検出器の製作と時間分解能・検出効率の位置依存性評価

河本彩帆：(指導教員、若狭智嗣)：中性子・ガンマ線分別能力を有するプラスチックシンチレータのシミュレーションとビームテストによる性能評価

後藤滉一：(指導教員、寺西高)：アバランシェフォトダイオードの低エネルギー荷電粒子に対する応答

富松太郎：(指導教員、郷慎太郎・坂口聡志・浅井雅人・森田浩介)：アクチノイド標的を用いたアイソマー核分光手法の開発

中島優人：(指導教員、寺西高)： $\alpha(^{12}\text{C}, \alpha_2)$ を用いたホイル状態対崩壊分岐比測定における検出効率の検証

永田優斗：(指導教員、長江大輔・森田浩介)：稀少 RI リングを用いた ^{74}Ni の質量測定

松尾仁：(指導教員、寺西高) 逆運動学水素誘起核反応実験のための水素化チタン標的の開発

武藤大河：(指導教員、浅井雅人・坂口聡志・森田浩介)：新元素探索実験のための Si 検出器の波形解析による軽粒子識別

村上郁斗：(指導教員、森田浩介・坂口聡志・長江大輔)：小型 MCP-ToF 検出器の軽イオンに対する応答の評価

米村千恵子：(指導教員、若狭智嗣)：核子ノックアウト反応による媒質効果の解明に向けた反跳陽子偏極度計の性能向上

博士論文

外国人留学生の受け入れ

学外での学会活動

- 森田浩介： nSHE Research Group Management Board Member
若狭智嗣： 大阪大学核物理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・プログラム委員
浅井雅人： 日本放射化学会理事
坂口聡志： 日本物理学会実験核物理領域運営委員
nSHE Research Group Management Board Member
RIBF Users Executive Committee 委員
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)
日本の核物理の将来レポート編集委員
FUSION2020 Program Committee
市川雄一： RIBF UEC Vice 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
SPIN2021 Local Organizing Committee, Program Committee
日本の核物理の将来レポート編集委員
第四回若手放談会：エキゾチック核物理の将来 世話人
郷慎太郎： 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

令和3年度放射性同位元素等取扱施設安全管理担当教職員研修（主催：国立大学アイソトープ総合センター会議）における講演「九州大学におけるタンデム加速器施設の廃止と新設」、2021年11月11日、九州大学（寺西高）

日本放射化学会 第65回討論会における発表“アクチノイド核を標的としたアイソマー核分光”に対して、若手優秀発表賞を受賞（杉山晃一）

原子核三者若手夏の学校における講師。講義題目：「核スピンから探る原子核・素粒子・宇宙」、オンライン、2021年8月6-10日（市川雄一）

物性理論

研究室構成員

福田順一 教授

松井淳 講師

藪中俊介 助教

《 大学院 修士課程 》

永友 建蔵 木下 智貴 米澤 弦起 松清 洋輝

《 学部 卒業研究生 》

藤原 智仁 山脇 郁也 手島 洸樹 劉 松儒

安部 共法

担当授業

福田順一: 非平衡物理学, 統計力学 I・同演習 (, 最先端物理学, 物理学特別講義 23 (荻宿俊風博士))

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, 身の回りの物理学 B

藪中俊介: 力学・同演習, 統計力学 I・同演習, 物理学入門 II A

研究・教育目標と成果

現実的な厚さのコレステリックブルー相液晶セルの電場応答の数値計算 (福田順一)

コレステリックブルー相と呼ばれる 3次元秩序構造を有する液晶について, 現実の実験で用いられる $10\mu\text{m}$ 程度の厚さの液晶セルの電場応答の理解を目指して, 大規模な数値計算を開始した. まず前準備として, 電場下で示しうる 2種類の構造について, セル表面との相互作用による自由エネルギーが最小となる条件を決定した. その後その条件のもとでとりうる様々な格子定数を持つ (準) 安定構造の決定に向けた数値計算を開始した.

誘電体のキラルなヘキサゴナル構造が示すトポロジカルフォトリクス (米澤弦起, 福田順一)

誘電体からなるある種のキラルなヘキサゴナル構造の光学的性質について考察を行なった。キラルでない同様の構造とほぼ同じトポロジ的性質を示すことをフォトリックバンド構造の理論的考察により明らかにするとともに、異なるトポロジを有する領域の間の界面においては、キラルでない場合とは異なる光の電磁場のエネルギー輸送を示すことを数値計算により示した。

液晶が示す擬似カシミール力の数値計算 (永友建蔵, 福田順一)

液晶の熱揺らぎ由来の擬似カシミール力を数値計算によって直接的に求めることを目指してモンテカルロ法に基づく数値計算を行なった。数値計算の結果として得られる擬似カシミール力について詳細な解析的検討を行い、数値計算によって擬似カシミール力を評価する際に生じうる問題点についての考察を行なった。

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を念頭に、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モデルの空間拘束という条件下でどのように数値シミュレーションに載せるかについて、検討を行うとともに実際のプログラムを作成した。

コレステリックブルー相の双晶のシミュレーション (山下晃弘 (昨年度修士課程修了), 福田順一)

立方対称性を有するコレステリックブルー相液晶が双晶構造を示しうることが実験で明らかになっている。そのような双晶の微細構造を調べるべく昨年度行なった連続体シミュレーションの結果を精査し、双晶面の自由エネルギーの評価などを行い、論文にまとめて投稿した。

機械学習を用いた液晶系の相転移に関する考察 (福田順一)

液晶がネマチック的な秩序（分子の向きが揃っているが重心の並進秩序はない）を持つか、スメクチック的な秩序（分子の向きが揃っているだけでなく重心が層状の秩序を有する）を持つかを、分子シミュレーションの結果得られる局所的な情報から機械学習を用いて判定するスキームを、液晶の相転移の問題に適用し、ネマチック秩序状態から生じるスメクチック秩序の核形成が多段階のプロセスを経ることを見出した。昨年度実施し論文投稿した以上の研究内容について、NEDO、産業技術総合研究所、九州大学よりプレス発表を行なった。（産業技術総合研究所 高橋和義博士らのグループとの共同研究）

有限厚さの系の光学的性質の計算スキームの改良 (福田順一)

3次元秩序構造を有する液晶の光学的性質を計算するためにこれまで開発してきたスキームの改良を施し、計算の安定性を向上させた。

ジャミング転移の臨界指数 (手島洸樹, 松井淳)

ジャミング転移近傍でみられるコンタクト数の臨界的振る舞いについて、平均場近似によって下部臨界次元数が予想されている。ソフトコア系の分子動力学シミュレーションを用いて解析した。

臨界点近くの2元混合系の細管中の流れ (藪中俊介)

臨界点近くの一様相の2元混合系では、境界に接している場合、吸着の効果が重要となる。そのような場合の一例として、2元混合系が粒子溜の間の細管に封入されている場合を考え、粒子溜間の化学ポテンシャルと圧力差により駆動される流れを考えた。我々は、この場合に成り立つ相反関係の熱力学と流体力学からの導出を行った。相反関係の関係する現象の一つとして、化学ポテンシャル勾配によって質量流が生じるが、このような場合の具体的な流量の計算を行った。(慶応大学 藤谷洋平教授との共同研究)

温度勾配下での相分離 (木下 智貴, 藪中俊介)

温度勾配下での相分離現象を小貫らの Dynamic van der Waals 理論に類似した枠組みで取り扱った。流体方程式を Lattice Boltzmann 法と通常の離散化による拡散方程式の解法を組み合わせ数値的に積分する枠組みを構築した。2元混合系を挟む二枚の壁に温度差をつけ、鉛直方向に温度差温度勾配をかけた状況を考察した。その結果、2成分の密度差、平均組成、表面張力の温度依存性などに応じて、壁に平行、あるいは、垂直な相分離パターン、壁から離れて静止した液滴など多様な定常状態が得られることを示した。

発表論文

《原著論文》

“Multi-step nucleation of anisotropic molecules”

K.Z. Takahashi, T. Aoyagi and J. Fukuda,
Nature Communications **12** (2021) 5278(1–9).

“In-situ Optical Characterization of Twinning in Liquid Crystalline Blue Phases”

Y. Zhang, H. Yoshida, S.-Y. Cho, J. Fukuda, and M. Ozaki,
ACS Applied Materials and Interfaces **13** (2021) 36130–36137.

“Molecular architecture dependence of mesogen rotation during uniaxial elongation of liquid crystal elastomers”

H. Yasuoka, K.Z. Takahashi, J. Fukuda and T. Aoyagi,
Polymer **229** (2021) 123970(1–8).

“Polarity Fluctuation Inhibition by Memory in Collective Cell Motion”

K. Matsushita, S. Yabunaka, K. Fujimoto,
Journal of the Physical Society of Japan **90** 5 (2021) 054801.

“Isothermal transport of a near-critical binary fluid mixture through a capillary tube with the preferential adsorption”

S. Yabunaka, and Y. Fujitani,
Physics of Fluids **34** (2022) 052012.

“Theoretical estimation of dielectric loss of oxide glasses using non-equilibrium molecular dynamics simulations”

S. Urata, H. Hijiya, K. Niwano, J. Matsui,
Journal of the American Ceramic Society **105** 5 (2022) 4200.

《 その他の論文 》

J. Fukuda, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer and I. Muševič

“Liquid crystalline half-Skyrmions and their optical properties”
Annalen der Physik **534** (2022) 2100336(1–21).

著書

講演

《 海外での講演 》

A. Yamashita and J. Fukuda

“Simulation study of twin boundaries of cholesteric blue phases”
The 18th International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals “Polarity and Chirality in Soft Matter” (2021年9月8日, スロベニア/オンライン)

J. Fukuda

“Exotic defect structures of a chiral liquid crystal sandwiched by two parallel

substrates and their optical properties”

SIAM Conference on Mathematical Aspects of Materials Science 2021 (MS21),
MS64 Interface morphologies in liquid crystalline materials (2021年5月
22日, スペイン/オンライン, *Invited Talk*)

《国内での講演》

福田順一

「液晶物理の基礎」

新化学技術推進協会 (JACI) ライフサイエンス技術部会 材料分科会 勉強会
(2022年1月27日, オンライン, **依頼講演**)

福田順一

「フラストレートしたコレステリックブルー相液晶の秩序構造」

第8回北里材料科学セミナー (2021年11月19日, 北里大学, **依頼講演**)

J. Fukuda and S. Žumer

“Lattice orientation of cholesteric blue phases imposed by planar surface
anchoring”

Optics of Liquid Crystals 2021 (OLC2021) (2021年9月27日, オンライン)

J. Fukuda and A. Yamashita

“Exotic structures of frustrated cholesteric blue phases”

International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials De-
sign (2021年9月26日, オンライン, *Invited Talk*)

福田順一, 趙成龍, 吉田浩之, 尾崎雅則

「コレステリックブルー相の円偏光選択反射の入射角依存性」

2021年日本液晶学会討論会 (2021年9月17日, オンライン)

藪中俊介, 藤谷洋平

「選択的吸着効果を持つ毛細管中の臨界点近くの二元混合系の輸送現象」

日本物理学会 2021年秋季大会 (2021年9月21日, オンライン)

藪中俊介, Bertrand Delamotte

「非摂動繰り込み群による $O(N)$ 模型の四重臨界現象の研究」

日本物理学会 2021年秋季大会 (2021年9月21日, オンライン)

木下智貴, 藪中俊介

「温度勾配下での相分離系の液滴のダイナミクス」
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 24 日, オンライン)

木下智貴, 藪中俊介

「温度勾配と非対称な組成による相分離パターン」
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15 日, オンライン)

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ニクスの理論的研究」 (研究代表者, 新規)

松井淳:

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」 (研究分担者, 継続)

藪中俊介:

若手研究 「増殖する細胞組織の連続体理論の構築とその器官形成への応用」 (研究代表者, 継続)

藪中俊介:

基盤研究 (C) 「動的な臨界擬カシミア力によるソフトマターにおける構造形成の理論的研究」 (研究代表者, 新規)

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

福田順一:

令和 3 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」

福田順一:

日本学術振興会 二国間共同研究 (スロベニア) 「ソフトマター準結晶 と液晶スカーミオンのデザインー革新的物質構造の発見」 (研究分担者 (代表: 堂寺知成))

藪中俊介:

「ジャミング転移と応力鎖構造: 粉体から生体組織へ」、スイスとの国際共同研究プログラム (JRPs)

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

福田順一: 「柔らかいものの物理」 北里大学理学部物理学科における講義 (2021年11月19日)

藪中俊介: パリ大学 (フランス) (JSPS 若手研究に基づく共同研究)

学部4年生卒業研究

藤原智仁: (指導教員: 福田順一): ネマチック液晶における電気対流下の動的ソリトン

山脇郁也: (指導教員: 藪中俊介, 福田順一): 細胞集団と相転移モデル

手島洸樹: (指導教員: 松井淳): ジャミング転移

修士論文

米澤弦起: キラルなフォトリック結晶におけるトポロジカル相

永友建蔵: ネマチック液晶中の擬似カシミール効果の数値計算

木下智貴: (指導教員: 藪中俊介, 福田順一): 温度勾配下での相分離に伴うパターン形成

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 *Crystals*
Editorial Board Member of *Scientific Reports*
2021 年日本液晶学会討論会 運営委員
日本物理学会代議員
Program Committee Member of OLC2021

藪中俊介:

日本物理学会領域 12 運営委員

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:

九州大学よりプレス発表「液晶がナノ構造をつくる際の新現象を発見」(2022年9月10日, 産業技術総合研究所, NEDO との共同発表)
講演「柔らかいものの物理」(九州大学理学部先端自然科学講演会/福岡県高等学校理科部会 夏季研修会, 2021年8月実施)
IOP Trusted Reviewer 受賞

松井淳: 過年度生等の学習支援 (教育支援室)

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 》

守屋 俊志 益子 通生流

《 大学院 修士課程 》

白石 修一 小野山 幸輔 緒方 健人

担当授業

野村：相転移の統計力学，物性物理学 II，物理数学演習；量子統計物理学 (大学院)

研究・教育目標と成果

1. Ashkin-Teller 多重臨界点の研究 (守屋, 野村) :

Ashkin-Teller model は、2次元イジングモデルを2つ結合させたようなモデルである。基本的には3つの相からなり、相転移としては、2次元イジングユニバーサリティの臨界線2本と、 $c=1$ ガウシアン臨界線1本からなる(他にBKT転移等の領域もある)。以上3つの臨界線が交わる多重臨界点とそのクロスオーバーは、フラストレーションの無い問題にもかかわらず、扱いが困難だった。我々は反周期境界条件を用いることで2次元イジングユニバーサリティの臨界線の臨界線を精度良く求め、また共形場理論で臨界指数を調べることで研究した。

2. 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。

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 転移などに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 》

Phase transition of an $SU(3)$ symmetric spin-1 chain:

T.Mashiko and K.Nomura,

Phys. Rev. **B 104**, (2021) 155405

《 その他の論文 》

$SU(3)$ 対称な 1 次元スピン 1 量子系における臨界現象:

野村 清英, 益子 通生流, 守屋 俊志:

固体物理 2021 年 10 月号

著書

講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

1. SU(3) 対称な一次元スピン 1 量子系の臨界現象
益子通生流, 野村清英
日本物理学会 2021 年秋季大会 (物性)
2. 1 イオン異方性を伴う S=1 XXZ スピン鎖と共形場理論
白石修一, 野村清英, 守屋俊志
日本物理学会 2021 年秋季大会 (物性)
3. 脚相互作用が互い違いに交代した S=1/2 梯子模型におけるネマティック TLL 相
利根川孝, 岡本清美, 野村清英, 坂井徹
日本物理学会 2021 年秋季大会 (物性)
4. 一次元スピン 1 量子系における三重臨界点, および近傍の相転移現象
益子通生流
日本物理学会 第 77 回年次大会 (2022 年)
5. ひねり境界条件を用いたボンド交代 XXZ 鎖の相転移点の計算手法
守屋俊志, 野村清英
日本物理学会 第 77 回年次大会 (2022 年)

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. 白石 修一：(指導教員, 野村)：「1 イオン異方性を伴う $S=1$ XXZ 鎖と共形場理論」

博士論文

守屋 俊志 (指導教員, 野村) : “ A New Method to Calculate Transition Lines near the Multicritical Point using Twisted Boundary Conditions”

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

成清修 准教授
《 学部 卒業研究生 》

中嶋陽平 [前期] 津田健吾 [前期]

担当授業

非線形物理学 (成清修)、統計力学 II (成清修)、物理学ゼミナール (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さらに明らかにしつつある (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。

高温超伝導について最後のまとめを行なった (成清修)

昨年度は、高温超伝導体の正常状態についての研究について総括を行った。今年度は、超伝導の発現メカニズムまで含めた総括を行った。超伝導に転移する前の正常状態がかなりインコヒーレントになっていることを考慮すれば、基本的にはBCS理論で理解できるというのが最終結論である。これをもって、高温超伝導体に関する研究を締め括った。[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)

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。[その他の論文]

オリゴマーワールドにおける情報について論じた (中村駿也、成清修)

我々は、細胞生命の起源としてオリゴマーワールド仮説を支持してきている。今年度は、オリゴマーワールドにおける原始的な情報解釈システムについて論じた。同じ塩基配列であっても細胞によってその解釈は異なる。今回、我々が導入したモデルはパースの解釈項を実装したことになる。情報は解釈システムの中に取り込まれてはじめて生命体にとって意味を持ち得る。来年度は、オリゴマーワールドに関する研究全体の総括を行う予定である。[その他の論文]

ミクロ・マクロ双対性とその周辺の物理に関する講義ノートを公開した (成清修)

講義ノートを QIR で公開した。今年度は、全体のアウトラインを示し、微分幾何学の解説を始めた。

第 0 講: <http://hdl.handle.net/2324/4399997>

補講 A: <http://hdl.handle.net/2324/4479708>

補講 A1: <http://hdl.handle.net/2324/4736688>

補講 A2: <http://hdl.handle.net/2324/4751325>

オンライン授業の教材を公開した (成清修)

オンライン授業のために作成した教材を QIR で公開した。昨年度公開した日本語全編のエッセンスを英文要約した。

Quantum Statistical Mechanics Minimum

<http://hdl.handle.net/2324/4737400>

発表論文

《原著論文》

《その他の論文》

Note on categorical quantum fields in curved spacetimes

O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/4495645>)

高温超伝導：新著紹介から 20 年

成清修

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/4402955>)

オリゴマーワールドにおける原始情報解釈システム

中村駿也、成清修

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/4763170>)

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

[前期]

中嶋陽平：(指導教員、成清修)：代数的量子論の検討

津田健吾：(指導教員、成清修)：代数的量子論の検討

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 》

飯森 陸 木下 啓也 仲村 拓哉 川本 大雅

白木 陽 矢野 直樹

《 学部 卒業研究生 》

中島 怜 横枕 拓八

担当授業

熱力学 (和田裕文)、物性物理学 III (和田裕文)、基幹物理学 1B (和田裕文)、物性物理学 I (光田暁弘)、磁性体物理学 (光田暁弘)、物理学総合実験 (光田暁弘)

研究・教育目標と成果

一次相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、木下啓也、白木陽)

Gd_5Ge_4 は 20～60K で強磁性から反強磁性に一次相転移し、さらに 124 K で反強磁性から常磁性に二次相転移することが知られている。一次相転移温度に幅があるのは、強磁性-反強磁性転移が磁場に強く依存するためである。この物質の磁気エントロピー変化は大きな値を示すことが報告されているが、一次相転移であるために 5K 以上の熱ヒステリシスがある。本研究では Gd または Ge を第三元素で置換することによって大きな磁気熱量効果を損なうことなく、一次相転移温度や熱ヒステリシスをコントロールすることを目的としている。今年度は Ge を Al で置換した系や、Gd を La や Y で置換した系について磁気エントロピー変化を調べた。La 置換ではシャープな一次転移は保たれるが、キュリー温度はわずかしか増加しない。これに対して Y 置換はわずかな Y の添加で強磁性が消失してしまうことを見出した。一方 Al 置換も La 置換と同様にキュリー温度が上昇するが、一次転移が消失していくにもかかわらず、大きな磁気熱量効果を保っているという興味深い結果を得た。

遍歴電子メタ磁性のホール効果 (和田裕文)

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。昨年度は $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ のホール効果の解析を行い論文として発表した。今年度は ErCo_2 および $\text{Lu}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ の結果を解析した。とくに ErCo_2 ではフェリ磁性から常磁性に転移すると異常ホール係数の符号が反転することを見出している。現在正常ホール係数の結果をバンド計算から得られた理論値と比較しているところである。

Eu 系価数転移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、仲村拓哉、川本大雅)

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。非 ThCr_2Si_2 型構造の $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ において最近 Eu の価数転移が発見された。この物質は ThCr_2Si_2 型構造の Eu 化合物と同様に磁場誘起価数転移を示し、価数転移の特徴は酷似しており、両構造の Eu 価数の振舞を比較することは興味深い。今年度はこの物質に元素置換をした試料に対する静水圧力効果を調べた。 $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ の Al サイトを Ga で置換すると 10% で価数転移は消失して Eu^{2+} が安定化し、 Eu^{2+} の磁気モーメントが反強磁性秩序を示す。これは負の化学的圧力効果によって体積の大きな Eu^{2+} が安定化したことを示している。この試料に静水圧力を加えたところ、反強磁性秩序が再び消失する振舞が観測された。これは 1-6-15 系物質において初めて観測された圧力誘起価数転移である。また、同様に価数転移を示す $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ 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。単結晶ではこれらの問題が解消されることがわかってきた。次年度は、Ge 濃度を広範に変化させて単結晶育成し、基礎物性を測定して価数転移の本質的な振舞と最低温度の基底状態の振舞を詳細に調べていく。

スピントロニクス現象の圧力効果 (光田暁弘、飯森陸、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。前年度に Pt/CoFeB 二層膜において、静水圧力下で強磁性共鳴 (FMR) による動的スピン注入を誘起し、逆スピンホール効果が圧力により増強されることを見いだした。本年度はこの観測結果を詳しく解析した。その結果、Pt と CoFeB 界面のミキシングコンダクタンスの増強が支配的であることが明らかに

なった。次年度はバンド計算によって逆スピン効果増強の機構を調べるとともに、より高い圧力下までこの現象を観測することを目指す。また、Ni 薄膜について静水圧力下で試料振動型磁束計 (VSM) で磁化測定したところ、異方性磁気抵抗効果から観測された磁化容易軸の変化に対応してヒステリシスループが大きく変化することを観測した。ただし、正確な磁化曲線を得るには圧力セルの信号を正しく差し引きする必要がある。次年度は、これを詳細に行うために VSM に加えて量子干渉磁束計 (SQUID) を使った磁化測定法にも着目して研究を進めて行く。

発表論文

《 原著論文 》

Large magnetocaloric effect of Ge-doped $(\text{MnFeRu})_2(\text{PSi})$ above room temperature
Kei Soejima, Kensuke Otsubo, Takayuki Ohnishi, and Hirofumi Wada
J. Supercond. Nov. Magn. vol. **34** (2021) 2879-2884.

Hall effect of itinerant electron metamagnet $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$
Kosuke Tanabe, Yoshiro Maekawa, Hirofumi Wada, Kunihiko Yamauchi, Tamio Oguchi
and Hisatomo Harima
J. Magn. Magn. Mater. vol. **557** (2022) 169460 (8 pages).

Ultrafast electron localization in the $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.21}\text{Ge}_{0.79})_2$ correlated metal
Jose R. L. Mardegan, Serhane Zerdane, Giulia Mancini, Vincent Esposito, Jérémy R. Rouxel, Roman Mankowsky, Cristian Svetina, Namrata Gurung, Sergii Parchenko, Michael Porer, Bulat Burganov, Yunpei Deng, Paul Beaud, Gerhard Ingold, Bill Pedrini, Christopher Arrell, Christian Erny, Andreas Dax, Henrik Lemke, Martin Decker, Nazaret Ortiz, Chris Milne, Grigory Smolentsev, Laura Maurel, Steven L. Johnson, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yuichi Yokoyama, Hiroki Wadati, and Urs Staub
Phys. Rev. Res. vol. **3** (2021) pp. 033211-1-12.

Pressure-induced enhancement of spin-charge conversion efficiency in CoFeB/Pt bilayer
Riku Iimori, Sora Obinata, Akihiro Mitsuda, Takashi Kimura
Applied Physics Express vol. **15** (2022) pp. 033003-1-5.

《 その他の論文 》

著書

講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

非 ThCr_2Si_2 型の新規価数転移物質 $\text{Eu}_2\text{Pt}_6(\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x)_{15}$ の磁場誘起価数転移:

光田暁弘 (招待講演)

強磁場オンライン研究会 2021

高エネルギー分解能蛍光検出 X 線吸収分光による価数揺動系 $\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ の電子状態の研究

田村浩太郎, 下笠諒平, 井角元, 井上賢太, 浜原賢太, 河村直己, 水牧仁一朗, 雀部矩正, 光田暁弘, 和田裕文, 魚住孝幸, 三村功次郎

日本物理学会 2021 年秋季大会

硬 X 線光電子分光および高分解能蛍光検出 X 線吸収分光による $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ 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 2021 年秋季大会

バルク及び界面におけるスピン軌道相互の圧力依存性

飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇

日本物理学会 2021 年秋季大会

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、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

文部科学省科学研究費補助金、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

中島怜：(指導教員、光田暁弘)：EuNi₂P₂ における P サイトの As 置換効果
横枕拓八：(指導教員、光田暁弘)：YbPd の Ca 置換試料の作製と磁性変化

修士論文

飯森陸：(指導教員、光田暁弘)：強磁性/非磁性界面への圧力印加によるスピン流-電流変換効果の変調
木下啓也：(指導教員、和田裕文)：Gd₅Ge₄ の磁気熱量効果に及ぼす置換元素の効果
仲村拓哉：(指導教員、光田暁弘)：Eu₂T₆X₁₅ の Eu 価数に対する化学的圧力および静水圧力効果

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
和田裕文：九州大学理学研究院長，理学府長，理学部長
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

量子微小物性 A,B

研究室構成員

渡部行男 (量子微小物性 A) 教授

荒井毅 (量子微小物性 B) 准助教

担当授業

————— 量子微小物性 A 渡部 —————
力学基礎 (週1コマ 全学共通教育)
電磁気学基礎 (週1コマ 全学共通教育)
熱力学基礎 (週1コマ 全学共通教育)
基幹物理学 II (週1コマ 全学共通教育)

今年度は、これまでの講義数の半分になった。

一部対面講義を行ったが、ウィールス蔓延のため、大半の講義をオンラインで講義した。

————— 量子微小物性 B 荒井 —————
物理学実験 (前期)
物理学実験 (後期)

研究・教育目標と成果

渡部と荒井は、公式の組織上は互いに独立し無関係である。

(2010年に、両名が知らない間に、渡部と荒井を別組織と、物理部門から大学本部に申告された。これに従い、それ以前も研究は独立であったが、その翌年以降、予算部屋等全て独立組織として運営されている。このため、渡部荒井で協議し A,B で区別している)

(1)-(5) 全体の研究概要と目的 (この記述は毎年ほぼ同じ)

一言でまとめ

(1)-(5) は全体として一つのテーマ。

強誘電体などの絶縁体は、自由電子はないとして様々な概念が築かれているが、その本質部分である表面や巨大な電場 \downarrow では、自由電子が、本質的な役割を持ち、従来確立したと考えられている現象が、全く変わる可能性がある。これを解明する。

尚、(2) は、我々が世界で最初に提案した以下 1.2. の理論 (以下の PRB(1998)) の最初の検証 (以下の PRL(2001)) の続きである：

1. 分極不連続面では、不純物や欠陥がなくても、バンド曲がりにより 電子 (e-) 層やホール (h+) 層が生じる
2. 1. の層により、『強誘電体の静電学が改新』し、サイズ制限、分域の制限、素子の安定性を飛躍的に緩和する。

分極不連続面の例は、強誘電体の表面、対抗型のドメイン、強誘電体と絶縁体の界面で、上記 PRL(2001) の Fig.1 に図示した。

近年この理論と図の通りの場所に、電子層やホール層が報告が、Nature Materials, PRL, Nature commun 等に多数報告されている。

但し、これらの結果は、全て、形成時に大電圧をかけているため、酸素欠陥の形成が不可避で酸素欠陥集積の効果が主体である可能性がある。さらに、オーミック伝導をしめさず、非常に高い電場での伝導がみえている点も実験としては信頼性に欠ける。このため、やはり、以下の研究が以前として重要で最も信頼性が高いと考えている。

また、上記 2. の特性は、hyperferroelectric と名とつけて、最近米国などで注目され、第一原理計算でも示されるようになってきた。

以上のように、20 年以上前の我々の理論が最近ようやく、認められ支持されるようになってきた。

さらに、SrTiO₃/LaAlO₃の電子層の重要な原因の一部が、我々の理論と実験が示す強誘電体と絶縁体の界面の分極不連続であることが、自他の研究で解明されつつある。

SrTiO₃/LaAlO₃の電子層の報告は、我々のBaTiO₃表面の分極不連続での電子層の3年後である。SrTiO₃は、LaAlO₃を載せると表面が歪により、強誘電体になるので、SrTiO₃/LaAlO₃を見て、我々が示した強誘電体と絶縁体の界面の分極不連続ではないかと思った。

しかし、SrTiO₃/LaAlO₃は、酸素欠陥を主体として棒大な欠陥が界面にあるはずで、これが不可避なので、分極不連続と主張するのはやめておき、実際、Stanfordのグループは、これを実証した。

しかし、現在のデータをみると、

「酸素欠陥とLa混入によるSrTiO₃表面の導体化」+ 「分極不連続」+ 「SrTiO₃で古くから知られている低温での移動度上昇」が起源であろうと思われる。

この現象は、伝導の絶対値としては実用的意味はないが、我々の理論の後からの実証例として意味がある。

強誘電体は、反転可能な自発分極を持つ絶縁体と定義される。結晶構造からは、金属強誘電体も考えてもよいが、絶縁性が高くなければ強誘電体の物性は有用にならない。

このように強誘電体を絶縁体として考えると、自発分極が作る電場は巨大になる。この自発分極からの巨大な電場は、反電場と呼ばれ、従来、強誘電体のマイクロ構造や大きさの限界、特性の制限等の支配要因と考えられ、現在でも、その考えが主流である。

この自発分極の効果は、強誘電体の表面や分域（結晶方向が揃った領域）の表面といった表面に現れる。即ち、強誘電体を決め特徴づけるのは表面である。この点は、量子ホール効果のエッジ電流等の近年トポロジカルな不変量とも似ている。

しかし、この表面がどのようなものか、特に、巨大な反電場の下でどのようなようになるかは、あまり理解されていない。この理解の不十分さが顕著に現れたのが、強誘電体と半導体の間に絶縁体を挿入したデバイス構造である。

これに関し、渡部は、強誘電体のバンドギャップが有限であることを考慮すると、巨大な反電場の下では、強誘電体は自ら、表面に電子層・ホール層を形成することを理論的に示し、これにより、従来考えられていた強誘電体の様々な制限や原理が著しく変わることを提案した。

Y. Watanabe, Phys. Rev. B57, 789(1998) 被引用 158回

この結果は、渡部が世界で最初に実証した、強誘電体による電界効果（自発分極による伝導の持続的制御）で示唆されている。

Y. Watanabe, Appl. Phys. Lett. 66, 1770 (1995) 被引用 179 回

Y. Watanabe, 米国特許, U.S. Patent No. 5418389 (1995) 被引用 190 回

渡部のこの理論予想を直接示すため、超高真空中で、強誘電体の表面を原子レベルに制御、強誘電体表面に、自発分極により誘起される電子層が存在することを示した。しかし、いまだ、上記の理論よりも従来の考えが受け入れられているため、この続きとして(2)の研究を行っている。また、これをナノスケール行うのが(3)の研究である。

Y. Watanabe, M. Okano, and A. Masuda, Phys. Rev. Lett. 86, 332-335 (2001) 被引用 128 回

Physical Review Focus 2001.1.8 に解説

この問題の解決には、強誘電体が電場に対してどのような特性をもつか、その微小な伝導がどのような意味を持つかを解明する必要がある。この過程で、特異な伝導現象を発見した。これがテーマ(1)である。この現象は、2004年頃からR-RAM効果と呼ばれ応用が追求されている伝導可変現象とも関係する。

Y. Watanabe et al., Physica C235-240, 739(1994) この分野の世界初の論文2報のうちの1報

Y. Watanabe, Phys. Rev. B59, 11257(1999) 被引用 190 回

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 57,R5563(1998) 被引用 111 回

この伝導可変現象は、強誘電体やペロブスカイト酸化物では、1994年にまずPhillips、その1ヶ月後に渡部が発表した。但し、両者の提案する機構は、全く異なる。このため、スイスIBMでNobel賞受賞者のBednorz博士と共同して解明を試みた。この発表論文は、R-RAMの基礎的論文とみなされている。

Y.Watanabe, J.G.Bednorz et al., Appl. Phys. Lett.78, 3738(2001) 被引用 712 回

MRS Bulletin 26 (7) 489 (2001) に解説

R-RAMの伝導機構は、最近酸素欠陥の移動とされる場合が多いが、これは、強電場に曝し絶縁破壊に近づけた状態のものであり、あらゆる酸化物絶縁体で必ず起こる状態と考えられる。逆に、この状態にしてしまうと、電子や格子の特性に特有な物理現象が見えなくなる。このため、R-RAMや上記(1)の機構は未解決と考えている。

Y.Watanabe,Ferroelectrics349,190-209(2007)(自己論文の解説) 被引用 47 回

この解明には、基本的な伝導素過程の解析が必須であり、この解析の元になる理論を提案した。これをさらに拡張するのが(4)である。

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 81, 195210 (2010).

上記の議論とテーマ(2)(3)は、強誘電体や多くの酸化物の微小化の物性制限が、現在現在考えられているものと大きく異なる可能性を示す。これを実証するに、従来のナノ構造形成法では困難なため、全く新しい方法が必要になる。これがテーマ(5)である。

成立特許4件(2014-2016年)

上記の被引用回数はGoogle Scholar。()内の引用数は、ISI(Web of Science(トムソン・ロイター))。各分野で運営している専用引用検索(例:素核専用)の引用数は、ISIより約35割増しになる。

[今年度の各テーマの説明]

今年度は、キャンパス移転での装置問題を解消し、ナノスケール測定とラマン分光等の研究を開始した

また、PCを用いる研究(第一原理計算)で、上記の課題の解明に取り組んだ。

(1) 強誘電体酸化物の相転移での伝導異常の解明:

従来、BaTiO₃の相転移での伝導異常測定系の温度制御などの精密化と偏光同時観察を行ってきたが、今年は進展なし。

(2) 強誘電体酸化物の表面電子層の確定:

BaTiO₃単結晶の表面伝導:酸化物強誘電体は、反電場の影響は、極薄化すると甚大で、応用上も重要な問題である。我々は、このような巨大な電界があると、強誘電体の最表面は単純な絶縁体と見なせないと提案し、初期検証として高真空中でBaTiO₃の表面伝導を測定し、支持する結果を得ている。

この立場から、反電界理論を見直し、従来確立したと考えられている強誘電体の180°分域の理論を見直した作った理論の初期の形を提出している。

以下の(3)の結果と総合して、原子レベルで制御した強誘電体酸化物の表面電子層の物

性解明することを予定している。

この研究に関しては、今年度は、実験での進展なく、主に (3) の立場で行った。

(3) 超高真空 AFM による表面研究：

超高真空 AFM により超清浄な表面の分域を測定し、従来の分域理論では説明できず上記の自分たちの理論に合うことを発見している。

第一原理計算で、以下の発表論文リストにあるような計算を行った。

特に、超高真空 A の表面の実験は、BaTiO₃で行っているが、それをモデル化した第一原理計算の精密な計算法を検討し且つ一般化して、口頭発表した。

(4) 表面の効果ではなく、バルク伝導による整流現象の発見と理論：

ショットキーダイオードなど、整流現象は、従来表面の異種接合によると考えられてきた。これとは別に、同種不純物であっても濃度勾配があれば、整流することを示した。さらに、この現象は、従来よくみられるが理解できなかった不完全な整流的な I-V 特性を説明できる。この整流現象の理論をつくり実験結果を詳細に再現できており、酸化物強誘電体単結晶の相転移での伝導異常と強誘電体エピタキシャル薄膜の伝導異常の解明に用いることを検討している。今年度は本テーマの進展はなかった

(5) 科研費挑戦的萌芽研究”金属酸化物からのトンネル電子による、結晶性酸化物ヘテロ接合の形成”を実施するため、ヘテロ構造の新しい形成法についても第一原理計算を行った。ナノ構造作成過程の第一原理計算と実験照合: ナノ接近過程で、様々な応力が働く。この応力に注目し、BaTiO₃とSrTiO₃の場合に第一原理計算を行い、実験と照合した。また、トンネル電子の挙動解明のため、ナノ接近前の表面の電子状態の計算を行い、論文掲載可。さらに、ナノ接近過程とその時のトンネル電子の計算を行い、計画書に示したトンネル電子の様子を理論的に確認した。また、BaTiO₃の表面の酸素原子が表面に突き出していることが分かり、これが酸化物表面がナノ接近で結合しやすいことをさらに高めることが分かった。さらに、広域のラマン分光マップによるナノ構造解析、特に、偏光ラマンによる3次元的マップ測定を行った。

----- 量子微小物性 B 荒井 -----

(1) 準周期構造・非反転対称等非在来型積層多層膜の熱伝導：

準周期構造・非反転対称等従来の物質研究では実験的研究の困難だった系での物性研

究を熱伝導率測定から推進している。

蒸着膜による多層膜系と最近進展の著しい3次元プリンタの両面から追っている。超伝導接合mK冷凍機の断熱のための基礎研究と準周期・非反転対称構造での熱伝導研究を通じて準周期構造・非反転対称での物性研究をなすこと、及び、物質界面での高断熱・高熱伝導の応用への知見を得るのを意図している。まずは多層膜系から開始している。

実験的に研究するために平成23年度採択された挑戦的萌芽研究科研費で加熱蒸着方式の準周期構造多層膜作製装置や極低温2Kまでの熱伝導率測定装置の製作を行っている。蒸着装置の設計・製作に不備が見つかり、改設計・改修の段階である。

熱伝導率測定装置は遅まきながら進行中である。。計算機シミュレーションを準備している。同時に多層膜による1次元方向での熱伝導ばかりでなく、最近大きく進展している3次元プリンタを用いた3次元構造での研究の可能性の検討を行っている。

ただ、いずれもキャンパス移転に伴う遅延が大きく、遅延している。平成28年度末から平成29年度初めの作業にかけて、大型ラックの自らの作業による作製・作業時間確保のための物品の移動式台の整備などで新キャンパス新居室での大まかな物品再配置作業に目途がついた。これより従来から使える装置の配線・配管等に掛かる段階に入った。新規導入装置の整備・動作試験等も必要なことから研究成果が出るまでにはまだ時間を要すが、実験的研究再開へ近づいた。。

(2) Bi系銅酸化物高温超伝導体単結晶中の超音波の音速測定に関する論文執筆

発表論文

《原著論文》

《その他の論文》

著書

講演

《 海外での講演 》

国際会議

予定した招待講演がウィールス蔓延のため中止

《 国内での講演 》

渡部行男 強誘電体の第一原理計算の精度の新基準 と 結晶パラメータで高精度に自発分極をえる代数式 2021 日本物理学会 秋季大会

渡部行男 強誘電体の反電場に用いる誘電率の値の第一原理計算 及び 渦型分域の矛盾 2021 日本物理学会 秋季大会

渡部行男 基底状態としての SrTiO₃ の強誘電性 2021 日本物理学会 秋季大会

渡部行男 反電場の誘電率からみる渦分域の矛盾, 2021 応用物理学会 秋季大会

外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

———— 量子微小物性 A 渡部 —————

渡部 (代表), 挑戦的研究 (萌芽) 「強誘電体分極の巨大近接効果」の現象としての確立
2019-2021 年度

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

村田学術振興財団 研究助成

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

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

Integrated Ferroelectrics 誌 編集委員

15th International Symposium on Ferroic Domains & Micro- to Nano-scopic Structures
(ISFD-15) 組織委員

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

Integrated Ferroelectrics, Editorial Board

九州大学出版会 理事

日本学術振興会関係 審査委員

15th International Symposium on Ferroic Domains & Micro- to Nano-scopic Structures
(ISFD-15) 組織委員

教員免許講習（募集と準備のみ。受講者数が開催人数下限に未達のため開講しなかつ

た)

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

《 博士研究員 》

Shaojie Hu

《 大学院 博士課程 》

Md. Kamruzzaman Amany E. Harby Zheng Gang

《 大学院 修士課程 》

岩堀拓真 大日方初良 高山裕成

宮崎圭司 鍋島すみれ 中田巧 岩堀拓真

愛智 遼太郎 井上 建吾 公田 悠樹 榎本 浩克

溝上 航平

《 学部 卒業研究生 》

劉松儒 引地淳士 新田晴海

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 (大西紘平、山田和正)、物理学総合実験 (大西紘平、山田和正)、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

動的な熱スピン注入の定性的評価 (大日方初良、木村崇)

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) を利用する動的スピン注入法が注目されている。これまで、動的スピン注入の機構は、スピンポンピングが主であると考えられていたが、近年、FMR 時の発熱に起因するスピン注入 (熱スピン注入) の重要性が指摘されている。そこで本研究では、動的スピン注入の定量評価が可能な新規測定手法を開発し、更に、磁性多層膜を用いて、動的スピン

注入における熱スピン注入の寄与の定量的評価を試みた。一連の実験で得られた結果は、動的スピン注入において、熱スピン注入は、スピンプンピングと同程度の寄与、あるいはかなり支配的であることが示され、これまで説明が困難であった特有の減少も、熱スピン注入を考慮することで理解できることを示した。

超伝導体/非磁性体二層構造におけるスピン流の輸送特性 (溝上航平、木村崇)

代表的な量子物性現象である超伝導と強磁性を組み合わせた超伝導体/強磁性体複合ナノ構造では、スピン蓄積とクーパ対の共存による新奇な量子伝導現象が期待されている。本研究では、超伝導体/非磁性体をスピン流チャンネルとする横型スピバルブを作製し、超伝導体/非磁性体二層構造におけるスピン流の輸送特性を評価している。

超伝導 Al 細線におけるスピン偏極・スピン非偏極準粒子の緩和長測定 (岩堀拓真、大西紘平、木村崇)

超伝導準粒子のスピン偏極の有無が、その緩和過程に影響を与えることが分かっている。しかし、これまでの研究ではスピン拡散長の短い Nb を用いていたため、影響の度合いが小さかった。そこで本研究は、超伝導状態でのスピン拡散長が比較的長い Al を超伝導準粒子のチャンネルとして用いる。最終的には、本実験によって得られた準粒子緩和長の差と、先行研究の超伝導 Al のスピン拡散長を比較することで、両者の定量的関係を明らかにする。

有機物中の熱スピン流の探索 (山田和正、木村崇)

有機物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、素子を作成した。有機と金属の界面の改良を行った。カーボンを経由して流れるスピン流を逆スピホール効果により検出を行っている。有機物中におけるスピン緩和機構の解明を目指す。

強磁性ナノワイヤにおける磁気熱電効果を用いた 3 次元熱解析 (井上 建吾、木村崇)

諸磁気熱電効果の特性を利用してネノスケールでの熱分布を解析する研究を行った。先行研究の課題であった電氣的接続による漏れ電流の懸念やその他の可能性を排除する構造を試行した。さらに磁気熱電効果が発生する元となる物質を NiFe と Co で比較することで、より解析に適した物質の検討も行った。

PMN-PT/Pt/CFB におけるスピン-電荷変換の電界変調 (一兜 博人、木村崇)

重金属/強磁性体の接合におけるスピン-電荷変換の高効率化はスピデバイスへの応用に

関わる中心的話題の一つである。そこで我々は、強誘電体/強磁性体のマルチフェロイック界面を利用した有益な駆動機構の探索を行っている。現在は、PMN-PT/Pt/CFB デバイスにおいて、高周波の磁場掃引による強磁性共鳴を利用した動的スピン注入実験によりスピン-電荷変換過程の電界変調を評価し、日本物理学会第 77 回年次大会にて成果報告を行った。

発表論文

《 原著論文 》

Effective modulation of spin accumulation using a ferromagnetic/nonmagnetic bilayer spin channel:

T.Ariki, T.Nomura, K.Ohnishi, T.Kimura,
J. Phys. D, **55** (2021) pp.095302

Nonlinear power dependence of ferromagnetic resonance in NiFe/Pt/CoFeB trilayer:

M.Yafuo, K.Miyazaki, Y.Takayama, S.Obinata, T.Kimura,
J. Phys. Condens. Matter., **34** (2021) pp.045801

Temperature profile of nanospintronic device analyzed by spin-dependent Seebeck effect:

Md Kamruzzaman, S.Hu, K.Ohnishi and T.Kimura,
Appl. Phys. Express, **14** (2021) pp.073004

Interfacial exchange coupling-modulated magnetism in the insulating heterostructure of CoOx/yttrium iron garnet:

P. C. Chang, V. R. Mudinepalli, S. Y. Liu, H. L. Lin, C. C. Hsu, Y. T Liao, S. Obinata, T. Kimura, M. Y. Chern, F. Y. Lo, and W. C. Lin,
Journal of Alloys and Compounds, **875** (2021) pp.159948

Significant suppression of galvanomagnetic signal under dynamical spin injection in CoFeB/Pt bilayer:

S. Obinata, K. Ohnishi, and T. Kimura,
Appl. Phys. Lett., **118**, (2021) pp.15240

Half-metallic nature of the low-temperature grown Co₂MnSi films on SrTiO₃
K.Kudo, S.Yamada, M.Yafuso, T.Kimura, V.K.Lazarov, and K.Hamaya,
Journal of Alloys and Compounds, **854** (2021) pp.155571

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

S.Obinata, R.Imori, K.Ohnishi, and T.Kimura:

Influence of heat flow control on dynamical spin injection in CoFeB/Pt/CoFeB trilayer:
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 》

Non-local spin transport in superconductor/ferromagnet hybrid lateral structures:
K. Ohnishi, T. Kimura,
ICSM2021, online, Turkey, October (2021)

Qualitative evaluation of the temperature dependence of dynamical spin injection in
CoFeB/Pt/CoFeB trilayer thin films:
S.Obinata, R.Imori, T.Kimura,
Intermag21, Virtual Conference, April (2021)

Electric Control of Magnetic Coercivity in Multiferroic Heterostructure:
Amany Elsayed Harby, Shaojie Hu, Takashi Kimura,
MRM2021,online, Yokohama, Japan, December (2021)

Electric-field control of magnetization process in Co₂FeSi/BaTiO₃ multiferroic hybrid:
Shaojie Hu, Shinya Yamada, Po-Chun Chang, Kohei Ohnishi, Kohei Hamaya, Wen-
Chin Lin, Takashi Kimura,
MRM2021,online, Yokohama, Japan, December (2021)

《 国内での講演 》

超伝導体／常伝導体構造におけるスピン流:
大西紘平
CSRN スピン若手交流会, オンライン, (2021年8月)

遷移磁性金属細線における横ゼーベック効果の検出:

井上 建吾, 溝上 航平, 胡 少杰, 山田 和正, 大西 紘平, 木村 崇
日本物理学会九州支部例会、オンライン、(2021年12月)

Nb/Cu 二層構造におけるスピン流の輸送特性:

溝上 航平, 胡 少杰, 山田 和正, 大西 紘平, 木村 崇
日本物理学会九州支部例会、オンライン、(2021年12月)

超伝導体/常伝導体二層膜におけるスピン流:

大西 紘平
第1回「超伝導真空」領域推進研究会、オンライン、(2021年6月)

バルク及び界面におけるスピン軌道相互の圧力依存性:

飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇
日本物理学会 2021 年秋季大会、オンライン、(2021年3月)

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、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

文部科学省科学研究費補助金、挑戦的研究 (開拓)
ナノスピンドYNAMIX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

文部科学省科学研究費補助金、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

文部科学省科学研究費補助金、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YNAMIX

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

劉松儒：(指導教員、木村崇)：ナノ構造を用いた微小水滴の動的挙動の制御

新田晴海：(指導教員、木村崇)：スパッタ法で作成した BiSbTe 薄膜のトポロジカル物
性の評価

修士論文

岩堀拓真：(指導教員、木村崇)：超伝導ニオブ細線におけるスピン偏極準粒子の緩和
機構に関する研究

鍋島すみれ：(指導教員、木村崇)：ナノ構造磁性体表面上における接触角制御に関する
研究

中田巧：(指導教員、木村崇)：フレキシブル基板上に成膜した磁性薄膜のスピンドイナ
ミクス

大日方初良：(指導教員、木村崇)：マグノン-フォノン相互作用を考慮した動的スピン
注入の定量的解析

高山裕成：(指導教員、木村崇)：磁性薄膜における強誘電体を用いたスピン波伝導制御
に関する研究

博士論文

Md. Kamruzzaman : (指導教員、木村崇) : Study on heat transports in metallic nanostructures using magneto-thermoelectric effects

Amany E. Harby : (指導教員、木村崇) : Modulation of magnetic properties of magnetic thin films using flexible and ferroelectric substrates

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

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
植松 祐輝 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 満生 明輝 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

《 学部 卒業研究生 》

岩崎 暖人 宮崎 陸 井出 健一郎 津田 健吾

《 研究生 》

担当授業

物理学の進展 (木村康之)、物理学ゼミナール (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 (植松祐輝)、電磁気学 1・同演習 (植松祐輝)、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、その集成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め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とき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。

《 来年度の目標 》

研究（1 - 13）のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《 原著論文 》

1. Electrophoretic mobility of a water-in-oil droplet separately affected by the net charge and surface charge density,
Yuki Uematsu and Hiroyuki Ohshima,
Langmuir **38**, 4213-4221 (2022).
2. Electrification of water interface,
Yuki Uematsu,
J. Phys. Condens. Matter **33**, 423001 (2021).
3. Interfacial, electroviscous, and nonlinear dielectric effects on electrokinetics at highly charged surfaces,
Majid Rezaei, Bernhard Mitterwallner, Philip Loche, Yuki Uematsu, Roland R. Netz, and Douwe Jan Bonthuis,
J. Phys. Chem. B **125**, 4767-4778 (2021).
4. 疎水性界面の表面電荷問題とジョーンズ・レイ効果,
植松祐輝,
分子シミュレーション学会 会誌 アンサンブル **23**, 88-95 (2021).

《 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)
2. 光渦で駆動された流体相互作用する粒子系が示すリズム運動, 木村康之, 研究会「光の軌道角運動量の発生機構と物質相互作用の理解」(オンライン, 招待講演) (2021年3月5日)
2021.12.04 第127回日本物理学会九州支部例会 (オンライン)
3. ”電解質溶液中での高分子膜のイオン伝導” 井出健一郎, 木村康之, 植松祐輝
4. ”電解液における拡散電流と電気二重層充電電流の解析” 岩崎暖人, 木村康之, 植松祐輝
5. ”差分動的顕微鏡法を用いたソフトマターのダイナミクス測定” 野見山直弥, 植松祐輝, 木村康之
6. ”暗視野顕微鏡による
7. ”液晶液滴の光駆動回転” 齊藤圭太, 木村康之
8. ”液晶乱流系の時空間ダイナミクス” 田中健太郎, 木村康之
9. ”自走液晶液滴のダイナミクス” 津田健吾, 木村康之
10. ”粉体斜面流における障害物周りの速度場”, 山口雅也, 稲垣紫緒
11. ”砂山の斜面の揺らぎ”, 山科スミレ, 稲垣紫緒
12. ”高充填回転円筒系における粉粒体の輸送現象”, 米田翔一, 稲垣紫緒
13. 2022.01.26 福井謙一記念センターシンポジウム (オンライン) 受賞講演「水の界面物性計算理論の構築と疎水性界面における帯電メカニズムの解明」
14. 2022.03.04 2021年度 界面動電現象研究会 招待講演「水界面における誘電率と粘性の異常性の起源と電気浸透のための有効理論」
2022.03.15-18 日本物理学会第77回年次大会 (オンライン開催)
15. ”Water-in-Oil ドロップレットの電気泳動移動度を定める2つの因子” 植松祐輝, 大島広行
16. ”電解質溶液中の逆浸透膜のイオン伝導” 井出健一郎, 木村康之, 植松祐輝
17. ”交流インピーダンス法を用いた電気二重層容量の測定” 岩崎暖人, 木村康之, 植松祐輝
18. ”暗視野顕微鏡によるナノバブルの観察” 宮崎陸, 木村康之, 植松祐輝
19. ”画像相関を用いたソフトマターのダイナミクス測定” 野見山直弥, 植松祐輝, 木村康之
20. ”光駆動回転子の運動” 齊藤圭太, 木村康之
21. ”液晶乱流系の時空間ダイナミクス” 田中健太郎, 木村康之
22. ”粉体斜面流での障害物による粒子の速度場と密度の関係”, 山口雅也, 稲垣紫緒

23. ”局所的な斜面の角度”, 山科スミレ, 稲垣紫緒
24. ”高充填回転円筒系における粉粒体の輸送現象”, 米田翔一, 稲垣紫緒
25. ”準開放系における拡散火炎の発振と分岐”, 猪本 修 (兵教大), 宮内 しほな (兵教大), 大野 燎, 稲垣 紫緒
26. 2021.05.13-15, 第 23 回 理論化学討論会 (オンライン) 植松祐輝 ”過剰イオンを持った水滴中のイオン分布” ポスター発表
2021.06.26 14th Mini-symposium on liquids (MSL2021)
27. 植松祐輝 ”水界面の帯電について” 招待講演
28. 井上颯大 ”マイクロバブル分散系のオストワルト熟成と界面活性剤効果”
29. 2021.09.15-17, 第 72 回コロイドおよび界面化学討論会 (オンライン) 植松祐輝 ”絶縁油中の過剰イオンをもった水滴の電気泳動移動度” 口頭講演
2021.09.20-23, 日本物理学会秋季大会 (オンライン)
30. 植松祐輝 ”絶縁油中の過剰イオンをもった水滴の電気泳動移動度” 口頭講演
31. 井上颯大, 木村康之, 甲賀研一郎, 植松祐輝 ”マイクロバブル分散系のオストワルト熟成” 口頭講演
32. ”二次元粉体流における障害物の影響”, 山口雅也, 稲垣紫緒
33. ”粉粒体の安息角に対する底面効果”, 山科スミレ, 稲垣紫緒
34. ”高充填回転円筒系における粉粒体の移流構造”, 米田翔一, 稲垣紫緒
35. ”結合二重振り子のシミュレーション”, 大野 燎, 稲垣 紫緒
2021.09.22 第 35 回九州コロイドコロキウム (オンライン)
36. 岩崎暖人, 木村康之, 植松祐輝 ”電気二重層の形成に伴う電流の変化” ポスター発表

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、国際共同研究加速基金 (B)

多彩な環境応答を示す溶媒誘起力の解明：理論・実験融合研究

研究代表者：甲賀研一郎 (岡山大学)

研究分担者：植松祐輝

文部科学省科学研究費補助金、若手研究

電荷を帯びた微量成分に基づく疎水性界面での表面電荷の起源の解明

研究代表者：植松祐輝

文部科学省科学研究費補助金、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

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

科学技術振興機構 さきがけ 複雑流動

マイクロ・ナノ界面系でのイオン流体科学の創出
研究代表者：植松祐輝

クリタ 水・環境科学振興財団 萌芽的研究

気泡分散系の気泡径ダイナミクスにおける界面活性剤効果の研究
研究代表者：植松祐輝

九州大学 QR プログラム わかばチャレンジ

マイクロバブル分散系の気泡径ダイナミクス計測による気泡安定性の解明
研究代表者：植松祐輝

笹川科学研究助成

水・アルコール・電解質 3 成分系における定常電流下の非平衡相分離の探索
研究代表者：植松祐輝

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

岩崎 暖人：(指導教員、植松祐輝・木村康之)：

混合溶液系における電気二重層容量の測定

井出 健一郎：(指導教員、植松祐輝・木村康之)：

電解質溶液中の逆浸透膜のイオン伝導

宮崎 陸：(指導教員、植松祐輝・木村康之)：

暗視野顕微鏡によるナノバブルの観察

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

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)

界面動電現象研究会役員 (植松)

日本物理学会九州支部会役員 (稲垣)

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

2021.11.12 出前授業 熊本県立済々黉高等学校 「ブラウン運動と水の物理と化学」

2021.11.11 出前授業 鹿児島県立玉龍高等学校 「つぶつぶのぶつり 粉粒体の物理学」
(稲垣)

複雑流体

研究室構成員

- 前多 裕介 准教授
《 博士研究員 》
福山 達也
《 大学院 博士課程 》
別府 航早 坂本 遼太
《 大学院 修士課程 》
賀屋 紘典 萩原 宙 加藤 修三 白井 瑞穂
荒木 駿也 Archit Negi 繁田 和幸 榎 航平
《 学部 卒業研究生 》
家永 竜 柏原 智香

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）、非線形物理学（前多）

研究・教育目標と成果

1. 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。人工細胞内に生成される液滴が特定の分子を格納・濃縮することで細胞内の構造形成や反応制御を担う重要な構造体であることを明らかにし、論文として発表を行った（論文1）。さらに、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。

2. アクティブマターの集団運動と幾何法則の研究（前多、別府、荒木、Negi、柏原）
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。バクテリア懸濁液をマイクロウェルに封入し、再現性の高い実験が可能となった。この実験系で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、渦の回転方向が一方向に揃う「キラル渦運動」が出現することがわかった。この詳細なメカニズムを理論モデルと共に明らかにし、査読付き論文として発表した（論文2）。さらに遊泳バクテリアのみならず、キネシン分子モーターに運ばれる微小管の集団を用いた幾何的制御にも取り組んだ。分子モーターに駆動される微小管の集団運動は配向相互作用がネマチック相互作用となるため渦形成とは異なる集団運動パターンとなる。しかし理論的には同様の幾何法則で集団運動を制御できると予測され、これを実際に検証したところ遊泳バクテリア集団と同様の幾何的ルールで集団運動のパターン形成が制御できることを明らかにし、査

読付き論文として発表した（論文3）。バクテリアと細胞骨格系の相異なる集団運動で共通する幾何法則が明らかになったことは、アクティブ乱流に内在する普遍性を解明したという点で学術的意義があるといえる。

3. アクティブマター集団が示す位相欠陥と流れの幾何的制御（前多、繁田、福山、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、真核培養細胞の上皮細胞と筋芽細胞を用いて、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、上皮細胞に特有の弾性的性質による効果、筋芽細胞の位相欠陥形成に伴う効果がそれぞれ幾何的ルールに現れることが実験的に明らかになった。それぞれの細胞種に特徴的な性質を明らかにする上でアクティブマターの幾何的ルールが有用であることを示しており、今後は幾何的ルールを破る細胞集団運動の力学的メカニズムを実験・理論・数値計算を統合して解析を進めていく予定である。

4. アクティブゲルと細胞運動の非平衡力学（前多、坂本）

すべての生命の基本単位は、小さな細胞である。その細胞の運命は、細胞核などの構造を細胞の中心におくか細胞の縁に運ぶかという配置の対称性で決定される。この問題を解決する鍵は、細胞がもつ対称性制御の本質を失わず、細胞内環境の複雑性を軽減した人工細胞モデルを確立することにある。そこでアクチン細胞骨格とミオシン分子モーターを含む卵抽出液を油中液滴内に封入した人工細胞系を構築し、アクチンとミオシンからなる複合体アクトミオシンの力が細胞内配置対称性を制御するメカニズムの解明を進めた。その結果、人工細胞の端から中央へ収縮しながら伝搬するアクチン波がクラスターを中央へ運び、人工細胞の縁とクラスターの間形成されたアクトミオシン・ブリッジが、クラスターを縁に引き寄せていることで配置対称性が破れることを発見した。細胞内部でアクトミオシンが自発的に収縮力を発生し、周期的なアクチン凝集体の波が発生することで、細胞内の対称性を制御していることを解明した。さらに、人工細胞の膜とアクトミオシゲルとが接着する機能的脂質膜を与えることで、細胞骨格の収縮力を外部基盤に伝えて自律的に運動する細胞運動の再構成に初めて成

功した。人工細胞を2枚のガラス板に挟むと、アクチンの流れが人工細胞の表面とガラス基板の間に摩擦力を生み、自律的に運動できることを初めて発見した。狭い空間に拘束された運動を記述するアクティブゲルモデルを構築し、界面摩擦力と流体抵抗のバランスで運動速度が決まることを明らかにした。効率的な力の伝達に不可欠な物理的要因を明らかにしたことは、生体組織内を運動する細胞運動の力伝達メカニズムの理解に貢献すると言える。以上の結果は人工細胞とその物理的理解を通じた「対称性の理解と細胞機能を制御する生命の非平衡力学」に道筋を拓くものであり、特に人工細胞の自発運動については査読付き論文誌に論文投稿を行った。

5. 回転に伴う弾性リボンの変形とダイナミクス (前多、萩原)

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。以上の結果をまとめ、論文投稿準備中である。

発表論文

《原著論文》

1. Kato S, Garenne D, Noireaux V and Maeda YT

Phase separation and protein partitioning in compartmentalized cell-free expression reactions

Biomacromolecules **22**, 3451-3459 (2021)

2. Beppu K, Izri Z, Sato T, Yamanishi Y, Sumino Y and Maeda YT

Edge current and pairing order transition in chiral bacterial vortices

Proc. Natl. Acad. Sci. USA **118**, e2107461118 (2021)

3. Araki S, Beppu K, Kabir AMR, Kakugo A and Maeda YT

Controlling collective motion of kinesin-driven microtubules via patterning of topographic landscapes

Nano Letters **21**, 10478-10485 (2021)

4. Kikuchi K, Fukuyama T, Uchihashi T, Furuta T, Maeda YT and Ueno T

Protein needles designed to self-assemble through needle tip engineering

Small **18**, 210641 (2022)

5. Maeda YT

Negative autoregulation controls size scaling in confined gene expression reactions

arxiv:2111.00194, now published in Scientific Reports

《その他の論文》

6. 坂本遼太, 前多裕介, 宮崎牧人

細胞核はどこにあるか - アクティブゲルと配置対称性の制御原理

日本物理学会誌 **76**, 595-600 (2021)

7. 前多裕介, 白井瑞穂

遺伝情報高分子の非平衡現象と生命の起源

高分子 **70**, 563-564 (2021)

8. 前多裕介, 加藤修三, 福山達也

ソフトマターで分子を運ぶ, 選り分ける

現代化学 **607**, 46-49 (2021)

9. 金原 数, 飯野亮太, 竹内正之, 前多裕介
はたらく分子マシン：ナノ世界のエネルギー変換へ
現代化学 612, 46-50 (2022)

著書

講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

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エッジ流れの幾何的制御
日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15 日-19 日

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と成長のダイナミクス
日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15 日-19 日

加藤 修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多 裕介
細胞区画内のセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象とぬれ効果
日本生物物理学会第 59 回年次大会, 2021 年 11 月 25 日-27 日

坂本 遼太, Ziane Izri, 島本勇太, 宮崎 牧人, 前多 裕介
アクティブな界面摩擦と流体抵抗の幾何学的バランスが決めるアクトミオシン液滴の
自発運動
日本生物物理学会第 59 回年次大会, 2021 年 11 月 25 日-27 日

前多 裕介
人工細胞における細胞内構造形成の不安定性
日本生物物理学会第 59 回年次大会, シンポジウム講演, 2021 年 11 月 25 日-27 日

繁田和幸, 福山達也, 高橋陸, 田中あや, 前多裕介
3次元ハイドロゲルが誘起する上皮細胞の集団運動

日本物理学会 2021 年秋季大会, 2020 年 9 月 20 日-23 日

加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介
細胞区画内のセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象と濡れ効果
日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 11 月 25 日-27 日

別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
バクテリア乱流ダイナミクスとフラストレートされた秩序渦の制御原理
日本物理学会 2021 年秋季大会, 2020 年 9 月 20 日-23 日

荒木駿也, 別府航早, Arif Md. Rashedul Kabir, 角五彰, 前多裕介
アクティブ細胞骨格系における集団運動と幾何的制御
日本物理学会 2021 年秋季大会, 2020 年 9 月 20 日-23 日

福山達也, 菊池幸祐, 上野隆史, 前多裕介
タンパク質針の相互作用と凝集による 2 次元集団秩序形成
日本物理学会 2021 年秋季大会, 2020 年 9 月 20 日-23 日

前多裕介
アクティブゲルの対称性と動きの非平衡力学 日本物理学会 2021 年秋季大会, シンポジウム講演, 2020 年 9 月 20 日-23 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 》

バイオリアクター創成と動作機構解明

九州大学-日本電信電話株式会社 共同研究グラント

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)

坂本遼太

生体分子モーターが躍動する非平衡界面と細胞の破れた対称性の物理学

日本学術振興会特別研究員 DC1

別府航早

遊泳バクテリア懸濁液の乱流ダイナミクスと幾何的普遍性の研究

日本学術振興会特別研究員 DC2

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

家永 竜（指導教員、前多裕介）

筋芽細胞集団が示す位相欠陥と流れの幾何的制御

柏原 智香（指導教員、前多裕介）

細胞骨格高次構造体におけるモータータンパク質1分子計測に向けて

修士論文

荒木 駿也（指導教員、前多裕介）

アクティブ細胞骨格系における集団運動の幾何的制御に関する研究

加藤 修三（指導教員、前多裕介）
人工細胞系における液液相分離現象と遺伝子発現制御

白井 瑞穂（指導教員、前多裕介）
核酸高分子と正電荷ペプチドの相分離現象に関する実験研究

萩原 宙（指導教員、前多裕介）
回転に伴う弾性リボンの変形とダイナミクス

博士論文

別府 航早（指導教員、前多裕介）
Geometric design principle for active ordering: From bacterial turbulence to cytoskeletons

坂本 遼太（指導教員、前多裕介）
Out-of-equilibrium physics of cellular symmetry breaking orchestrated by the active cytoskeletal systems confined in cell-sized spaces

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

前多 裕介
日本生物物理学会雑誌編集委員

前多 裕介
日本物理学会九州支部支部役員（支部長）

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

坂本 遼太
九州大学学生表彰（学術研究活動表彰） 受賞

坂本 遼太
日本生物物理学会 若手奨励賞 受賞

加藤 修三
日本生物物理学会 学生優秀講演賞 受賞

別府 航早
日本物理学会 学生優秀発表賞 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 》

荊原 佳祐 井口 昇之 杜 海洋 熊丸 一平

富田 海理

《 学部 卒業研究生 》

松岡 亮佑 吉良 和真 濱田 啓聖

《 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** (井口、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** (荊原、井口、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) **細胞内部環境のガラス的挙動** (杉野、熊丸、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。

(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、井口、熊丸、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な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-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** (井口、富田、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計測を行い、液体状の凝集体とゲル状の凝集体が存在することを示した。これは、相分離液滴が時間とともにエイジングする可能性を示している。

(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（井口、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かす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、細胞質と同様の損失弾性率の周波数依存性 $G''(\omega) \propto \omega^{0.5}$ が広帯域で観測されることを示した。このような損失弾性率の周波数依存性は、濃厚粒子系に特徴的なレオロジーであることを示唆している

(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、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明らかにしつつある。

《 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. Noise-Induced Acceleration of Single Molecule Kinesin-1 Takayuki Ariga , Keito Tateishi, Michio Tomishige, and Daisuke Mizuno, PHYSICAL REVIEW LETTERS **127**, 178101, (2021) DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.178101
2. Adhesive-ligand-independent cell-shaping controlled by the lateral deformability of a condensed polymer matrix Sayaka Masaïke, Saori Sasaki, Hiroyuki Ebata, Kosuke Moriyama, Satoru Kidoaki, Polymer Journal, **54** (14), 211-222, (2022) DOI: 10.1038/s41428-021-00577-w
3. 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

《 その他の論文 》

著書

講演

《 海外での講演 》

1. 《ESCHM-ISCH-ISB 2021, 遠隔》
Motion of molecular motors reflecting rheological properties in cells (招待講演)
T. Ariga, Y. Tomishige, D. Mizuno

2. 《ESCHM-ISCH-ISB 2021, 遠隔》
Universal Glass-forming behavior and Glassy cytoplasm driven by non-thermal forces (招待講演)
K. Nishizawa, D. Mizuno

3. 《ESCHM-ISCH-ISB 2021, 遠隔》
Metabolism-Dependent Active Diffusion in Living Cells (招待講演)
Y. Sugino, K. Nishizawa, D. Mizuno

4. 《ESCHM-ISCH-ISB 2021, 遠隔》
Microrheology of concentrated emulsion as a model cytoplasm (招待講演)
S. Inokuchi, R. Matsuoka, D. Mizuno

《国内での講演》

1. 《物理学会 2021 年秋季大会, 遠隔》
濃厚バクテリア懸濁液の非平衡力学 (口頭)
杉野裕次郎, 水野大介

2. 《日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔》
レーザー干渉法における光てこの応用 (口頭)
井口昇之, 松岡亮介, 水野大介

3. 《日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔》
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 (口頭)
井口昇之, 水野大介

4. 《日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔》
揺動散逸定理の破れの細胞質レオロジーへの示唆 (口頭)
熊丸一平, 杉野裕次郎, 水野大介

5. 《日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔》
局所的な力印加による濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (口頭)

荊原佳祐, 江藤高宏, 水野大介

6. 《日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔》
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 (口頭)
富田海理, 藤原誠, 水野大介
7. 《Active Matter Workshop 2022, 遠隔》
Rheology of Condensed Active Colloidal Suspension (口頭)
杉野裕次郎, 江端宏之, 水野大介
8. 《Active Matter Workshop 2022, 遠隔》
Spatial Correlation and Relaxation Time in Active E. Coli (口頭)
濱田啓聖, 杉野裕次郎, 江端宏之, 水野大介
9. 《第 127 回日本物理学会九州支部例会, 遠隔》
バクテリア遊走を伴う懸濁液系の非平衡力学 (口頭)
濱田啓聖, 杉野裕次郎, 水野大介
10. 《第 127 回日本物理学会九州支部例会, 遠隔》
巨視的なずり場印加下の濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (口頭)
吉良和真, 荊原佳祐, 水野大介
11. 《第 127 回日本物理学会九州支部例会, 遠隔》
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, 水野大介
12. 《物理学会第 77 回年次大会 (2022 年), 遠隔》
力学駆動された混み合い系の非平衡レオロジー (口頭)
杉野裕次郎, 江端宏之, 水野大介
13. 《物理学会第 77 回年次大会 (2022 年), 遠隔》
オオアメーバの変形に駆動された運動モード分岐 (口頭)
江端宏之, 西上幸範, 藤原典典, 木戸秋悟, 市川正敏

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、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

文部科学省科学研究費補助金、新学術領域研究 (公募)

揺動散逸定理の破れと非ガウス性解析に基づく非熱的揺らぎの有用性評価

研究代表者：水野大介

文部科学省科学研究費補助金、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

《 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

松岡 亮佑：(指導教員、水野大介)：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

吉良 和真：(指導教員、水野大介)：巨視的及び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

濱田 啓聖：(指導教員、水野大介)：遊走大腸菌懸濁系における揺らぎの空間相関と緩和時間

修士論文

荊原 佳祐：(指導教員、水野大介)：局所的及び巨視的外場印加による濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー

井口 昇之：(指導教員、水野大介)：細胞質のレオロジー研究～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～

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3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、今年度、客員准教授に着任した。

下村氏はサバティカルの制度を利用して10月から研究室に継続的に滞在されている(翌年9月までを予定)。素粒子理論研究室では、10月に「vector portal and anomalies」というテーマでセミナーを行って頂いた。近年、急速に注目度が高まっている軽い新粒子に焦点を当てて、新物理の可能性とその実験的検証方法について講演して頂いた。その後は、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。特に、学生を集めて素粒子論的宇宙論についてのゼミを定期的に行って頂いている。また、下村氏の発案で始まった現象論勉強会からは共同研究が始まっており、強固な関係を下に今後も共同研究を推進していけるものと考えている。

文責:津村浩二

令和3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		池田 陽一	松本 琢磨	関 奈々 (TS)
宇宙物理理論	山本 一博	菅野 優美	倉持 結 (特任) 松村 央 (特任)	
粒子系理論	原田 恒司+	大河内 豊+ 小島 健太郎+	田尾 周一郎+	中里 健一郎+ (准教授) 小林 良彦+ (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* 小林 大 (特任)	細川 律也* 小川 真治* (学振 PD) 重松 さおり* (TS)
実験核物理	森田 浩介 若狭 智嗣	寺西 高 坂口 聡志 市川 雄一 長江 大輔** (特プロ)	郷 慎太郎 西畑 洗希	鷺山 広平** (特任助教) 松本 琢磨** (特任) 佐伯 恵子 (TS)
物性理論	福田 順一	松井 淳 (講師)	藪中 俊介	
統計物理学		野村 清英		
凝縮系理論		成清 修		
磁性物理学	和田 裕文	光田 暁弘		
量子微小物性	渡部 行男		荒井 毅 (准助教)	
固体電子物性	木村 崇		山田 和正 大西 紘平	Hu Shaojie (学術研究員) Dion Troy (学振 PD) 石間 美香 (TS) 一兜 博人 (技術補佐員)
複雑物性基礎	木村 康之	稲垣 紫緒	植松 祐輝	
複雑生命物性	水野 大介		江端 宏之	
複雑流体		前多 裕介		福山 達也

基幹教育院+, 高等研究院++, RCAPP*, 超重元素研究センター**, 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3年度 各種委員一覧

部門長・専攻長・学科長： 水野

副部門長： 山本、福田

将来計画委員： ○福田、東城、野村、光田、前多、津村、[水野]

人事WG： ○福田、鈴木、若狭、木村(崇)、木村(康)、[水野]

教育課程委員： ○木村(崇)、鈴木、若狭、野村、前多、坂口、藪中、[水野]

教育支援室： ○鈴木、松井

入試委員会： ○鈴木(全ての入試関連委員会の統括)

助の会幹事： 植松、西畑(副幹事)

社会連携委員： 渡部

奨学金資格検討委員： ○木村(康)、池田、成清、市川、大西

経理委員： ○若狭、木村(康)

業績評価部会： ○木村(崇)、[水野]

就職担当： ○木村(康)、前多

成績管理： ○寺西、松井

図書委員： ○成清、東城

情報委員： ○松井、野村、寺西、山田

支線 LAN 管理者： ○松井、山田

広報委員： ○吉岡、津村、末原、坂口、市川

エントランス展示： ○寺西、前多

大学院(大学)説明会： ○光田、松井、山田

年次報告： ○池田、市川

談話会： 稲垣

教員積立会計： 東城

教員免許更新講習： ○渡部、野村

衛生管理： ○寺西、松井、荒井、福田、山田、(市川)

体験入学・入学オリエンテーション： ○前多、菅野、光田、(寺西)、(坂口)、山田、大西、
荒井、江端、森津

理学部便り編集委員： 末原

障害学生支援： ○坂口、池田、植松、[水野]

ハラスメント関連支援室： ○川越、成清、松井、西畑

なんでも相談窓口： ○松井、江端

留学生相談委員： 森津

科研費採択率向上委員： 渡部

(○は委員長)

令和3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: 低速不安定核ビームの作り方とそれを使った原子核構造研究

講師: 高峰 愛子 氏(理化学研究所 開拓研究本部 上野核分光研究室 研究員)

日時: 7月29日(木)16:30~18:00

場所: 物理講義室(W1-D414 室)

第2回物理学教室談話会

講演題目: Dynamic self-organization of migrating cells

講師: 平岩 徹也 氏(シンガポール国立大学 メカバイオロジー研究所 上級研究員)

日時: 10月5日(火)14:50~16:20

場所: Zoom によるオンライン

第3回物理学教室談話会

講演題目: 分子シミュレーションと機械学習を用いた外場応答性材料の研究

講師: 高橋 和義 氏 (産業技術総合研究所 機能材料コンピューショナルデザイン研究センター 研究員)

日時: 11月9日(火)15:00~

場所: 物理講義室(W1-D-315 室)

第4回物理学教室談話会

講演題目: 加速器の発展における国際リニアコライダー計画の意義

講師: 栗木 雅夫 氏 (広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授)

日時: 12月9日(木)16:40~18:00

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: 実空間構造によるトポロジカル状態のマルチスケール設計: 理論と応用

講師: 荻宿 俊風 氏 (物質・材料研究機構 主任研究員)

日時: 12月7日(火)16:30~18:00

場所: 物理部門会議室 (W1-A-711)

第6回 物理教室談話会

講演題目: 超伝導量子コンピューティングへの道

講師: 阿部 英介 氏 (理化学研究所 量子コンピュータ研究センター ユニットリーダー)

日時: 12月21日(火)16:30~17:30

場所:物理講義室(W1-B-211)+Zoom

第7回 物理教室談話会

講演題目: 冷却原子量シミュレーションで探る高密度物質の性質

講師: 飯田 圭 氏 (高知大学教育研究部自然科学系理工学部門 教授)

日時: 12月22日(水)16:40~18:00

場所:物理部門会議室 (W1-A-711)

第8回物理学教室談話会

講演題目: LHC 実験の近況とこれから

講師: 花垣 和則 氏(高エネルギー加速器研究機構・教授)

日時: 1月26日(水)16:30~17:30

場所:物理講義室(W1-B-211)

第9回物理学教室談話会

講演題目: 高次対称性の自発的破れと南部ゴールドストーンモード

講師: 日高 義将 氏(高エネルギー加速器研究機構・教授)

日時: 2月3日(木)16:40~18:00

場所:Zoom によるオンライン

令和3年度 物理学教室水曜談話会

世話人 稲垣 紫緒

なし。

令和3年度 非常勤講師一覧

講師	所属	題目
高峰 愛子	理化学研究所 研究開発本部	原子分光技術を使った原子核物理研究
平岩 徹也	シンガポール国立大学メカノバイオロジー研究所	生物物理と非平衡ソフトマター 生き物の中の動き
高橋 和義	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	分子シミュレーションと機械学習を用いた外場応答性材料の研究
栗木 雅夫	広島大学 大学院先進理工系科学研究所	高エネルギー加速器入門
苅宿 俊風	物質・材料研究機構	トポロジカル物質の広がり:量子固体からメタマテリアルまで
飯田 圭	高知大学 教育研究部 自然科学系理工学部門	高密度 QCD 物質の多彩な物性
阿部 英介	理化学研究所 量子コンピュータ研究センター	最先端量子計算の物理
花垣 和則	KEK 素粒子原子核研究所	ハドロンコライダー実験入門
日高 義将	KEK 素粒子原子核研究所	高次対称性入門

令和3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
DION TROY CALLLUM	イギリス	外国人特別研究員 (JSPS)	令和3年11月7日～ 令和5年11月6日	木村 崇

令和3年度 教育課程委員会活動報告

木村 崇

2021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	木村崇
時間割・シラバス	坂口
学科 FD	前多
コース分属	木村崇
中期計画	野村、木村崇
過年度担当	松井
学生実験	光田
特研配属	坂口
カリキュラム	坂口・木村崇
基幹教育科目	前多
アンケート	西畑
授業参観	木村崇
文書確認	野村、木村崇
委員長	木村崇

2021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
- ・ 学部・学府新3ポリシー(ディプロマ・カリキュラム・アドミッション)の英文化
- ・ カリキュラムマップのブラッシュアップ
- ・ 学部新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
- ・ 初年度生の出席状況に関する基幹教育院との情報共有に関する議論
- ・ 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
- ・ 他学科科目の単位認定申請に対する対応
- ・ 2022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ップメント(FD)
『ティーチング・フェロー制度の概要と講義での活用』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
- ・ 2020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スタートした。授業担当に関しては、依然、一教員のあたりの担当コマ数が多いのは事実であるが、教員の入れ替え等は、次年度以降は落ち着くと思われ、平均的な担当するになると期待している。一方で、助教の人数の減少に伴い、学生実験の運営や演習の実施が困難となりつつあり、今後、中講座で連携して対応する必要がある。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。

令和3年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

「ティーチング・フェロー制度の概要と講義での活用」

開催日時: 令和3年3月24日(木) 13:30~14:30

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・教授 木村 崇 先生

パネリスト: 大久保 勇利 氏(博士課程院生, ティーチングフェロー)

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、効果的な授業を行う上で重要なティーチングアシスタント制度の中でも、本学で導入が始まったティーチングフェロー制度(TF 制度)に関する概要と実践をテーマとした FD セミナーを開催した。TF 制度とは、学部や大学院の正課活動における教育補助において従来のティーチング・アシスタントよりも主体的な指導を行う発展的制度であり、効果的な授業計画に活用できるものと期待されている。物理学部門における将来的な TF 制度の活用を議論するため、TF 制度の概要を木村 崇教授から紹介いただき、効果的な授業手法の情報共有を行った。TF は advanced TA 資格を有し、Preparing future faculty program(PFFP)を修了した大学院生が利用できる制度であり、一部の授業の単独実施が可能という特徴がある。授業時間外でも教材原案の作成やレポート・課題の原案作成が可能であり、TF 制度を利用することで大学院生の教育実績や演習授業の効率化に貢献することが期待できる旨が述べられた。

続いて、TF 制度の実施例・担当例から実際の運用について知るため、大久保勇利さん(博士課程大学院生)に基幹教育院の授業においてティーチングフェローとして活動した内容について講演をしていただいた。PFFP 修了までに実施したグループワークで参考になる点が多く、アカデミックキャリアを目指す上で重要な学びがあったと述べられ、TF を目指す大学院生自身にもメリットがあるという点は印象に残るコメントであった。授業を円滑に行う上での TF の役割とその作業内容についても具体的な方策が示され、当研究院・当専攻の授業をより活性化する効果を共有する場となった。

令和3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)	58	52
物理学科3年次編入	2	—
修士課程(物理学専攻)	47	40
博士課程(物理学専攻)	6	7

令和3年度 就職・進学状況

就職活動全体では、インターンシップを前提とする早期選考が進みつつあり、エントリーを絞りなるべく早い内々定の取得を目指している学生が多く見受けられる。また、就職活動の形態もオンラインが主流でとなり、with-コロナの体制が進んできている。就職活動のオンライン化は九大のように首都圏や京阪神と離れた地域の学生には様々メリットがあり、今後とも就職活動のハイブリッド化が有利に働いていると考えられる。

就職先は例年通り多岐にわたっているが、昨年までは情報系の企業への就職が増えてきていたが、本年度は製造業への就職が例年になく多く、また業種も多岐にわたっている。今後とも物理学科における基礎教育の充実が就職に関しても重要なセールスポイントになるものと予想される。

修士の進路・就職

今年度の修士に関してはまず博士課程への進学が12名と最近では初めて充足率が100%を超えた。これは、フェローシップをはじめとする九大独自の学生の経済支援体制ができたために、経済的理由で博士進学を断念していた学生が希望実現できる環境が実現されたためであると考えられる。

博士課程進学者が12名、民間企業22名、公務員1名、教員2名、未定3名であった。民間企業の就職先は、日本製鉄、JFEスチール、渡辺電機工業、テルモ、サントリーホールディングス、九州電力、村田製作所、三菱重工、ソニー、マイクロメモリジャパン、九電テクノシステムズ、ネオビエント、JSOL、古川電工、ヌヴォンテクノロジージャパン、三菱電機、ソニーLSIデザインなどである。公務員は、熊本気象台、教員は筑紫台高校、致遠館高校である。

博士の進路・就職

博士課程修了者は9名であり、PD3名、大学教員1名、民間企業4名、その他1名である。

学部学生の進路・就職

修士進学者が38名、民間企業就職2名、その他1名であった。民間企業はナフコ、システナである。物理学科では学部卒での就職者が少なく、学生が意識をもって就職活動に臨む覚悟と大学からの情報提供や活動方法の指導等の支援を今後強化していく必要がある。

令和3年度 体験入学・公開講座報告

担当:前多 裕介

令和4年3月25日(金)に「第25回体験物理学」を開催するべく、令和4年1月17日～2月28日まで広く募集を行った。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なった。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。体験入学のプログラムの中ではセミナー部分を公開講座として一般向けに広く解放し、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ところ、66名の応募があった。また、一般向けの公開講座に高専生2名の申込があり、全体受講者数が約68名になった。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っている。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。

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、磁性物理学研究室)を行った。事前に参加者にはどのような点に関心があるかとアンケートで調査し、大学での物理学の学習や、研究の進め方などへの関心が伺えたため、それらの点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。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った点に惜しむ声もあった。次回開催では新型コロナウイ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25日(金)
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	「素粒子と宇宙」(東城 順治 准教授)
11:10～11:25	15分休憩
11:25～11:55	「つぶつぶのぶつり:非平衡散逸系の物理」(稲垣 紫緒 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

令和3年度 社会貢献活動報告

社会連携委員長 渡部行男

1) 高校訪問出前授業等の実施

以下各高校において、模擬講義もしくは理学部および物理学科の説明(入試状況, カリキュラム, 就職状況等)を行った。

先端科学普及事業(高校への出張講義等)

1) 西南学院高等学校

2021年 11月2日(火) 2年生 12名程度 若狭 智嗣 教授

2) 熊本県立済々黌高等学校

2021年 11月12日(金) 2年生 40名程度 植松 祐輝 助教

2) 理学部先端自然科学講演会(中等教育理科担当教員のためのリカレント教育)

新型コロナウイルス感染拡大の影響により、開催中止

3) 先端科学体験事業

体験物理学

2022年 3月25日(木)

対象: 高校1, 2年生 高専生 参加人数 約50名

対面・オンライン ハイブリット形式 前多裕介 准教授

「素粒子と宇宙」(東城 順治 准教授)

「つぶつぶのぶつり: 非平衡散逸系の物理」(稲垣 紫緒 准教授)

オンライン研究室ツアーと大学生との懇談会

4) 公開講座

2020年 3月25日(木) 現代物理学入門 オンライン体験物理学の内容

5) 2021 年度オープンキャンパス

今年度も実施方法を従来の対面型からオンラインへ変更した。

バーチャルリアリティーを用いて、講演会と研究紹介ポスター展示を対面型に近い形式で開催することを試みた。(参加者約200人)

- 学科紹介講演会:令和3年8月7日(土) 午前10時～午前11時
 - (1)物理学科および物理学コースの紹介 部門長 水野大介 教授
 - (2)情報理学コースの紹介 コース長 櫻井幸一 教授
 - (3)進路・就職について 就職担当 木村康之 教授
 - (4)研究紹介 「宇宙と重力につながる量子力学の世界」山本一博 教授
- 研究紹介ポスター展示: 令和3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3年7月22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