

物理教室年次報告書

令和1年度

2020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1年度の研究テーマと成果	
素粒子理論	2
理論核物理	21
宇宙物理理論	38
粒子系理論物理	53
実験核物理	59
素粒子実験	87
物性理論	126
統計物理学	132
凝縮系理論	137
磁性物理学	140
量子微小物性	148
固体電子物性	157
複雑物性基礎	168
複雑流体	182
客員教授	192
教職員一覧	193
各種委員一覧	194
物理学教室談話会	195
九大原子核セミナー	197
非常勤講師一覧	199
外国人研究者等受入記録	200
教育課程委員会活動報告	205
物理学部門ファカルティ・デベロップメント報告	208
入学者数と卒業者数	209
就職・進学情況	210
体験入学・公開講座報告	212
社会活動貢献報告	214

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2019年度の活動をまとめたものです。まず、物理学部門の人事に関わることとしては、4月には、宇宙物理理論研究室に山本一博教授が、固体電子物性研究室に紅秀和客員教授が着任され、10月には、実験核物理研究室に西畑洸希助教が、複雑物性基礎研究室に植松祐輝助教が着任されました。また、11月には、素粒子理論研究室に津村浩二准教授が、2月には、理論核物理研究室に池田陽一准教授が着任されました。さらに、3月には、水野大介准教授が教授に昇任され、新たな複雑生命物性研究室が発足しました。他方、7月には藤田訓裕先生が、3月には町田真美先生が退職されました（藤田先生は理化学研究所に研究員として、町田先生は国立天文台に准教授として転出されました）。

皆様の今後の活躍を願っております。

物理学部門に関連する組織に関しては、理学研究院附属超重元素研究センター（RCSHE）において、4月に特定プロジェクト教員として浅井雅人教授（日本原子力開発機構（JAEA）とのクロスアポイントメント）、長江大輔准教授が着任されました。森田浩介教授・センター長を中心に、ますますの研究成果を挙げて頂けるものと思います。

次に表彰関連では、肥山詠美子教授が「平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞」」を受賞されました。また、森田浩介教授が「2019年度日本放射化学会賞・木村賞」を受賞されています。さらに、福田順一教授が「2019年度日本液晶学会賞・論文賞」ならびに「アメリカ物理学会「Outstanding referees」」を受賞されました。高浦大雅特任助教は「第11回泉萩会奨励賞」を受賞されると共に、学生も学会等での発表で表彰を受けております。

育関連では、9月に修士1名を、3月には、学士52名（物理学科・物理学コース）、修士38名、博士4名（物理学専攻）を送り出しました。ウィズコロナ・ニューノーマルとも呼ばれる誰もが経験したことのない状況下ではありますが、物理学科・物理学専攻で学んだことを生かし、力強く新しいステージで活躍されること期待しております。

当面では、和田裕文教授・理学研究院長が次期の理学研究院長を引き続き務められますと共に、木村康之教授も執行部として理学研究院の運営にご尽力されます。大変な激務ではありますが、理学研究院全体の一層の発展のために大きな貢献をして下さるものと考えております。

2020年度の物理学部門長は、着任早々ですが山本一博教授にお願いすることになりました。コロナ禍の厳しい状況下ではありますが、山本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 若狭智嗣

素粒子理論

研究室構成員

鈴木博 教授

津村浩二 准教授

《 博士研究員 》

高浦大雅 (学術研究員・特任助教) 山津直樹 (学術研究員・特任助教) 奥村
健一 (学術研究員・先端素粒子物理研究センター特任助教)

《 大学院 博士課程 》

森川億人

《 大学院 修士課程 》

石川航輔 柴田和哉 中山聖 芦江誠大

竹内健悟

《 学部 卒業研究生 》

塚原壮平 肥田宗一郎 坂栗佳奈 清水光太郎

宮川侑樹

《 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)、物理学ゼミナール (鈴木博・津村浩二)、物理学特別研究 I・II (鈴木博)、場の量子論 (鈴木博)、M1 ゼミナール (鈴木博)

研究・教育目標と成果

S^1 コンパクト化された時空間での赤外リノマロンに関する一連の研究 (鈴木博・高浦大雅・森川億人・石川航輔・柴田和哉・中山聖・芦江誠大・竹内健悟)

素粒子を記述する場の量子論において、摂動論は基本的に重要な近似法である。また、カイラルゲージ理論である素粒子標準模型が現時点では摂動論によってのみ定義されているという深い問題も存在し、摂動論は単なる近似法に留まらない可能性もある。従って、摂動論と非摂動論的效果の境界・相互の関係を研究することには大きな

関心が持たれる。

一般に量子力学や場の量子論の摂動級数は発散級数であり、その単純な和は発散すると考えられている。電弱相互作用のように結合定数が小さい場合には、摂動級数は漸近級数としてよい近似を与えるが、その近似値には（発散級数であるがために）限界がある。強い相互作用では、結合定数が大きいためこの限界はより深刻である。漸近級数から有限の和を得る代表的な方法としてボレル和の方法があり、単純な量子系など十分に幸運な場合には、このボレル和が摂動展開する前の元の関数値に一致することが証明できる。従って一般の場の量子論の摂動級数にもこのボレル和の方法を適用してみることは自然である。この時、摂動級数が定符号級数であると、ボレル和を定義するボレル積分の被積分関数が積分経路上に特異点（ボレル特異点）を持ち、ボレル和の処方箋が一意的な値を与えない。特異点を積分経路がどう避けるかによって、値が不定性を持つのである。元々の物理系が健全なものであれば、物理量が不定性を持つことはありえず、摂動級数のボレル特異点は、何らかの非摂動論的效果によって打ち消されると考えられる。この、物理量は本来不定性を持たないはず、という考えから、摂動論の情報から非摂動論的效果の情報を引き出す方法論はリサージェンスと呼ばれ、近年活発に研究されている。

場の量子論の摂動論がボレル特異点を持つ原因としては、摂動の次数 k に対して、(i) ファインマンダイアグラムの数が $k!$ で爆発的に増える場合と (ii) 単一のファインマンダイアグラムの値が $k!$ で大きくなる場合（これをリノマロンと呼ぶ）、の二つが知られている。前者のファインマンダイアグラムの数の爆発に起因するボレル特異点は、いわゆるインスタントンと呼ばれる半古典的配位の非摂動論的效果で打ち消されると考えられている。一方、リノマロンが作るボレル特異点が何で相殺されるかはよく分かっていない。

近年、リサージェンスの文脈で、Argyres–Ünsal、また、Dunne–Ünsal によって、リノマロンはバイオンと呼ばれる半古典的配位の効果で打ち消されるという大胆な予想がなされた。ここで、バイオンとは分数トポロジカル電荷を持ったインスタントンの複合系で、この解を考えるには理論を S^1 コンパクト化する必要がある。この予想は、もし本当であれば、リノマロンの本質の理解に極めて面白い可能性を与える。

この予想に関して、Anber–Sulejmanpasic は、QCD(adj.) という理論を $\mathbb{R}^3 \times S^1$ にコンパクト化した理論にはリノマロンが存在しないことを示し、上の予想に反論を与えた。一方、藤森ら慶応大学のグループは、超対称 CP^{N-1} 理論を $\mathbb{R} \times S^1$ で考え、真空エネルギーへのバイオンの寄与が、 \mathbb{R}^2 でのリノマロンの寄与に対応していることを示し、上の予想を支持する結果を得た。

こうした混沌とした状況のもとで何らかの統一的理解を得るべく、今年度我々はこの問題に精力的に取り組み、4本の論文を発表した。そこで述べられた結果は以下のも

のである。(i) $\mathbb{R} \times S^1$ 上の超対称 CP^{N-1} 理論におけるグルーオン凝縮をいわゆるラージ N 近似で計算し、そこに現れるリノマロンの作るボレル特異点の位置が、 S^1 コンパクト化する前の \mathbb{R}^2 でのものからずれることを見いだした。(ii) ある種の仮定のもとで、この S^1 コンパクト化 $\mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^{d-1} \times S^1$ のもとでのボレル特異点のずれは、一般的な現象であることを示した。(iii) $\mathbb{R}^3 \times S^1$ 上の QCD(adj.) を、ラージ β_0 近似とラージ N 近似を組み合わせた近似で考え、この場合には、リノマロンの作るボレル特異点の位置が、 S^1 コンパクト化する前の \mathbb{R}^4 でのものと等しいことを見いだした。(この例では(ii)での仮定が壊れている。)(iv) $\mathbb{R} \times S^1$ 上の超対称 CP^{N-1} 理論の真空エネルギーを、ラージ N の next-to-leading までで計算した。結果として、この物理量を非摂動論的效果まで含めて不定性なく計算することに成功したが、一方で、それは well-defined な摂動展開を持っていないことを見いだした。これはこの物理量に対してリノマロンを考えること自体が不可能であることを意味する。

このように、当初の狙いとは異なり、我々の一連の解析はバイオンとリノマロンに関する上記の予想に対する統一的理解につながらなかった。しかし、ここで得られた数々の観察は、リノマロンやバイオンが関わる非摂動論的效果の理解に今後重要になると考えている。実際、森川-高浦はごく最近、バイオンとリノマロンにまつわる混乱を解消する論文を発表したが、この論文はここでの研究結果から大きな示唆を得ていると考えられる。

有限温度 $N_f = 2 + 1$ QCD に対する数値シミュレーション (鈴木博)

(これは WHOT-QCD Collaboration との共同研究である。)

WHOT-QCD Collaboration では、2016 年ごろよりいわゆるグラディエントフローの手法を用いて有限温度量子色力学 (QCD) における各種物理量 (状態方程式、カイラル凝縮、カイラル感受率、トポロジカル感受率など) の決定を進めている。しかし、QCD の数値シミュレーションは単一のパラメターの組に対してスーパーコンピュータで数ヶ月から数年オーダーの計算量を必要とするため、物理点クォーク質量の場合に対して連続極限を取るという最終目標の達成にはまだまだ遠いのが現状である。ここでは、その目標の達成に向けて、以前より進めている物理点クォークの $a \simeq 0.07 \text{ fm}$ の場合に対して時間方向の格子数が $N_t = 18$ の場合 (これは温度にすると擬相転移点付近の 122 MeV に対応する) でのゲージ場の配位の生成を進めた。この数値計算は、九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータシステム ITO を利用して行った。

初期位相印加による原子ニュートリノ過程の QED 背景事象の抑制 (津村浩二)

(これは田中実氏、笹尾登氏、植竹智氏、吉村太彦氏との共同研究である。)

ニュートリノの微小質量を精密に測るためのアイデアとして、光子を伴うニュートリノ

ノ対放射による原子の脱励起を使う方法が提唱されている。原子の脱励起という超低エネルギー現象を見ることで微小質量への感度があると期待されている。原子からのニュートリノ対放射の反応率は非常に小さいが、これはマクロコヒーレンス機構を用いて増幅できる可能性がある。しかしながら、この増幅機構は背景事象となる複数の光子を放出する過程にも共通であり、この解決が重要課題となっている。本研究では、この背景事象を制御するために原子系に初期位相を印加する方法を提唱した。主要な背景事象である3光子過程は一般に連続スペクトルを持つが、本論文のアイデアを使えば実験精度の範囲内で単色の光子を放出する過程となる。ブラッグファイバを用いると光もバンドギャップを持つことが知られており、単色の光が禁制帯に入ることによって背景事象が原理的に起こらなくなる。これによって、ニュートリノ対に伴う光子が背景事象から選別可能になる。

くりこみ可能な擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質模型 (津村浩二)

(これは阿部慶彦氏、藤間崇氏との共同研究である。)

暗黒物質の直接測定実験により暗黒物質と核子の散乱断面積に非常に強い制限がつけられるようになった。これまでによく研究されている弱く相互作用する暗黒物質(通称WIMP)ではこの制限を避けるのが難しくなっている。そこでこの制限を自然にかわすことのできる擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質が注目されている。この模型では暗黒物質は微分相互作用のみを持つため、低エネルギーの核子との散乱断面積は自動的に小さくなる。このような暗黒物質は、基本となるアイデアは提唱されたものの理論的な整合性を保った模型が構築されてこなかった。本研究では、擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質をくりこみ可能な模型に埋め込むことに成功した。これにより理論は精度良く計算できるようになり、また模型の典型的な特徴として暗黒物質が崩壊することが分かった。したがって、暗黒物質の寿命に注目して新しい制限をつけることに成功した。

暗黒物質を含む漸近安全な重力シナリオの低エネルギー予言 (津村浩二)

(これは濱田佑氏、山田雅俊氏との共同研究である。)

実験で測定されたヒッグスボソンの質量からプランクスケールにおけるヒッグス場の4点結合を計算してみるとゼロに近い値が得られることが分かっている。このことからヒッグスボソンの質量についての自然さ問題がこれまでに予想された方法とは異なる方法で制御されるという可能性が注目を集めている。そのようなシナリオの一つとして漸近安全な重力シナリオがある。このシナリオでは、プランクスケールでスカラー場の4点結合と質量パラメタがゼロになることが要求される。このような超高エネルギーで実現される強い境界条件から低エネルギーの現象やパラメタを予言できないだ

ろうか?というのが本研究のアイデアである。具体的には漸近安全な重力シナリオを実現するための最小シナリオとして新たなゲージ相互作用と新フェルミオンを導入してモデルを構築した。新しい自由度であるフェルミオンは暗黒物質として同定することで、暗黒物質の質量や相互作用の強さが完全に決まるモデルが完成した。これによって超高エネルギーのシナリオが低エネルギー現象から決定 (or 排除) できる。

超対称性の破れのモジュライ媒介に関する研究 (奥村健一)

超対称性理論は標準模型を超える物理の有力な候補であり、LHCにおいて超対称性粒子の探索が進んでいる。そうした超対称性粒子の質量スペクトラムは超対称性の破れの媒介機構により決まるため、その解明が望まれる。中でもモジュライ媒介は4次元にコンパクト化された超弦理論に内在する媒介機構として知られている。モジュライ媒介は超対称性の破れの媒介機構において問題となるCP対称性やフレーバー物理から来る強い制限を自然に満たすことができるため、古くから研究されてきた。本年度はこのモジュライ媒介機構における超対称性を破るパラメータの繰り込み群による発展について研究を行った。

超対称性理論において超対称性を保つ質量は超ポテンシャルによって与えられ、モデル構築においては手で自由に選ぶ事ができるパラメータとして扱われる。しかし超弦理論においては、質量次元を持つパラメータは超弦の張力のみであり、そこから決まる超弦スケールと階層的に異なる大きさの質量を理論に持ち込む事は自明ではない。そうした中間スケールの質量を生み出す手法の一つが、ゲージノ凝縮やインスタントンをはじめとする非摂動効果である。こうした非摂動効果が超対称性の破れを媒介するモジュライ場によって生じている場合、それにより質量を獲得した場による繰り込み群の補正はある一般的な条件の下でそれらを積分した際の敷居補正により相殺されることを明らかにした。

この効果は現象論的にも重要な意味を持っている。例えばニュートリノ質量の起源としてシーソー機構が良く知られている。モジュライ媒介を含む重力媒介ではシーソー機構に必要な右巻きニュートリノの繰り込み群の効果によりスレプトン質量にレプトンフレーバーを破る補正が生じる。これにより低エネルギーで $\mu \rightarrow e, \gamma$ や $\mu - e$ 転換などの現象が生じるため、様々な検証実験が計画されている。しかし、モジュライ媒介において右巻きニュートリノの質量がここで述べた様な非摂動効果により生じていれば、その様な過程は強く抑制される。

LHC実験の結果により、超対称標準模型の電弱対称性の破れは一般に0.1%程度以上の微調整が要求され、問題となっている。本年度はモジュライ媒介においてこうした微調整を回避できるモデルの構築も試み、現在も研究が進行中である。

Static QCD ポテンシャルにおけるリノーマロンの構造 (高浦大雅)

(これは隅野行成氏との共同研究である。) Static QCD ポテンシャルは重いクォークのダイナミクスの記述に理解が不可欠な量である。また近年ではクォーク質量や強結合定数の精密決定の文脈でも重要な役割を果たしており、static QCD ポテンシャルの計算精度は重要な鍵を握る。

Static QCD ポテンシャルは摂動論によって理論計算できるが、摂動級数は一般にリノーマロンと呼ばれる特定の発散的振る舞いを持ち、そのため摂動論に基づく予言にはその精度に限界がある。このような発散的振る舞いは摂動級数に対する Borel 変換 (摂動係数の生成関数) の特異点により特徴付けられ、この物理量では Borel u -平面に $u = 1/2$ と $3/2$ の特異点があると考えられている。これらの特異点により摂動計算には深刻な精度限界が誘発される。これらの摂動論における誤差は演算子積展開 (OPE) を用いることで克服できると考えられているが、この目的のためにはまずリノーマロンによる誤差の詳細な性質を明らかにすることが必要である。

$u = 1/2$ のリノーマロンの構造は古くから議論されており一定の理解が得られているが今回現代的な effective field theory の観点からこの問題を捉え直した。そして $u = 3/2$ のリノーマロンに対しては今回初めて定量的な性質を明らかにした。また static QCD ポテンシャルに対するリノーマロン誤差は運動量空間においては空間座標のそれよりも小さいものと考えられている。今回我々は初めてこれを明示的・定量的に示すことができた。これらの成果は今後の精密な理論計算のための重要な知見となる。

S^1 コンパクト化された時空でのリサージェンス構造 (高浦大雅・森川億人)

「 S^1 コンパクト化された時空間での赤外リノマロンに関する一連の研究」で詳述されたように場の理論の基本的な解析手法である摂動論ではその予言に非物理的な不定性が現れると考えられており、その原因としてファイマンダイアグラムの数の増大 (proliferation of Feynman diagrams: PFD) とリノマロンによるものがある。そしてこれらの不定性は非摂動的な計算に現れる不定性と相殺されると考えられている。特に近年 Ünsal らによって、 S^1 コンパクト化された時空に現れるバイオンと呼ばれる古典解に付随する非摂動的な不定性がリノマロンと相殺すると予想された。この予想に関連して活発な議論が行われてきたが、リノマロンとの相殺については上述のように否定的な結果が複数報告されている。これにより S^1 コンパクト化された時空に存在するバイオンによる不定性が一体摂動論のどのような不定性と相殺するのかについて混沌とした状況となっていた。

我々は、バイオンの不定性はオリジナルの予想に反し PFD による摂動論の不定性と相殺することを明らかにした。この可能性は Anber-Sulejmanpasic によって言及された

が、この時点では論理的可能性というレベルに留り、一見釣り合わない両者が真に対応するかは疑問であった。我々は摂動論の赤外での構造が S^1 コンパクト化の下で変更を受け、PFD による不定性がコンパクト化前に比べてファクター N (N は理論のダイナミカルな自由度を表すパラメータ) だけ増大することを明らかにした。この不定性はバイオンの不定性と同様であり、バイオンと相殺する摂動論の不定性を特定したことになる。また上記の N によるエンハンスメントはバイオンの解析が妥当な領域でのみ起こることを議論し、このメカニズムの妥当性、整合性を示した。この研究成果は一連の混乱に終止符を打つものと考えている。

対称性の正則および特殊部分群への対称性の破れの研究 (山津直樹)

(これは主に九後汰一郎氏との共同研究である。)

素粒子標準理論におけるゲージ対称性を統一する大統一理論はゲージボソン (光子, ウィークボソン, グルーオン), フェルミオン (クォークやレプトン) などでローレンツ群の同一のスピンの持つ場を統一することができる理論であり, 提唱されて以来標準理論を越える統一理論として様々な形で研究されている。近年大統一理論に関して, ゲージ対称性の特殊部分群と呼ばれる通常考えられている正則部分群ではない対称性の破れを用いた大統一理論 “特殊大統一理論” を提唱した。この理論の解析により対称性とその対称性の破れの理解が不足していることが判明した。今後素粒子標準理論を越える統一理論を構築する上で対称性の正則部分群および特殊部分群への破れの一般構造を理解することが必要と考えられる。

場の量子論における対称性の正則及び特殊 (正則でない) 部分群への破れの構造を明らかにするために, 特に, その試みの第一歩として場の量子論における取扱いが非常に良く調べられている四次元での南部-ヨナ=ラシニオ有効模型 (NJL) 有効模型を用いて対称性の破れの一般的な構造を調べ, 今後より複雑な四次元でのヒッグス機構や高次元理論での対称性の破れの機構を理解につなげる。NJL 有効模型の先行研究として, 九後汰一郎氏と佐藤丈氏による例外群 E_6 27 複素表現のフェルミオン対凝縮による E_6 対称性の特殊部分群 $F_4, SU(3), USp(8), G_2$ への破れが知られている。

今年度はまず四次元での NJL 有効模型を用いた特殊ユニタリ群 $SU(N)$ の定義表現と二階反対称テンソル表現のフェルミオン対凝縮による力学的対称性の破れの構造を調べた。この結果として $SU(N)$ 対称性は特別な N の値を除いて $SU(N)$ の特殊部分群である特殊直行群 $SO(N)$ やシンプレクティック群 $USp(2[N/2])$ への破れが起こることが判明した。特に, 特殊大統一理論で考えられている $SU(16)$ 対称性の $SO(10)$ 対称性への破れが真空中で実現されうることを示した。次に, $SO(N)$ のスピノル表現のフェルミオン対凝縮による力学的対称性の破れの構造を調べた。 $SO(N)$ 群のスピノル表現を調べた理由は, スピノル表現が N により表現の複素, 実, 擬実性に変化すること, ま

た、標準理論を越える大統一理論として典型的に議論される群の一つである $SO(10)$ 群での対称性の破れの構造を調べるためである。解析結果からリー群の正則または特殊部分群への破れは表現の複素、実、擬実性と相関が見られることが判明した。具体的には、複素表現の場合は特殊部分群への対称性の破れが実現され、一方、実・擬実表現の場合は主に正則部分群への破れが実現されている。

ゲージ・ヒッグス統一理論の研究 (山津直樹)

(これは主に舩津周一郎氏、細谷裕氏、幡中久樹氏、折笠雄太氏との共同研究である。)

素粒子標準理論を越える統一理論として高次元時空の枠組みで四次元ローレンツ群の異なるスピンを持つゲージボソンとヒッグスボソンを統一するゲージ・ヒッグス統一理論の研究が行われている。この理論は四次元時空以外のコンパクト化された余剰次元空間を持ち、ヒッグスボソンは高次元のゲージボソンの余剰次元成分として統一される。従来ゲージ・ヒッグス統一理論において現実的なモデルとしては $SU(3) \times SO(5) \times U(1)$ に基づくゲージ・ヒッグス電弱統一理論が知られていた。この理論では欧州原子核研究機構 (CERN) での大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) や将来の加速器実験計画である国際線形加速器実験 (ILC) での現象論的解析が行われており、この理論や他の標準理論を越えるモデルでもしばしば予言される Z' ボソン (対称性の破れにより質量を得た電気的中性のゲージボソン) や W' ボソン (対称性の破れにより質量を得た荷電ゲージボソン) によるフェルミオン対の終状態への散乱断面積への影響や、ヒッグスボソンの性質はほぼ標準理論のヒッグスボソンと同一であるが、若干の結合定数の差があり、高精度での検証可能性が議論されている。一方、標準理論のフェルミオンであるクォークとレプトンの統一は標準理論と同様に全く統一されていない。そのため、近年ゲージ・ヒッグス統一理論のゲージ対称性を統一する $SO(11)$ ゲージ対称性に基づく“ゲージ・ヒッグス大統一理論”を提唱した。

今年度はまず $SO(11)$ ゲージ・ヒッグス大統一理論の低エネルギー有効理論とみなせる $SU(3) \times SO(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統一モデルを構成した。その際に、クォークとレプトンの質量スペクトルや有効ポテンシャル電弱対称性の破れの詳細解析を行った。その後、ナイーブにはゲージ・ヒッグス統一理論においてヒッグスボソンが高次元のゲージボソンであるという性質からクォークの世代混合として知られるキャビボ-小林-益川行列は実現できないように思われるが、ブレーン上に高次元場の局在化した相互作用のラグランジアンが存在すれば場合には世代混合が実現されるということが知られている。現実的な世代混合が実現される場合に電弱対称性を拡張した理論において問題となる可能性があることは Z ボソンや Z' ボソンなどに伴い生じるフレーバーを変える中性カレントが大きく現れうることである。このゲージ・ヒッグス統一モデルにおける解析結果としては現状の実験では無視できる小さな効果しかないことが判明し

た。今後このゲージ・ヒッグス統一模型の加速器実験 (ILC や LHC) などでの実験的検証可能性を議論する計画である。

$\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg 模型の数値的解析における連続極限 (森川億人)

2次元 $\mathcal{N} = 2$ Wess–Zumino 模型は低エネルギー極限において超共形場理論を与えると信じられている。このように低エネルギーの固定点上で非自明な共形場理論を実現する場の理論を Landau–Ginzburg 模型と呼ぶ。ところが、Wess–Zumino 模型は低エネルギーで強結合であるためにその計算は困難であり、非摂動的な手法が必要である。これまで、加堂と鈴木によって提案された超対称性を保つ数値計算手法に基づき、様々な超ポテンシャルの場合についてこの予想を数値シミュレーションによって検証してきた。本研究では、これまで実行されていなかった連続極限に注目し、有限サイズスケールリングに基づいた連続極限外挿の手法を考案した。特に、最も単純な3次ポテンシャルの場合に数値シミュレーションを行い、スケール次元の精密測定により上記の予想を検証した。また、この結果は、この手法の問題点である非局所性について、連続極限における局所性の回復を示唆している。この数値計算は九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータシステム ITO を利用したものである。

発表論文

《 原著論文 》

Renormalon-free definition of the gluon condensate within the large- β_0 approximation:
Hirosi Suzuki and Hiromasa Takaura,
Progress of Theoretical and Experimental Physics (2019), 103B04
[arXiv:1807.10064 [hep-ph]]

Continuum limit in numerical simulations of the $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg model:
Okuto Morikawa,
Progress of Theoretical and Experimental Physics (2019), 103B03
[arXiv:1906.00653 [hep-lat]]

Infrared renormalon in the supersymmetric CP^{N-1} model on $\mathbb{R} \times S^1$:
Kosuke Ishikawa, Okuto Morikawa, Akira Nakayama, Kazuya Shibata, Hirosi Suzuki,
Hiromasa Takaura,

Progress of Theoretical and Experimental Physics (2020), 023B10
[arXiv:1908.00373 [hep-th]]

CKM Matrix and FCNC Suppression in $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ Gauge-Higgs Unification:
Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,
Physical Review D101, 055016 (2020)
[arXiv:1909.00190 [hep-ph]]

Infrared renormalon in $SU(N)$ QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$:
Masahiro Ashie, Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki, Hiromasa Takaura, Kengo Takeuchi,
Progress of Theoretical and Experimental Physics (2020), 023B01
[arXiv:1909.05489 [hep-th]]

Renormalon structure in compactified spacetime:
Kosuke Ishikawa, Okuto Morikawa, Kazuya Shibata, Hiroshi Suzuki, Hiromasa Takaura,
Progress of Theoretical and Experimental Physics (2020), 013B01
[arXiv:1909.09579 [hep-th]]

Hide and Seek with Massive Fields in Modulus Mediation:
Ken-ichi Okumura,
Phys. Rev. Lett. **123** (2019) no.15, 151801 doi:10.1103/PhysRevLett.123.151801
[arXiv:1909.13804 [hep-ph]]

Dynamical Breaking to Special or Regular Subgroups in the $SO(N)$ Nambu–Jona-
Lasinio Model :
Taichiro Kugo, Naoki Yamatsu,
Progress of Theoretical and Experimental Physics (2020), 023B09
[arXiv:1911.09834 [hep-ph]]

QED background against atomic neutrino process with initial spatial phase:
Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Motohiko Yoshimura,
European Physical Journal Plus, 135, 283 (2020)
[arXiv:1912.02475[hep-ph]]

On renormalons of static QCD potential at $u = 1/2$ and $3/2$:

Yukinari Sumino, Hiromasa Takaura,
JHEP 05 (2020) 116
[arXiv:2001.00770 [hep-ph]]

Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter from gauged $U(1)_{B-L}$ symmetry:
Yoshihiko Abe, Takashi Toma, Koji Tsumura,
Journal of High Energy Physics 05 (2020) 057
[arXiv:2001.03954[hep-ph]]

Vacuum energy of the supersymmetric CP^{N-1} model on $\mathbb{R} \times S^1$ in the $1/N$ expansion:
Kosuke Ishikawa, Okuto Morikawa, Kazuya Shibata, Hiroshi Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics (2020), 063B02
[arXiv:2001.07302 [hep-th]]

Scalegenesis and fermionic dark matters in the flatland scenario:
Yu Hamada, Koji Tsumura, Masatoshi Yamada,
European Physical Journal C 80 (2020) 368
[arXiv:2002.03666[hep-ph]]

Identification of perturbative ambiguity canceled against bion:
Okuto Morikawa, Hiromasa Takaura,
[arXiv:2003.04759[hep-th]], to appear in Physics Letters B

《Proceedings》

α_s determination from static QCD potential with renormalon subtraction:

Hiromasa Takaura,
PoS ALPHAS2019 (2019) 026

Numerical study of ADE-type $\mathcal{N} = 2$ Landau-Ginzburg models:

Okuto Morikawa,
PoS LATTICE2019 (2020) 145
[arXiv:1908.03411 [hep-lat]]

Study of $2 + 1$ flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow:

Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Asobu Suzuki, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hi-

roshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda,
PoS LATTICE2019 (2019) 088
[arXiv:1910.13036 [hep-lat]]

Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow:
Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hi-
roshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda,
[arXiv:2001.01524 [hep-lat]]

《その他の論文》

グラディエントフロー—エネルギー運動量テンソルへの応用を中心として—:
鈴木博,
原子核研究, 2019年9月 64(1) 52–64

The Effective Potential and Universality in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification:
Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, and Naoki Ya-
matsu,
[arXiv:2002.09262 [hep-ph]]

著書

特集・経路積分を考える—量子力学の姿を探る—「量子アノマリーと経路積分」:
鈴木博,
数理科学, 2019年2月号

講演

《海外での講演》

Modulus mediation and lepton flavor violation in supersymmetric seesaw:
Ken-ichi Okumura,
Poster session at The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Viola-
tion, 17-19 June 2019, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan.
Numerical study of ADE-type $\mathcal{N} = 2$ Landau-Ginzburg models:
Okuto Morikawa,

parallel talk at The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2019)、2019年6月23日、Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China

Application of the gradient flow to the energy-momentum tensor:

Hiroshi Suzuki,

invited talk at the international workshop, Advances in Lattice Gauge Theory 2019、2019年8月6日、CERN, Geneva, Switzerland

Hide and seek with massive fields in modulus mediation:

Ken-ichi Okumura,

NCTS Annual Theory Meeting 2019, 12-14 December 2019, Hsinchu, Taiwan.

《国内での講演》

Gradient flow and the EMT on the lattice:

Hiroshi Suzuki,

Invited talk at the international workshop, Frontiers in Lattice QCD and related topics、2019年4月18日、京都大学基礎物理学研究所

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction

高浦大雅

セミナー講演、2019年7月4日、広島大学

QCDにおけるリノーマロン克服のためのアプローチ

高浦大雅

基研研究会「素粒子物理学の進展 2019」、2019年7月29日、京都大学基礎物理学研究所

Approach to overcoming renormalon in QCD

Hiromasa Takaura

The 26th Meeting of the New Higgs Working Group, 2019年8月8日、大阪大学

リノーマロン誤差を持たないグルーオン凝縮の定義

高浦大雅

日本物理学会 2019年秋季大会、2019年9月17日、山形大学

N=2 Landau-Ginzburg 模型におけるスケーリング次元の連続極限と精密測定:

森川億人

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月 18 日、山形大学

Modulus mediation and lepton flavor violation in spuersymmetric seesaw:

奥村 健一

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月 17 日、山形大学.

Hide and seek with massive fields in modulus mediation:

奥村 健一

素粒子現象論研究会 2019、2019 年 11 月 25 日、大阪市立大学.

ニュートリノ質量分光の実現に向けて

津村浩二

九州大学素粒子論セミナー、2019 年 11 月 29 日、九州大学

Infrared renormalon in $SU(N)$ QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$ (I):

芦江誠大

第 125 回日本物理学会九州支部例会、2019 年 11 月 30 日、佐賀大学

Infrared renormalon in $SU(N)$ QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$ (II)

竹内健悟

第 125 回日本物理学会九州支部例会、2019 年 11 月 30 日、佐賀大学

IR renormalon in a compactified spacetime: the case of the QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$:

Hiroshi Suzuki,

Invited talk at the KEK Theory workshop 2019、2019 年 12 月 4 日、高エネルギー加速器研究機構

Renormalon in compactified spacetime and relation with bion

Hiromasa Takaura

KEK Theory workshop 2019, 2019 年 12 月 4 日、高エネルギー加速器研究機構

Infrared renormalon in the supersymmetric CP^{N-1} model on $\mathbb{R} \times S^1$:

Okuto Morikawa,

ポスター発表、KEK Theory Workshop 2019、2019年12月5日、高エネルギー加速器
研究機構

Is Symmetry Breaking into Special Subgroup Special?

山津直樹

九州大学素粒子論セミナー, 2019年12月13日, 九州大学

Can bion cancel renormalon?

Hiromasa Takaura

セミナー講演、2019年12月19日、東北大学

Infrared renormalon in SU(N) QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$

高浦大雅

「理研-九大ワークショップ—素粒子・原子核から宇宙へ—」、2019年12月23日、九
州大学

Infrared renormalon in the CP^{N-1} model on $R \times S^1$:

森川億人

理研-九大ジョイントワークショップ「数理が紡ぐ素粒子・原子核・宇宙」、2019年12
月23日、九州大学

Is Symmetry Breaking into Special Subgroup Special?

山津直樹

理研 iTHEMS-九大ジョイントワークショップ, 2019年12月23日, 九州大学

Vacuum energy of the SUSY CP^{N-1} model on $\mathbb{R} \times S^1$:

Okuto Morikawa,

The CP^N model: recent developments and future directions、2020年1月23日、慶
応大学

Infrared renormalons in the CP^N model on $\mathbb{R} \times S^1$ Hiromasa Takaura

CP^N model: recent developments and future directions, 2020年1月23日、慶應大学

Hide and seek with massive fields in modulus mediation:

奥村 健一

Invited talk at Particle Physics and Cosmology 2020, 27-30 January 2020, Aoshima Grand Hotel.

$R \times S^1$ 上の CP^{N-1} 模型における IR リノーマロン:

森川億人

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月 16 日

Updated and Expanded Version of “Finite-Dimensional Lie Algebras and Their Representations for Unified Model Building”

山津直樹

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月 19 日、名古屋大学 (東山キャンパス)

$\mathbb{R}^3 \times S^1$ 上における $SU(N)$ QCD(adj.) の IR リノーマロン

高浦大雅

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月

Double the Supersymmetric Standard Model:

奥村 健一

日本物理学会第 75 回年次大会、2019 年 3 月 24 日、名古屋大学

The Origin of Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter:

Koji Tsumura,

Invited talk at RIS-TCS 2020 -Frontier of Physics and Chemistry-, 2020 年 3 月 20-22 日、琉球大学

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 B (一般)

格子場の理論における時空対称性の実現

研究代表者：鈴木博

科学研究費補助金、新学術領域 (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（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(京都大)]

科学研究費補助金、若手

摂動 QCD を超える予言へ向けた理論的定式化

研究代表者：高浦大雅

学術研究助成基金助成金、研究活動スタート支援

対称性の正則および特殊部分群への力学的破れの解明

研究代表者：山津直樹

科学研究費補助金、特別研究員補助費

場の理論と超弦理論に対する非摂動論的アプローチ

研究代表者：森川億人

《 文部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)

森川億人、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

他大学での研究と教育

鈴木博：2019年7月1日-3日、北京大学における Summer School、“Frontiers in Lattice QCD”において、“Gradient Flow”として集中講義を行った。

奥村健一：2019年7月1日-3日、金沢大学において大学院集中講義「超対称標準模型入門」を行った。

鈴木博：2019年11月6日-8日、東北大学において大学院集中講義「グラディエントフローの基礎とその応用」を行った。

学部4年生卒業研究

塚原壮平：(指導教員、鈴木博)：ゲージ場の量子論（素粒子標準模型の構成）
肥田宗一郎：(指導教員、鈴木博)：ゲージ場の量子論（素粒子標準模型の構成）
坂栗佳奈：(指導教員、鈴木博)：ゲージ場の量子論（素粒子標準模型の構成）
清水光太郎：(指導教員、鈴木博)：ゲージ場の量子論（素粒子標準模型の構成）
宮川侑樹：(指導教員、鈴木博)：ゲージ場の量子論（素粒子標準模型の構成）

修士論文

柴田和弥：(指導教員、鈴木博)：一般次元における S^1 コンパクト化のリノーマロンへの影響
石川航輔：(指導教員、鈴木博)： $\mathbb{R} \times S^1$ 上の超対称 CP^{N-1} 模型における真空エネルギーの計算
中山聖：(指導教員、鈴木博)：Renormalons in the supersymmetric CP^{N-1} sigma model on a two-dimensional compactified spacetime

博士論文

学外での学会活動

鈴木博：
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
ポスト「京」重点課題9諮問委員会委員
京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員
素粒子メダル奨励賞選考委員
第13回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞選考委員長
Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

その他の活動と成果

鈴木博：
「ウィルソンフェルミオンに基づいた有限温度量子色力学の研究」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

鈴木博：

「有限温度量子色力学のダイナミクス」が、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 公募型共同研究 (九州大学情報基盤研究開発センター) に採択

理論核物理

研究室構成員

肥山 詠美子 教授

池田 陽一 准教授

松本 琢磨 助教

富樫 甫 特任助教

《 大学院 博士課程 》

開田 丈寛 小川 翔也

《 大学院 修士課程 》

青木 宏平 大野 晃 徳永 航 金 龍熙

宮本 亮祐 山本 拓実 戴 健為

《 学部 卒業研究生 》

坂井原 浩輝 李 東ウク

担当授業

物理学特別講義 1 (肥山詠美子), 物理学入門 I (肥山詠美子), 量子力学 I・同演習 (肥山詠美子・松本琢磨), 物理学総合演習 (肥山詠美子), 物理数学演習 (松本琢磨), 物理学特別研究 I (肥山詠美子・松本琢磨), 物理学特別研究 II (肥山詠美子・松本琢磨)

研究・教育目標と成果

少数多体系問題の観点からのエキゾチックハドロンシステム・中性子過剰原子核・ハイパー核構造の研究/教育 (肥山詠美子)

第一原理計算によるハイペロン—核子間相互作用が提案され、その相互作用を用いて、軽いハイパー核の 3 体、4 体系問題を解いた。特に $NN\Xi, NNN\Xi$ の構造計算により、 Ξ ハイパー核の中で、軽い最も束縛するハイパー核は、4 体系であることを示した。この研究は、Physical Review Letter に掲載され、また、プレスリリースを行った。

NNA の共鳴状態の三体構造の研究

(宮本亮祐 (M1)、肥山詠美子)

2013 年に GSI の実験によって $nn\Lambda$ の三体系に束縛状態が存在すると報告された。そ

の実験を受けて、Garcilazo や Hiyama らによって実験データを再現するかどうか様々な計算法で三体計算が行われた。その結果、 $nn\Lambda$ の束縛状態を理論的に求めることはできなかった。また最近では、Gibson らは Faddeev 計算によって $nn\Lambda$ は共鳴状態として存在する可能性を指摘している。なお、JLAB において ${}^3\text{H}(e, e'K^+)nn\Lambda$ の実験が 2018 年に実施され、現在解析中である。

このような状況下で、本研究では $nn\Lambda$ の三体系の束縛状態がないことを確認した上で、共鳴状態の有無を調べる。共鳴状態を調べるために複素座標回転法を用いて計算を行っている。現在は中心力のみポテンシャルを用いて研究を進めており、今後必要に応じて、より現実的なポテンシャルに変更していく予定である。

$NN\Omega$ の構造研究

(山本拓実 (M1)、肥山詠美子)

近年、HAL QCD Collaboration が核子 N とストレンジクォーク 3 つからなる Ω 粒子の間の相互作用を提出した (T. Iritani *et al.* (HAL QCD Collaboration), arXiv:1810.03416 (2019))。その $N\Omega$ 相互作用を用いて、Garcilazo が $NN\Omega$ の三体構造の計算を行った (H. Garcilazo, and A. Valcarce, Phys. Rev. C **99**, 014001 (2019))。彼らの計算では、 s 波のみを取り入れた計算で、 NN 間の相互作用は中心力のみ Malfliet-Tjon potential (J. L. Friar *et al.*, Phys. Rev. C **42**, 1838 (1990)) を用いていた。その研究によると、 $J(T) = 5/2^+(0)$ の重陽子+ Ω 三体系は三体の閾値から 20 MeV ほど束縛していた。このため、重陽子を構成する 2 つの核子 N の間の距離が短くなっていると考えられる。したがって、 NN 相互作用の核力の違いが計算結果に影響を与える可能性がある。

本研究では、 NN 相互作用を Malfliet-Tjon potential, Minnesota potential (D. R. Thompson, M. Lemere, Y. C. Tang, Nucl. Phys. A **286**, 53 (1977)), AV8 potential (B. S. Pudliner *et al.* Phys. Rev. C **56**, 1720 (1997)) の 3 つを用いて s 波以上の寄与を取り入れた $NN\Omega$ の三体構造を計算をした。その結果、 $J(T) = 5/2^+(0)$ の重陽子+ Ω 三体系では、 NN 相互作用の斥力芯の高さと、三体の閾値から見た束縛エネルギーの大きさに相関があることが計算できた。 NN 相互作用の中心力の斥力芯の高さは AV8 > Malfliet-Tjon > Minnesota の順であり、 $J(T) = 5/2^+(0)$ の束縛エネルギーは斥力芯の高いものほど小さくなっていた。今回用いた $N\Omega$ ポテンシャルは斥力芯がなく、 $N\Omega$ 間の距離が縮むほど系を束縛する働きがあると考えられる。そして、 NN 相互作用の斥力芯が高いほど核子同士が近づけず、全体として構造が広がっているため、 $N\Omega$ 相互作用の束縛する効果が低くなり、 NN 相互作用の斥力芯が高いほど束縛エネルギーは小さくなったと考えられる。今回の $J(T) = 5/2^+(0)$ の重陽子+ Ω では 20 MeV ほど深く束縛しており、この場合斥力芯の高さの違いが三体構造の計算結果に違いをもたらすということが計算できた。

ダイクォークのカイラル有効理論を用いたヘビーバリオンのスペクトル解析

(金 龍熙 (M1)、肥山詠美子、岡真 [JAEA,RIKEN]、鈴木溪 [JAEA])

チャーム・ボトムクォークを一つ含むシングルヘビーバリオンは、アップ・ダウン・ストレンジ、これら軽いクォーク 2 つから成る「ダイクォーク」描像を顕著に持つと期待される。つまりこのバリオンは、ダイクォーク模型とガウス展開法を用いることでダイクォーク・ヘビークォークの 2 体系と見立てて解析できる。

本研究ではダイクォーク模型として「ダイクォークのカイラル有効理論」を用いた。これは、線型 Σ 模型により構築されたスカラー・擬スカラーダイクォークのラグランジアンのうち、カイラル対称性を満たす質量項を中心に考慮した理論であり、そこから得られた質量公式を用いることで $\Lambda_{c,b}, \Xi_{c,b}$ バリオンのエネルギースペクトル、及びその構造を解析した。その結果、 ρ モード・ λ モードという 2 種類の角運動量励起状態について、シングルヘビーバリオンは ρ モードの方が λ モードより重いこと、また、これらのエネルギースペクトル差は $\Lambda_{c,b}$ バリオンの方が $\Xi_{c,b}$ バリオンより大きいことが分かった。この結果は論文にまとめられ、Physical Review D への掲載を受け入れられている。

高密度核物質の状態方程式とコンパクト天体現象の研究

(富樫 甫)

現実的核力から出発した量子多体変分計算によって高密度核物質の状態方程式を構築し、重力崩壊型超新星爆発や中性子星などのコンパクト天体現象に適用した。特に今年度は、「有限温度核物質内部におけるハイペロン混合」・「有限温度非一様核物質相に対する対称エネルギーの影響」・「結合チャンネル相互作用を考慮した変分法の構築」などに取り組んだ。

Studying the omega meson in nuclear matter through realistic simulations

(戴 健為 (M1)、肥山詠美子、Philipp Gubler[JAEA])

Studying the ω meson in nuclear matter by simulating low energy pA reactions. Using a numerical simulation to realistically describe experimental pA-reactions. Learning how to use the PHSD code and compare the behavior of the rho and omega mesons. Then, now I 'm starting to calculate the di-lepton spectrum, which is used to compare these theoretical predictions with available experimental data.

^{12}C 散乱のエネルギースペクトルと共鳴位置の研究

(松本琢磨、小川翔也 (D1)、山田悠真、坂井原浩輝 (B4))

炭素同位体ではクラスター構造が発達し、 α 粒子のガスの状態とみなされる様々な励起共鳴状態の出現が示唆されている。例として ^{12}C では Hoyle 状態と呼ばれる、元素合成の過程において重要な役割を担う励起状態が存在する。Hoyle 状態を含む ^{12}C の励起状態、特に共鳴状態を解明することは非常に重要であり、これまでに ^{12}C の共鳴状態を探る実験は盛んに行われている。これまでの研究で、共鳴状態・非共鳴状態両方を計算に取り入れることのできる連続状態離散化チャネル結合法を用いて $N\text{-}^{12}\text{C}$ および $\alpha\text{-}^{12}\text{C}$ 散乱の解析を行ない、 ^{12}C の共鳴状態だけでなく非共鳴状態の効果が重要であることを示した。さらにこの研究で散乱の微分断面積のエネルギースペクトルのピーク位置と共鳴状態のエネルギー位置にずれがあることが判明した。

本研究では、エネルギースペクトルと共鳴エネルギーのずれについて、簡単な ^{20}Ne のモデルを用いて解析し、その原因が遷移演算子、および束縛、連続状態の波動関数に強く依存することが分った。こちらは坂井原氏の卒論テーマとしてまとめ、現在論文を執筆中である。

$^{11}\text{Li}(p, p')$ 反応の微視的解析による ^{11}Li の共鳴状態の探索

(松本琢磨、田中順貴 [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])

^{11}Li は最初に発見されたハロー核で実験的にも理論的にも研究が進められてきた。その基底状態の束縛エネルギーや半径については良く理解されてきているが、その励起共鳴状態の有無についてはまだ未解決である。本研究では、近年測定された $^{11}\text{Li}(p, p')$ 反応を微視的モデルにより解析することで、 ^{11}Li の共鳴状態を探索する。

解析では ^{11}Li をスピンを無視した $^9\text{Li}+n+n$ の三体モデルで記述し、 p 散乱における分解過程を離散化チャネル結合法により取り扱う。計算された、弾性散乱微分断面積、分解断面積、励起エネルギースペクトルの実験値を定量的に再現できた。また共鳴状態の解析において、その構造が $^{10}\text{Li}+n$ として記述されることを示し、この共鳴状態を Borromean Feshbach 共鳴と名付けた。さらにこのモデルでの Coulomb 分解結果について、 $B(E1)$ 遷移のエネルギー分布と実験値を比較し議論した。

この結果は Progress of Theoretical and Experimental Physics に掲載された。本研究は松本氏を中心に推進された。

$^6\text{He}(p, p')$ 反応を用いた共鳴状態 $2\frac{1}{2}^+$ の解析

(小川翔也 (D1)、松本琢磨)

近年、加速器の発展により不安定核領域の原子核に関する多くの研究が行われ、その基底状態だけでなく共鳴状態までも理解が進みつつある。最近では、中性子ドリフトライン近傍に存在する原子核の共鳴状態が精力的に調べられ、その例として、2 中性

子ハロー核として知られている ${}^6\text{He}$ は逆運動学的な (p,p') 反応により研究されてきた。

${}^6\text{He}$ の共鳴状態としては 2_1^+ が最も低い状態として良く知られており、分解断面積に鋭いピークとして現れることがわかっている。また最近では、 2_1^+ の次に低い状態として 2_2^+ が調べられているが、幅が広いいため顕著なピークとして断面積に現れないため、詳細な議論がほとんどされていない。

本研究では、不安定分解反応を精密に記述する連続状態離散化チャネル結合法を用いて ${}^6\text{He}(p, p')$ 反応を解析し、 2_2^+ による寄与が断面積にどのように現れるか議論した。

この結果は現在 Physical Review C に投稿中である。

複素スケーリング法を用いた共鳴状態と遷移スペクトルについての研究

(青木宏平 (M2)、小川翔也 (D1)、松本琢磨)

量子力学的な共鳴とは、波動関数が特定のエネルギーになった場合に振幅が増大する現象を指す。このエネルギーを持つ状態を共鳴状態と言い、粒子の崩壊しきい値を超えて形成される準安定な状態となる。理論的に共鳴状態は散乱振幅の極の位置から定義され、そのエネルギーは複素数で与えられ、その実部は共鳴エネルギー、虚部は崩壊幅を表す。実験においては断面積のピークとして現れ、通常解析においてはそのピーク位置を共鳴エネルギーとみなす。しかし、先行研究で理論から求められる共鳴エネルギーと断面積と密接な関係を持つ遷移スペクトルのピーク位置が一致しない結果が報告されており、その理由については明らかになっていない。

本研究では、共鳴エネルギーと遷移スペクトルのピーク位置がずれる原因を探ることを目的に ${}^{11}\text{Be}$ を対象とした研究を行った。少数多体系の共鳴状態を求める有益な手法である複素スケーリング法 (Complex Scailing Method : CSM) を用いることで ${}^{11}\text{Be}$ の共鳴状態を求めた。CSMを用いる利点としては、遷移スペクトルも求めることができ同一の手法での比較が行える点と、CSMでは共鳴状態の成分と非共鳴状態の成分の分離し、それぞれの寄与について議論できる点である。遷移スペクトルに関しては、 ${}^{11}\text{Be}$ の基底状態である $1/2^+$ 状態から最もエネルギーの低い共鳴状態である $5/2^+$ 状態へのE2遷移についての計算を行った。遷移スペクトルを様々な状態に分離し、共鳴エネルギーと遷移スペクトルのピーク位置の関係性について議論した。これらの内容は修士論文にまとめた。

非束縛核における仮想状態と共鳴状態の研究

(徳永 航 (M2), 松本琢磨)

近年、加速器の発達によってドリップライン近傍における不安定核の研究が精力的に行われており、特に2中性子ハロー核と呼ばれる不安定核が注目を浴びている。2中性子ハロー核の中で最初に発見された原子核は ${}^{11}\text{Li}$ であり、これはボロミアン構造を持

つため、部分系である ^{10}Li は非束縛となっている。 ^{10}Li には仮想状態および共鳴状態と呼ばれる特殊な状態があり、特に、仮想状態は ^{11}Li の束縛機構に寄与していると考えられており、その構造を明らかにする必要がある。しかしながら、 ^{10}Li の仮想状態を直接観測するような実験は困難であり、かつ仮想状態が観測量にどのように反映されるかは理論的にも明らかでない。

本研究では、散乱振幅の極を求めることで仮想状態と共鳴状態の探索を行い、それらの状態が連続準位密度に及ぼす影響を解析した。これらの内容は修士論文にまとめた。

厳密な Z_3 対称性を持つ量子色力学の湯現密度領域における格子計算

(八尋 正信、河野 宏明 [佐賀大学]、高橋 純一 [気象庁]、開田 丈寛 (D3))

量子色力学 (QCD) は、クォークとグルーオンに働く「強い相互作用」を記述する理論であり、格子 QCD 計算を第一原理計算として様々な研究がなされている。しかし、化学ポテンシャルが有限値を持つ領域では、「符号問題」のため数値計算が困難となる。これに対し我々は、符号問題が弱くなると期待される、厳密な Z_3 対称性を持つ QCD (Z_3 -QCD) の格子計算を行った。

本年度は、昨年度に動作確認などを行った数値計算プログラムを用いて、有限化学ポテンシャル領域における Z_3 -QCD の格子計算を行った。今回は位相クエンチ近似を用いて、転移温度前後かつ化学ポテンシャルと温度の比が $0 \leq \mu/T \leq 3.0$ の領域で、クォークの閉じ込め相転移についての秩序変数とクォーク数密度をそれぞれ測定した。その結果、秩序変数とクォーク数密度ともに、高温領域で 1 次相転移を示唆するヒステリシスが確認でき、逆に低温領域では見られなかった。今後は、最重み付け法による期待値の誤差の見積もりや、またより低温領域における数値計算を検討している。

本研究は、開田氏を中心に推進されている。

パーシス点とホモロジーによる格子 QCD 有効模型の相構造の研究

(八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、高橋純一 [気象庁]、管野淳平 [気象庁]、開田丈寛 (D3))

QCD は、温度とクォーク化学ポテンシャルによって様々な相構造を表す。この相構造の違いは、真空の状態や場、測定量等に構造的な違いがあると考えられる。そこで、本研究では位相的データ解析手法の一つであるパーシステントホモロジーを用いて、QCD の持つ相構造の研究を行った。この手法は、トポロジカルな情報を抽出するものであり、物質の構造やビッグデータの解析に用いられている。

本年度は、昨年度に引き続き格子 QCD 有効模型に対する解析を行った。特に、ランダムに配置された点の空間構造についての解析結果との比較を行い、特に相転移点近傍において優位な差が見られた。また、クォークの閉じ込め相転移についての秩序変数との比較により、測定量のゆらぎのピーク位置がそれぞれ一致したことを確認した。

これらのことから、パーシステントホモロジーによる解析を用いることで、新たな観点から定義される秩序変数の有用性が期待できる。

本研究は、開田氏を中心に推進されている。またこの結果は論文にまとめられ、現在投稿中である。

純ゲージ SU(2) におけるセンターボルテックスのパーシステントホモロジー解析

(肥山詠美子、河野宏明 [佐賀大学]、柏浩司 [福岡工業大学]、開田丈寛 (D3) 大野晃 (M2))

今現在の我々の宇宙では、単独クォークをハドロンから取り出すことができない (クォークの閉じ込め)。一方で、超高温な宇宙初期ではクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) が実現し、閉じ込めが働かない状態になっていたとされている。これらの異なる状態間の転移は宇宙の進化と密接に関係する現象であるが、未だ未解明な点が多く残されている。この問題に対するアプローチの一つとして閉じ込めのメカニズムを解明することが重要である。

センターボルテックスは QCD の真空に存在する場の特殊な渦構造であり、閉じ込めを説明する有力候補の一つと考えられている。しかし、センターボルテックスの時空間上の配置が非閉じ込め相転移の前後でどのように温度変化するかはまだ明らかになっていない。

本研究では、数値シミュレーションから得られた純ゲージ SU(2) におけるセンターボルテックスの時空間配置がどのように温度変化するかを調べるため、パーシステントホモロジー解析と呼ばれる手法を用いて解析を行った。この手法によってセンターボルテックスの渦糸構造が有する「穴」の情報 (ホモロジー) を抽出することに成功した。その結果、センターボルテックスが持つ最大のホモロジーが転移の前後で顕著な変化を起こすことが明らかとなり、閉じ込めの状態から sQGP (強結合 QGP) への遷移を示唆する結果を得た。

本研究の内容は大野氏を中心に遂行され、修士論文としてまとめられた。

発表論文

《原著論文》

Possible Lightest Ξ Hypernucleus with Modern Ξ N Interactions:

E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto and Th.A. Rijken,

Physical Review Letters **124**, 092501 (2020).

Compact $sssc\bar{c}$ pentaquark states predicted by a quark model:

Q. Meng, E. Hiyama, K. U. Can, P. Gubler, M. Oka, A. Hosaka and H. Zong,
Physics Letters B **798**, 135028 (2019).

Nuclear statistical equilibrium equation of state with a parameterized Dirac-Bruckner
Hartree-Fock calculation:

S. Furusawa, H. Togashi, K. Sumiyoshi, K. Saito, S. Yamada, and H. Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2020**, 013D05 (2020).

New neutron star equation of state with quark-hadron crossover:

G. Baym, S. Furusawa, T. Hatsuda, T. Kojo, and H. Togashi,
Astrophysical Journal **885**, 42 (2019).

Borromean Feshbach resonance in ^{11}Li studied via $^{11}\text{Li}(p,p')$:

T. Matsumoto, J. Tanaka, and K. Ogata,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2019**, 123D02 (2019).

Microscopic optical potentials including breakup effects for elastic scattering:

S. Ogawa, R. Horinouchi, M. Toyokawa and T. Matsumoto,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2019**, 123D04 (2019).

⟨⟨Proceedings⟩⟩

Nuclear equation of state based on the many-body calculation with realistic nuclear
forces:

H. Togashi,
JPS Conf. Proc. 31 (2020) 011022.

Cluster variational method for hyperonic nuclear matter with coupled channels:

H. Togashi and M. Takano,
JPS Conf. Proc. 26 (2019) 031024.

Radiation-hydrodynamic simulations of core-collapse supernovae with 6 dimensional
Boltzmann neutrino transport:

H. Nagakura, S. Furusawa, H. Togashi, K. Sumiyoshi, and S. Yamada,

Journal of Physics: Conf. Ser. 1225 (2019) 012003.

《その他の論文》

$nn\Lambda$ 三体系の構造:

宮本亮祐, 金龍熙, 山本拓実, 肥山詠美子

原子核研究, Vol.64, Supplement 1 (2020), pp.60-61.

3 体力を考慮した絶対零度及び有限温度ハイペロン物質の状態方程式:

富樫甫,

素粒子論研究・電子版 第30巻 (2019) 60.

講演

《海外での講演》

Fivebody structure of $sssc\bar{c}$ system:

Emiko Hiyama,

Perspectives in Hadron Physics

Structure of Xi hypernuclei with modern Xi-N interaction:

Emiko Hiyama,

Universal Physics in Many-Body Quantum Systems—From Atoms to Quarks

Microscopic equation of state for nuclear matter with the variational many-body theory:

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki and M. Takano,

MOST/RIKEN Workshop on ab initio theory in nuclear physics, April 6, 2019, Beijing, China.

Microscopic equation of state for astrophysical simulations:

H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, and E. Hiyama,

8th Huada school on QCD, May 6, 2019, Wuhan, China.

Effects of the symmetry energy on supernova equations of state at sub-nuclear densities:

H. Togashi,

9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2019), October 1, 2019, Da Nang City, Vietnam.

Hyperon mixing in hot and dense matter with the variational method:

H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, and E. Hiyama,

Theia-Strong 2020 Workshop 2019, November 27, 2019, Speyer, Germany.

《 国内での講演 》

few-body structure of neutron-rich nuclei and $S = -2$ hypernuclei:

肥山詠美子

第二回クラスター階層領域研究会, 2019年5月31日, 東京工業大学大岡山キャンパス

Hypernuclear structure with view point of few - body problem:

肥山詠美子

新学術領域 量子クラスターで読み解く物質階層構造 第5回国際レクチャーシリーズ, 2019年10月28日, 京都大学

few-body problem in hypernuclear physics 35:

肥山詠美子

シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019), 2019年12月16日, 京都大学

$nn\Lambda$ 系の三体構造に関する研究:

宮本亮祐, 金 龍熙, 山本拓実, 肥山詠美子

2019年原子核三者若手夏の学校, 2019年8月9日, 白浜荘

ガウス展開法による $nn\Lambda$ の共鳴状態の研究:

宮本亮祐, 肥山詠美子

第125回日本物理学会九州支部例会, 2019年11月30日, 佐賀大学

NNA の3体共鳴状態の研究:

宮本亮祐, 肥山詠美子

理研-九大ジョイントワークショップ, 2019年12月23日, 九州大学

NNA の三体構造の研究:

宮本亮祐, 肥山詠美子

日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月 16 日, 名古屋大学

$NN\Omega$ の三体構造の研究:

山本拓実, 宮本亮祐, 金龍熙, 肥山詠美子

2019 年度 原子核三者若手夏の学校, 2019 年 8 月 6 日, 白浜荘

$NN\Omega$ の 3 体構造の研究:

山本拓実, 宮本亮祐, 金龍熙, 肥山詠美子

日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 20 日, 山形大学

ΩNN の三体構造の研究:

山本拓実, 肥山詠美子

第 125 回日本物理学会九州支部例会, 2019 年 11 月 30 日, 佐賀大学

HALQCD 相互作用を用いた $NN\Omega$ の三体構造研究:

山本拓実, 肥山詠美子

理研九大ジョイントワークショップ, 2019 年 12 月 23 日, 九州大学

ガウス展開法による $\Omega\Omega N$ の構造:

金 龍熙, 肥山詠美子

2019 年度 原子核三者若手夏の学校, 2019 年 8 月 8 日, 白浜荘

ガウス展開法による $\Omega\Omega N$ の構造:

金 龍熙, 肥山詠美子

第 125 回日本物理学会九州支部例会, 2019 年 11 月 30 日, 佐賀大学

カイラルダイクォーク模型によるヘビーバリオンのスペクトル:

金 龍熙, 肥山詠美子, 岡真, 鈴木溪

日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月 17 日, 名古屋大学

^{12}C 散乱のエネルギースペクトルと共鳴位置の研究:

松本 琢磨, 山田 悠真, 小川 翔也

日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 18 日, 山形大学

Variational study for hyperon mixing in hot and dense matter:

H. Togashi,

Mini-Workshop on Baryon Interactions and Neutron Star, January 14, 2020, Fukuoka, Japan.

Symmetry energy effects on nuclear clusters in supernova matter:

H. Togashi,

Japan-France Joint Workshop on "Clusters in quantum systems: from atoms to nuclei and hadrons", January 29, 2020, Fukuoka, Japan.

Nuclear equation of state based on the many-body calculation with realistic nuclear forces:

H. Togashi,

15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15), July 4, 2019, Kyoto, Japan.

Effects of nuclear saturation properties on the equation of state for hot nuclear matter in core-collapse supernovae:

H. Togashi,

International Workshop on Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (4MCOCOS), October 21, 2019, Fukuoka, Japan.

General purpose equation of state for astrophysical simulations with bare nuclear forces:

H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, and E. Hiyama,

International Workshop on Nuclear Physics for Astrophysical Phenomena, October 25, 2019, Tokyo, Japan.

3 体力を考慮した絶対零度及び有限温度ハイペロン物質の状態方程式:

富樫甫, 鷹野正利, 肥山詠美子

高塚さんを偲ぶ会 -高密度ハドロン・クォーク物質の諸相と中性子星の構造・進化-, 2019 年 5 月 25 日, 京都大学基礎物理学研究所

ハイペロン物質における結合チャンネル効果を考慮したクラスター変分法の研究:

富樫甫, 鷹野正利

日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 19 日, 山形大学

高密度物質の状態方程式とコンパクト天体への応用:

富樫甫

2019 年度四国地区理論物理学セミナー, 2019 年 12 月 7 日, 高知大学

高密度物質の状態方程式と高エネルギー天体现象:

富樫甫

理研一九大ワークショップ「数理が紡ぐ素粒子・原子核・宇宙」, 2019 年 12 月 24 日, 九州大学

結合チャンネル効果を考慮したクラスター変分法によるハイペロン物質状態方程式の研究:

富樫甫, 鷹野正利

日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月 18 日, 名古屋大学

Application of CDCC to many-body breakup reaction:

松本 琢磨

Symposium on Nuclear Data 2019, 2019 年 11 月, 九州大学

Study of resonances via CDCC analyses of (p,p') and (α,α') reactions:

松本 琢磨

RCNP "Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets" Program, 2019 年 12 月 19 日, 大阪大学核物理研究センター

共鳴エネルギーと遷移スペクトルの関係性についての研究:

松本琢磨, 青木宏平, 小川翔也

日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月 17 日, 名古屋大学

微視的反応模型に基づく ${}^6\text{He}$ 共鳴状態の解析:

小川翔也, 豊川将一, 松本琢磨

2019 年度 原子核三者若手夏の学校, 2019 年 8 月 6 日, 白浜荘

${}^6\text{He}+p$ 反応における共鳴状態の微視的解析:

小川翔也, 豊川将一, 松本琢磨

日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 18 日, 山形大学

${}^6\text{He}+p$ 反応を通じた共鳴状態の微視的解析:

小川翔也, 松本琢磨

第 125 回日本物理学会九州支部例会, 2019 年 11 月 30 日, 佐賀大学

Analysis of resonances in ${}^6\text{He}$ via ${}^6\text{He}(p, p')$ reactions:

小川翔也, 松本琢磨

RCNP "Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets" Program, 2019 年 12 月 19 日, 大阪大学核物理研究センター

${}^6\text{He}+p$ 反応を通じた共鳴状態の解析:

小川翔也, 松本琢磨

理研九大ジョイントワークショップ, 2019 年 12 月 23 日, 九州大学

${}^6\text{He}+p$ 反応を通じた共鳴状態による断面積への影響の解析:

小川翔也, 松本琢磨

日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月 17 日, 名古屋大学

有限密度における厳密な Z_3 対称性を持つ格子 QCD 計算:

開田丈寛, 河野宏明, 高橋純一, 八尋正信

2019 年度 原子核三者若手夏の学校, 2019 年 8 月 9 日, 白浜荘

有限密度における Z_3 -QCD の格子計算:

開田丈寛, 河野宏明, 高橋純一, 八尋正信

日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 17 日, 山形大学

SU(2) 純ゲージにおけるセンターボルテックスのパーシステントホモロジー解析:

大野晃, 河野宏明, 開田丈寛

2019 年度 原子核三者若手夏の学校, 2019 年 8 月 8 日, 白浜荘

以下、ポスター発表.

Three-body structure of $NN\Lambda$:

宮本亮祐、肥山詠美子

1st International Symposium on "Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems" (CLUSHIQ2020), 2020年1月23日, 美湯の宿 両築別邸

Three-body Structure of $NN\Omega$:

T. Yamamoto, R. Miyamoto, Y. Kim, E. Hiyama

"The International School for Strangeness Nuclear Physics 2019" (SNP school 2019), Sep/7, 2019, Aobayama-Campus and ELPH, Tohoku University.

Three-body structure of $NN\Omega$:

T. Yamamoto, E. Hiyama

1st International Symposium on "Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems" (CLUSHIQ2020), 2020年1月23日, 美湯の宿 両築別邸

Spectrum of heavy baryons from a chiral effective theory of diquark:

Yonghee Kim, Emiko Hiyama, Makoto Oka, Kei Suzuki

1st International Symposium on "Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems" (CLUSHIQ2020), 2020年1月23日, 美湯の宿 両築別邸

A systematic study of supernova equations of state with the Thomas-Fermi method:

H. Togashi

3rd Annual Symposium on "Gravitational Wave Physics and Astronomy; Genesis", February 10-12, 2020, Hyogo, Japan.

外部資金

《 文部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 A (一般)

ラムダ粒子間、グザイ-核子間相互作用の解明

研究代表者: 仲澤 和馬

研究分担者: 肥山 詠美子

文部科学省科学研究費補助金, 基盤研究 B (一般)

ダブルストレンジネス核の精密構造研究とその相互作用の決定

研究代表者：肥山詠美子

文部科学省科学研究費補助金, 新学術領域研究 (研究領域提案型)

第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構

研究代表者：肥山詠美子

文部科学省科学研究費補助金, 若手研究

変分法による超新星爆発計算用核物質状態方程式のラムダハイペロン混合系への拡張

研究代表者：富樫 甫

文部科学省科学研究費補助金, 新学術領域研究 (公募研究)

コンパクト天体现象における高温・高密度核物質状態方程式の系統的研究

研究代表者：富樫 甫

文科省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

分解反応精密解析による原子核存在限界近傍での新奇な共鳴状態の解明

研究代表者: 松本琢磨

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

国立研究開発法人理化学研究所との共同研究

「数理」を軸とする分野横断的手法による、物質・生命・宇宙の統合的解明と新しい数理的手法の開発

研究代表者：肥山詠美子

学部4年生卒業研究

(李 東ウク, 肥山詠美子):

ガウス展開法を取得させるために、2体問題の例として、水素原子、重陽子の計算を行った。ここでは、ガウス展開法の精度の良さを理解してもらうことを意図とした。また、3体問題計算の初歩的な計算を進めた。

(坂井原浩輝, 松本琢磨):

卒論テーマ：複素スケーリング法を用いた ^{20}Ne の $B(E2)$ の研究

修士論文

青木宏平:(指導教員 肥山詠美子 松本琢磨): 複素スケーリング法を用いた共鳴状態と遷移スペクトルについての研究

徳永航:(指導教員 肥山詠美子 松本琢磨): 非束縛核における仮想状態・共鳴状態の研究

大野晃:(指導教員 肥山詠美子): QCD の SU(2) 純ゲージ理論におけるセンターボルトックスのパーシステントホモロジー解析

博士論文

開田丈寛: (指導教員、肥山詠美子) : Relation between Z_3 symmetry and sign problem and analyses of pure SU(2) gauge theory based on gradient flow
(Z_3 対称性と符号問題の関係とグラディエントフローに基づく純 SU(2) ゲージ理論の解析)

学外での学会活動

松本琢磨:
理化学研究所 仁科加速器センター UEC 委員
理化学研究所 仁科加速器センター理論推進会議委員

その他の活動と成果

2019 年度 原子核三者若手夏の学校, 準備校

宇宙物理理論

研究室構成員

山本一博 教授

町田真美 助教

《 大学院 博士課程 》

大村匠 酒見はる香

《 大学院 修士課程 》

小野宏次朗 多良淳一 土肥明 大前陸人

田嶋裕太 貞安優太

《 学部 卒業研究生 》

三木大輔 山下晃毅 樋口颯太

担当授業

身の回りの物理学 B(山本一博), 宇宙物理学 (山本一博), 基幹物理学 IB(山本一博), 電磁気学演習 (町田真美), 物理学基礎演習 (町田真美), 物理学特別研究 I (山本一博, 町田真美), 物理学特別研究 II(山本一博, 町田真美)

研究・教育目標と成果

超曲率スケールの非一様ダークエネルギー模型の大規模構造 (山本一博)

Aoki らが先行研究で偽真空崩壊を伴い開いた宇宙を预言するインフレーション模型を応用し、開いたド・ジッター時空のスカラ場理論に現れる超曲率モードに起因するダークエネルギー模型を提案していた。この模型では、スカラ場に起因するダークエネルギーが超ホライズンスケールで空間的に非一様性を持つ理論模型となることを指摘した。宇宙論的な観測的帰結を積分ザックス-ヴォルフ効果を通して現れる宇宙背景放射の温度揺らぎとして評価した。さらに、この成果を応用拡張し、ダークエネルギーが超ホライズンスケールで空間的に非一様性を持つ理論模型について研究を継続し、この模型の理論的预言をより詳細に調べた。大きなスケールでダークエネルギーが宇宙原理を破る宇宙模型であるため、その観測的帰結を得るための理論的枠組みの構築から見直した。通常の一様等方背景宇宙の物質断熱揺らぎの摂動展開と共に、大スケールの暗黒エネルギーの非一様性は摂動等曲率揺らぎとして取り扱い、二つの

パラメーターの摂動展開法による計算法を開発した。これによって、大スケールの暗黒エネルギーの非一様性が、大規模構造にどのような影響を及ぼすか原理的に高次まで計算できるようにした。この研究は、ダークエネルギーが超ホライズンスケールにおいて空間的に非一様でダイナミカルなダークエネルギー模型の研究は、宇宙原理を破る新しい暗黒エネルギーの可能性を探った研究として意義がある。宇宙論的大スケールのアノマリーを導く可能性のあるダークエネルギー模型として興味深い。今後は、ここで進めた大規模構造における理論予言を定量的に評価し、観測と比較まで行う予定である。

量子場と相互作用するウンルー-ドウィット検出器の一般化された揺動散逸関係（山本一博）

量子場の非局所相関の構造と曲がった時空に現れる熱的現象の関係をより深く理解するための研究と、それをより一般の系へ拡張する研究を共同研究者と進め成果を得た。量子場の非局所相関のより深い理解に関しては、量子情報理論の技術を応用した観点からの研究を進め、多検出器を導入した理論模型の研究を行なった。リンドラー時空において一定加速運動する多検出器模型を導入し、量子場と相互作用する多検出器系に4次元においても揺動散逸関係の一般化である correlation-propagation-relation（相関伝播関係）が成立することを示した。この成果は、リンドラー時空から見た時の平衡状態で成立するエネルギーの流れに関する関係を示すものである。この関係が慣性系から見た時に非局所相関に起因する量子放射とどのように関係するかは今後の課題である。研究成果は Physics Letter B に掲載された。

FFT を用いた銀河分布のスペクトル解析（山本一博）

観測的宇宙論にもとづいた研究では、銀河分布データへの応用を目指して、赤方偏移空間の相関関数に着目した研究を進めてきた。これまでに修正重力理論に基づいたバイスペクトルに一般相対論からのズレを予言しており、の検証を目的とした現実的理論模型として、ハローアプローチに基づいた銀河バイスペクトルの研究を進めている。銀河とハロー（ダークマター）の対応における不定性は、バイスペクトルの重力理論の検証において、問題となる可能性があることがわかった。広島大学大学院生との共同研究により、FFT を用いた銀河分布のパワースペクトル、バイスペクトルの多重極モーメントを測定するプログラムを構築した。Python を用いることによって、比較的簡単な数値解析プログラムで多重極スペクトルの測定が実行できること、実際の SDSSIII BOSS 観測データへの応用も実行して測定を行った。

ブラックホール降着流における高エントロピー渦状構造の形成（町田真美）

ブラックホール降着円盤の角運動量輸送は、差動回転プラズマ中で発達する磁気回転不安定性 (MRI) が作る磁気乱流であると考えられている。しかし、降着円盤の一部を取り出す局所 MHD 計算においては、角運動量輸送率の飽和値が計算領域やその他、様々なパラメータに依存することが報告されている。2010 年代に入り、大局計算においても解像度依存性が調査され、角運動量輸送率に相当する Maxwell 応力の非対角成分は、スケールハイトを 20 メッシュ程度以上で分解することで飽和するが、磁場の各成分がもつエネルギーはテスト計算の範囲では収束しないことが報告されている (Hawley et al. 2012)。我々は、大局的な降着円盤シミュレーションにおける解像度依存性を明らかにするために空間 5 次精度、時間 3 次精度を担保する CANS+ を用いた数値実験を行った。本課題では、空間解像度が最も低い方位角方向のメッシュ数のみを変化させている。数値計算の初期条件として、弱い方位角方向磁場のみをもつ回転平衡トーラスを仮定する。空間解像度と磁気エネルギーの飽和値、角運動量輸送パラメータに相当する磁気応力は逆相関を示す事がわかった。これは、空間解像度が上昇することによって成長した短波長の乱流によって磁気エネルギーが散逸するためである。一方で、質量降着率は高解像度モデルの方が高い傾向を示した。そこで、我々は、赤道面の動径方向分布を調べた所、ガスが降着する領域と噴出する領域で渦状構造を形成している事を発見した。この動径降着流の渦状構造は強い電流シートを境界面に形成していることから、乱流磁場が逆カスケードして磁気渦状腕を形成した事がわかった。本計算は、効率的な質量降着には乱流によって生成された大局的な渦状磁場が重要な役割を担っている事を示した。

星雲 W50 と周辺の星間ガスの電波観測データ解析 (町田真美, 酒見はる香, 大前陸人)
X線連星ジェットは、恒星質量程度のコンパクト天体と通常の恒星からなる連星系からプラズマガスが細く絞られて噴出する高エネルギー天体現象である。近年は天の川銀河系内の宇宙線粒子加速源として注目を集めており、さらには周辺に分布する星間ガスとの相互作用により分子雲の形成を促進する可能性があると指摘されている。ジェット天体である X線連星 SS433 とその周辺を取り囲むように存在する星雲 W50 は、ジェット内での宇宙線粒子加速機構や、周辺ガスとの相互作用の物理を解明するのに理想的な天体であり、現在まで盛んに研究が行われている。我々は、特に W50 東端領域に見られるジェット終端領域の物理的性質と、その周辺に分布する星間ガスとの関係を解明すべく、電波観測データの解析を行っている。2019 年度は、2017 年に Very Large Array (VLA) により観測された W50 の 1.0-2.0 GHz 帯域の電波連続波観測データのイメージングを行った。この結果と 1996 年観測イメージとの比較により、ジェット終端領域の構造の速度上限を見積もることに成功した。また、ジェット終端領域で加速可能な宇宙線の最高エネルギーを推定し、系内 X線連星ジェットが、これまで起源が説明されて

いなかった高エネルギー宇宙線の加速源となりうることを明らかにした。その他には、W50 東端領域の分子雲を野辺山 45m 電波望遠鏡と ASTE 望遠鏡を用いて観測し、詳細な空間構造を観測することに成功した。今後は、2018 年度に VLA で観測した W50 の 2.0-8.0 GHz 帯域の電波連続波データのイメージングを完了させ、W50 のさらに詳細な空間構造を解明し、宇宙線粒子加速源となりうる領域の特定を目指す。また、野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた追加観測を行い、W50 との相関の有無を明らかにする。

2 温度磁気流体数値実験による系外ジェット伝搬数値実験 (町田真美, 大村匠)

系外ジェットは、1023 cm 以上の莫大な空間スケールに渡って銀河の虚空を伝搬し、電波で明るい天体である。観測的研究からジェットが周辺環境に莫大なエネルギーを供給することで、母銀河と中心の大質量ブラックホールとの共進化や銀河団の進化にまで影響することが報告されている。そのため、ジェットと周辺環境との相互作用の影響を調査すべく数多くのジェット伝搬数値実験が行われてきた。しかしながら、プラズマの 2 温度性に着目した数値的研究は、これまで行われていない。そこで、我々は、準相対論的ジェットと周辺物質との相互作用に関する 2 温度磁気流体数値実験を行った。その結果、衝撃波ではイオンが優先的に加熱されるため、これまでの 1 温度近似での電子温度は我々の 2 温度近似よりも 1 桁程度過剰に見積もっていることを明らかにした。これらの結果をまとめ、査読論文として王立天文学月報から出版した。また、イギリスで開かれたジェットにのみ焦点あてた国際研究会にてポスター発表を行い、海外研究者からも一定の評価を得ることに成功した。来年度は、現在取り扱っていない物理である磁気乱流や磁気リコネクションにおける電子加熱現象を導入し、さらなる調査を行う。加えて、観測量であるシンクロトロン放射を計算し、2 温度近似と 1 温度近似によって、どのように放射分布に違いが生まれるのかを検証する。

電波星雲 W50 と X 線連星 SS433 の共進化に関する磁気流体計算 (町田 真美、小野 宏次朗)

系内電波星雲 W50 は球状のシェル構造とその両端に東西に広がる ear 構造を持つ。W50 の中心に位置する X 線連星 SS433 から、光速の 26% の速度で東西方向に伸びるプラズマの噴流 (ジェット) が観測されている。SS433 のジェット軸と W50 の ear 構造の軸が一致することから、W50 は SS433 の高密度天体を作った超新星残骸 (SNR) と SS433 ジェットの共進化によって形成されたと考えられている。しかし、共進化から成ることを示す直接的な証拠は未だ見つかっていない。W50 の成因が、SNR とジェットの共進化であるとしたモデルを検証するために流体計算が多数行われている。その結果、ジェットが SNR を貫通することで中心の球状構造と両側の伸びた構造を生成することが分かった。一方、SNR とジェットの衝突面では不連続で明瞭な輪郭を形成すること

が示されたが、実際の滑らかな輪郭とは異なる。また、一般に超新星爆発によって形成された高密度天体は爆発によるキックを受けて中心からずれると考えられるが、SS433はシェル構造の中心に位置している。このように、SNRとジェットを仮定したこのモデルには観測を説明できない点が多い。そこで、本研究ではジェット単体によってW50の再現を目指す磁気流体計算を実施した。ジェットには、方位角方向磁場を仮定し観測結果と矛盾のない速度と運動エネルギーを与えた。背景ガス密度分布は天の川銀河とHIのガス分布を基に設定した。本研究の結果から、ジェット両先端で逆流したプラズマが相互作用することで動径方向への運動が生成され、シェル構造を形成できることが分かった。また、得られた物理量から電波放射強度を求めたところ、観測結果と類似した形状を示した。ジェット単体によってシェル構造とear構造の両方を再現できることが分かり、W50の新たな形成機構の可能性を示した。

Chandra 衛星による X 線連星 SS433 中心領域の X 線観測 (多良淳一、町田真美)

X 線連星 SS433 は、わし座にある電波星雲 W50 の中心に位置しており、電波からガンマ線まで幅広い波長で輝いている。SS433 は、コンパクト星と晩期の A 型超巨星 (伴星) の食連星で、その軌道周期は 13.082 日であることが分かっている。しかし、伴星の質量の同定には至っておらず、中心のコンパクト星が中性子星かブラックホールかはまだ決まっていない。SS433 は、光速の 26% で双方向にらせんジェットが噴出していることから、SS433 の連星は我々から見るとほぼ真横 (Edge-on) を向いていると考えられている。一般に X 線連星で観測されるジェットや放射は、コンパクト星の周りに形成される回転プラズマ (降着円盤) から放出されると考えられている。特に X 線放射スペクトルは降着円盤の状態を理解し、ジェットの噴出機構を制限する上で非常に重要な情報を与える。しかし、SS433 は Edge-on であるため、降着円盤自身により放射が遮られ、X 線放射強度はあまり高くない。そこで、食によるコンパクト星近傍の放射の有無を利用し、X 線スペクトルにどのような違いがあるかを調べ、特に輝線の情報やスペクトルの形状について調査することで、SS433 のコンパクト星への制限を与えることを目指す。X 線観測データは、Chandra 衛星のアーカイブデータから取得し、食の有無による違いを解析した。SS433 は、早いスペクトルの時間変動がしられているため、100 ks の観測データを 20ks に分割して解析を行った。その結果、6.4keV と 6.7keV に鉄輝線のピークがみられ、2 種類の鉄輝線の強度に、食の有無による違いが認められた。

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、橋本正章)

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。特に、急

激に冷やすニュートリノ放射（直接ウルカ過程）が中性子星のコアで起きるか否かで観測されている表面温度の再現性が大きく変わるため、直接ウルカ過程の発生の有無と状態方程式との関係性が重要である。そこで、性質が異なる3つの状態方程式を用いて各々のモデルで単独中性子星の冷却計算を行った。その結果、柔らかい状態方程式では直接ウルカ過程が起こらない可能性があり、従って低温の観測を再現できない事がわかった。このため、柔らかい状態方程式では観測の再現のために何らかの強い冷却過程、つまりその過程に関わるエキゾチック粒子の存在が示唆される。来年度はエキゾチック粒子を考慮した柔らかい状態方程式で観測を再現できるか否かを調べる。また、中性子星が伴星をもつ場合に関してもその熱的進化（X線バースト）について調べた。こうした降着中性子星の場合、上記のニュートリノ放射に加えて伴星から降り積もる物質が起点となって核燃焼を始めとした加熱過程も発生するが、そのような加熱過程の大きさも状態方程式と関係があると思われる。そこで、中性子星の熱的進化を解く既存のコードにおいて計算領域を中性子星全体に広げ、X線バーストの計算を行ったところ、硬い状態方程式の方がピーク光度が高く、再起時間が長くなる傾向にあることがわかった。さらに、観測されているバースター（GS1826-24）のモデリングも行った。来年度はより状態方程式の数を増やして状態方程式とX線バーストの光度曲線の関係性をより詳しく調べる。また、観測されているバースターから状態方程式が制限できるかどうか調べる。

銀河円盤の電波帯擬似観測（町田真美、田嶋裕太）

渦巻銀河の磁場は数マイクロガウスから数十マイクロガウスであると考えられている。しかし、その起源や維持機構、大局構造などは未だ明らかになっていない。宇宙磁場の情報を得る手段として電波連続波の観測・偏波解析があるが、観測量は視線方向に積分された値なので、3次元の磁場構造を得るのは難しい。そこで磁場構造の解明のため、3次元物理量分布を得ることのできる数値シミュレーションとその擬似観測を組み合わせた研究の需要が高まっている。近年では低周波電波干渉計の稼働により、渦巻銀河や宇宙ジェットメートル波帯での観測結果が得られている。今後はさらに高解像度な観測結果が増加していくと考えられるため、メートル波帯での物理を取り扱った擬似観測手法の開発が求められている。偏波放射は、乱流磁場によりその強度が低下する”偏波解消”の影響を受ける。特に、メートル波帯では、ファラデー回転量が大きくなるため強い偏波解消を起こすことが知られている。そこで、乱流磁場による偏波解消効果を取り入れた擬似観測コードを作成し、銀河ガス円盤MHD数値実験であるMachidaら(2013)のデータを用いてメートル波帯擬似観測を行った。その結果、乱流磁場の偏波解消により、偏波率が低下し、特にメートル波帯では偏波強度マップの形状に大きな変化が見られた。次に、実際の観測を想定した空間分解能での擬似観測を

行った。その結果、偏波角の揃っていないメートル波ではさらに偏波率の大きな低下が見られ、より実際の観測に近づいた。現在、擬似観測に用いているデータは冷却・加熱の効果が考慮されていない。しかし、銀河円盤は多温度構造を持つと考えられている。そこで、今後は冷却・加熱の効果を取り入れた MHD 数値実験を行い、観測量への影響をしらべる。

天体同定コードの作成と偏波源の種類による偏波特性の調査 (町田真美, 大前陸人)

宇宙磁場は銀河や宇宙大規模構造の形成と進化に影響を与えると考えられており、その理解は重要である。しかしながら、宇宙磁場の起源や進化過程には未だ不明な点が多い。宇宙論的磁場進化は、赤方偏移が分かる銀河の磁場を測定する事で傾向を知る事ができ、磁場情報はファラデー回転量度 (Rotation Measure: RM) を用いた電波観測から引き出す事ができる。系外偏波源の赤方偏移と RM の関係を統計的に調べる事で、RM の赤方偏移依存性を明らかにする試みは既に行われている (Hammond ら 2012; Xu & Han 2014)。しかし、偏波源の統計が足りず、明確な解明には至っていない。宇宙磁場進化の研究の進展には、観測される偏波源数の増大が必須である。これは、現在建築中の大型電波干渉計 (SKA) の稼働によって十分な拡充が期待できる。そこで、我々は Hamond ら (2012) を参考に天体同定コードを作成し、コードテストとして先行研究の再現を行った。その結果、先行研究と同様のデータを用いた解析で、同様の結果を得る事を示した。また、一般的に偏波源が活動銀河か、通常電波銀河かで異なる偏波率特性を示すと考えられている。そこで、可視光カタログの分類に従って偏波特性を調査した所、従来の分類と偏波率に相関はなく、物理を解明する新たな分類が必要になる事を示した。我々は、活動銀河は X 線での放射強度が大きい事に着目し、X 線放射の有無と偏波率の高低に相関が無いかを調べた。その結果、電波コアと分類された電波源のうち偏波率の比較的高い天体は X 線との対応があまり見られないことがわかった。このことから、電波コアと分類されている天体の一部は空間的に未分解な電波銀河の電波ローブである可能性を示している。今後、高分解能の偏波観測と X 線観測が行われることで、コアとローブによる偏波情報を区別できるようになることが期待される。

発表論文

《 原著論文 》

Large-scale inhomogeneity of dark energy produced in the ancestor vacuum, Yue Nan, Kazuhiro Yamamoto, Hajime Aoki, Satoshi Iso, Daisuke, Yamauchi Physical Review

D 99 103512-1-11 (2019)

Fluctuation-dissipation and correlation-propagation relations in $(1 + 3)$ D moving detector quantum field systems, Jen-Tsung, Hsiang, B. L. Hu, Shih-Yuin Lin, Kazuhiro Yamamoto Physics Letters B, 795, 694-699 (2019)

A possible origin of kilohertz quasi-periodic oscillations in low-mass X-ray binaries, Kato, S., Machida, M. Publications of the Astronomical Society of Japan 72, 38 (2020)

Two-temperature Magnetohydrodynamic simulations for sub-relativistic AGN jets: Dependence on the fraction of the electron heating, Ohmura, T., Machida, M., Nakamura, K., Kudoh, Y., Matsumoto, R. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 493,561-572 (2020)

Possibility of rapid neutron star cooling with the realistic equation of state, A. Dohi, K. Nakazato, M. Hashimoto, Y. Matsuo, and T. Noda Prog. Theor. Exp. Phys. 113E01 (2019)

An approach to constrain models of accreting neutron stars with the use of an equation of state, A. Dohi, M. Hashimoto, R. Yamada, Y. Matsuo, and M. Y. Fujimoto Prog. Theor. Exp. Phys. 033E02 (2020)

《その他の論文》

Investigation of mixing for Ejected Material in Supernova Remnant Cas A, Y. Matsuo, M. Hashimoto, A. Dohi, and K. Arai To Physics Journal, 2, 386 (2019)

<https://purkh.com/index.php/tophy/article/view/281>

○会議収録

Dependence on neutron star cooling on the equation of state with a possible exotic particle, A. Dohi, M. Hashimoto, M. Matsuo, K. Nakazato, T. Noda JPS Conf. Proceedings, 31, 011047 (2020)

講演

《海外での講演》

Relativistic effect in quantum states of a bouncing particle in a gravitational field, Ar Rohim, Kazushige Ueda, Kazuhiro Yamamoto

ポスター発表, Relativistic Quantum Information North (RQI-N 2019) 27 May - 1st June 2019

Observational Visualizations for spiral galaxies, 町田真美、赤堀卓也、中村賢仁、中西裕之、Marijke Haverkorn SKA general science meeting and key science workshop 2019, Alderly Edge, UK, 8-12 April 2019

The effect of Faraday Depolarization at low frequency verified by the observational visualization of spiral galaxies, 町田真美、赤堀卓也、中村賢仁、中西裕之、Marijke Haverkorn Bochum, Germany, 23-27 September 2019

Magnetic Energy Dissipation by Small scale turbulence in accretion disks: 町田真美、川島朋尚、工藤祐己、松本洋介、松元良治 14th ASIA-PACIFIC Physics conference, Borneo Convention Centre, Kuching, Sarawak, Malaysia, 17-22 November 2019

Polarization Analysis of the SS433 Jet Termination Region: H. Sakemi, M. Machida, T. Ohmura, T. Akahori, H. Akamatsu, H. Nakanishi, K. Kurahara, S. Ideguchi, Y. Miyashita, K. Takahashi, J.S. Farnes LOFAR MKSP Annual Meeting and Busy Days, Bochum, Germany, September 23-27, 2019

Two-temperature MHD study of sub-relativistic jet propagation into the intracluster medium, Ohmura, T., Machida, M., Nakamura, K., Kudoh, Y., Asahina, Y., Matsumoto, Y., Matsukiyo, S., Matsumoto, R.

ポスター発表, A centenary of Astrophysical Jets: Observation, Theory, and Future Prospect, Macclesfield UK, July 2019

Influence of the neutron star cooling on X-ray burst, A. Dohi, T. Noda, M. Hashimoto Quark and Compact Stars 2019 (QCS2019), Haeundae in Busan, September on 2019

《 国内での講演 》

Vacuum state as entangled state between left, right, future and past,
Kazuhiro Yamamoto

Quantum Entanglement in Cosmology, IPMU(柏市), 2019 5月 21日

Fluctuation-dissipation and correlation-propagation relations in (1+3)D moving detector-quantum field systems,

Kazuhiro Yamamoto

ポスター発表, The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 神戸大学, 2019 11 月 25 日-11 月 29 日

曲がった時空上の場の量子論と一般化された揺動散逸関係

山本一博

量子情報と宇宙, 名古屋大学, 2019 年 9 月 27 日-9 月 28 日

3次元磁気流体数値計算に基づく降着円盤渦状腕衝撃波の形成

町田真美、川島朋尚、工藤祐己、松本洋介、松元良治

日本天文学会 2020 年春期年会、筑波大学 (オンライン)、2020 年 3 月 16 日-19 日

CANS+による MRI 乱流生成の高空間分解能 MHD 数値実験

町田真美、川島朋尚、工藤祐己、松本洋介、松元良治

日本天文学会 2019 年秋期年会、熊本大学、2019 年 9 月 11 日-13 日

ファラデーモグラフィによる SS433 ジェット先端領域の磁場構造解析

酒見はる香, 町田真美, 大村匠, 出口真輔, 宮下恭光, 高橋慶太郎, 赤堀卓也, 赤松弘規, 中西裕之, 藏原昂平, Jamie Farnes

天文学におけるデータ科学的方法, 東京, 2019 年 5 月 27 日 - 5 月 29 日

電波観測に基づく SS433 ジェット先端領域の偏波解析

酒見はる香, 町田真美, 大村匠, 出口真輔, 宮下恭光, 高橋慶太郎, 赤堀卓也, 赤松弘規, 中西裕之, 藏原昂平, Jamie Farnes

SKA-Japan シンポジウム 2019, 東京, 2019 年 9 月 2 日 - 9 月 6 日

電波観測に基づく星雲 W50 の磁場構造解析

酒見はる香, 町田真美, 大村匠, 出口真輔, 宮下恭光, 高橋慶太郎, 赤堀卓也, 赤松弘規, 中西裕之, 藏原昂平

日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2019, 東京, 2019 年 11 月 21 日 - 11 月 23 日

JVLA を用いた星雲 W50 の電波連続波観測

酒見はる香, 大前陸人, 大村匠, 町田真美

日本天文学会 2020 年春季年会, 2020 年 3 月 16 日 - 3 月 19 日 *新型コロナウイルス感染
対策のため講演資料の web 公開のみ

W50/SS433 の構造形成に関する磁気流体計算 II

小野 宏次朗, 大村 匠, 町田 真美, 酒見 はる香, 朝比奈 雄太

日本天文学会 2019 年秋季年会、熊本大学、2019 年 9 月 11-13 日

W50/SS433 の構造形成に関する磁気流体計算 III

小野 宏次朗, 大村 匠, 町田 真美, 酒見 はる香

日本天文学会 2020 年春季年会、筑波大学、2020 年 3 月 16-19 日

系内天体 W50/SS433 系の形成起源の解明を目指した磁気流体計算

小野 宏次朗, 大村 匠, 町田 真美, 酒見 はる香, 朝比奈 雄太

日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2019、国立天文台、2019 年 11 月 21 日-23 日

MHD シミュレーションに基づく電波星雲 W50 と X 線連星 SS433 の共進化の解明

小野 宏次朗

2019 年度第 49 回天文・天体物理若手夏の学校、ロワジールホテル豊橋、2019 年 7 月
30 日-8 月 2 日

二温度磁気流体数値実験を用いた AGN ジェット擬似観測

大村匠

日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2019、国立天文台、2019 年 11 月 21 日-23 日

電子温度進化を追う 3 次元 MHD ジェット伝搬シミュレーション

大村匠

SKA-Japan シンポジウム 2019, 国立天文台, 2019 年 9 月 2 日-6 日

電子イオン 2 温度磁気流体計算による 3 次元 AGN ジェット伝搬数値実験 : FR II ジェッ
トにおけるローブ圧/外圧に対するイオンの寄与

大村匠, 町田真美

日本天文学会 2020 年春季年会、筑波大学、2020 年 3 月 16 日-19 日

2 温度磁気流体数値実験によるジェットと銀河間物質相互作用の影響調査

大村匠, 町田真美, 工藤祐己, 朝比奈雄太, 中村賢仁, 松元亮治, 松本洋介, 松清修一
日本流体力学会 年会 2019, 2019年9月13日-15日

Three dimensional modeling of FR-II jets using two-temperature MHD simulation
大村匠, 町田真美

Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope, 2020年1月20日 - 2020
年1月22日

Possible rapid cooling process of neutron star with realistic equation of state

A. Dohi

Collaborative Meeting on Supernova Remnants between Japan and USA, RIKEN and
Kyoto University, October on 2019 (invited)

Dependence of neutron star cooling on the equation of state with a possible exotic
particle

A. Dohi, M. Hashimoto, M. Matsuo, K. Nakazato, T. Noda

ポスター発表, The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution
of Galaxies (OMEG15), Kyoto University, July on 2019

Direct Urca プロセスが X線バーストに及ぼす影響

土肥明、野田常雄、橋本正章

物理学会九州支部例会、佐賀大学、2019年11月

Thermal Evolution of Isolated Neutron Star and the Influence of Equation of State

土肥明

核物理×物性セミナー、千葉工業大学、2019年11月 (招待)

中性子星内部から発生するニュートリノ放射が及ぼす X線バーストの影響

土肥 明、野田常雄、橋本正章

日本天文学会 2019 秋季年会、熊本大学、2019年9月

輻射輸送計算による銀河円盤の電波帯疑似観測

田嶋裕太, 大村匠, 町田真美

日本天文学会 2020 年春季年会、筑波大学、3月16-19日

シンクロトロン自己吸収を考慮した銀河円盤の電波帯疑似観測

田嶋裕太, 町田真美, 大村匠

日本SKAサイエンス会議2019「宇宙磁場」、国立天文台、11月21-23日

相対論MHDジェット伝搬シミュレーションと電波帯疑似観測

田嶋裕太、

2019年度第49回天文・天体物理若手夏の学校、ロワジールホテル豊橋、7月30日-8月2日

銀河系外の電波源におけるファラデー回転測度と赤方偏移依存性の調査

大前陸人、赤堀卓也、町田真美、酒見はる香、

日本SKAサイエンス会議2019「宇宙磁場」、東京、2019年11月21日-23日

W50東端のターミナルショックによるSS433ジェットの制限

大前陸人、酒見はる香、大村匠、町田真美、

日本天文学会2020年春季年会、筑波大学、2020年3月16-19日（新型コロナウイルスによる集会自粛のためにオンライン投稿）

外部資金

《文部省科学研究費補助金》

科学研究費補助金, 基盤研究C(一般)

量子場の非局所相関に起源をもつ量子放射の研究

研究代表者: 山本一博

科学研究費補助金, 新学術領域研究(研究領域提案型)

究極理論からの加速宇宙の解明

研究代表者: 大栗博司

科学研究費補助金, 基盤研究B(一般)

宇宙大規模構造の2点・3点統計量に基づく精密宇宙論データ解析方の開発と応用

研究代表者: 樽家篤史

科学研究費補助金、基盤研究C(一般)

銀河渦状腕形成に対する磁場の寄与の解明と観測的可視化

研究代表者：町田真美

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》
日本天文学会早川幸男基金 採択 計 24 万円
研究代表者：酒見はる香

天文学振興財団 採択 計 12 万円
研究代表者：酒見はる香

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

日本学術振興会特別研究員 DC2 採択 (酒見はる香)

理研 JRA 研究員に採択 (土肥明)

他大学での研究と教育

町田真美：西南学院大学にて「自然科学概論 I, II」の講義を行った。

町田真美：中村学園大学にて「地学」の講義を行った。

大村匠：大村匠：九州産業大学にて非常勤講師 (担当：物理) を務めた

土肥明：九州産業大学基礎サポートセンターで非常勤講師 (主に物理・数学) を務めた。

学部 4 年生卒業研究

三木大輔：(指導教員、山本一博) 重力相互作用によるエンタングルメントの生成

山下晃毅：(指導教員、山本一博) Isocurvature dark energy モデルについて

修士論文

小野宏次朗：(指導教員、町田真美) 電波星雲 W50 と X 線連星 SS433 の共進化に関する磁気流体計算

多良淳一：(指導教員、町田真美) X 線連星 SS433 の食を用いた X 線放射源の研究

土肥明：(指導教員、山本一博) 現実的な状態方程式を用いた中性子星の冷却

学外での学会活動

町田真美：日本天文学会年会実行委員

その他の活動と成果

山本一博：福岡労災保険指定病院協会学術講演会 (市医共催) 「相対論と宇宙論～宇宙の始まりと進化、そしてブラックホールをめぐる話～」

9月24日、天神スカイホール

山本一博：2019年ノーベル物理学賞解説セミナー「宇宙の進化と宇宙におけるこの地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献」 James Peebles の解説

12月17日、九州大学大学院理学研究院

町田真美：「科学を語る会」で一般向け講演を行った。

(観測提案)

Nobeyama 45-m Radio Telescope 2019 観測提案採択 (ID:CG191014) 72時間

(その他執筆)

Haruka Sakemi, Mami Machida, 『SKA1 Beyond 15GHz: The Science case for Band 6』, 7.5 Broad-Band Radio Light Curves of Relativistic Jets in X-ray Binaries, p125-126, February 2020, https://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2020/02/Science-Case_band6_Feb2020.pdf

日本版 Square Kilometre Array サイエンスブック 2020、第6章 宇宙磁場 (p196)、第8章 星間物質 (p301)、2020年3月、<http://ska-jp.org/>

(受賞)

The Young Science Award from Asian Nuclear Physics Association (ANPhA), OMEG15, Kyoto, July 2019 (ポスター発表)

粒子系理論物理学研究室

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 修士課程 》

古賀一成 谷脇俊介 大久保勇利

《 訪問研究者 》

中里健一郎 (基幹教育院) 小林良彦 (基幹教育院)

担当授業

基幹物理学 IB(原田恒司)、物理学概論 A(大河内豊)、物理学概論 A 演習 (大河内豊)、物理学概論 B(小島健太郎)、身の回りの物理学 A (原田恒司、小島健太郎)、体験してわかる自然科学 (原田恒司)、課題協学科目 (原田恒司、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)、「わかる」と「わかりやすい」 – オリジナル教材を作って考える – (原田恒司、小島健太郎)、大学院講義 素粒子論 (大河内豊)、プログラム・ゼミ VI, VIII (田尾周一郎)、プログラム・ゼミ V, VII (田尾周一郎)、チュートリアル V, VII (田尾周一郎)、チュートリアル VI, VIII (田尾周一郎)

研究・教育目標と成果

繰り込み群に基づいた再加重法による核子系有効場理論の格子シミュレーション (原田恒司)

非相対論的な核子を基本自由度とする核子系有効場理論を格子上に乗せて数値シミュレーションを行うことを念頭に、非相対論的場の理論における化学ポテンシャルの繰り込み群のもとでの振る舞いについて考察した。

超弦理論における小さな宇宙定数を持つ真空とその崩壊の触媒効果 (大河内豊・古賀一成)

これまでの量子重力理論において得られた経験をもとに導かれた幾つかの予想とその間の関係性が近年注目を集めている。それをもとに、量子重力理論と無矛盾な低エネ

ルギー有効理論への制限を与える試みがなされている。これはスワンプランド問題と呼ばれ、これに基づく新たな宇宙像の模索が行なわれている。そのひとつとして、準安定な5次元時空が崩壊する際に生じるバブル上の4次元時空構成する方法が提案されている。我々は、この5次元時空において、真空崩壊の触媒効果を利用することで、バブル上の4次元時空に小さな宇宙定数を実現できることを示した。このモデルでは、5次元時空にブラックホールとストリングクラウドと呼ばれるものが存在するが、この影響が4次元バブル時空上では、放射と物質と解釈される。我々は、現在の放射と物質の量をインプットとし、薄壁近似で解析することで、5次元の真空崩壊の触媒効果が自然と小さな正の宇宙定数を選択することを見つけた。

T^2/Z_3 オービフォルドを持つ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。このモデルでは、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。本年度は余剰次元のゲージ場が作る Wilson line phase に対する有効ポテンシャルの導出について、様々な表現の物質場からの寄与の計算を進めた。

発表論文

《原著論文》

“Instability of Higgs Vacuum via String Cloud”,

Issei Koga(Kyushu U.), Sachiko Kuroyanagi(Nagoya U. and Madrid, IFT), Yutaka Ookouchi(Kyushu U.),

Published in: Phys.Lett.B 800 (2020) 135093 e-Print: 1910.02435 [hep-th]

“Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant”,

Issei Koga, Yutaka Ookouchi,

Published in: JHEP 10 (2019) 281 e-Print: 1909.03014 [hep-th]

《Proceedings》

Koji Harada, Satoru Sasabe, and Masanobu Yahiro,

How to Use Renormalization Group Analysis in Lattice Nuclear Effective Field The-

ory in "Recent Progress in Few-Body Physics", *Proceeding of the 22nd International Conference on Few-Body Problems in Physics*, N.A.Orr, M.Ploszajczak, F.M.Marqués, and J. Carbonell Eds.

《その他の論文》

"Exploring heterogeneous grouping strategies from the learning analytic perspective",
Jingyun Wang, Kentaro Kojima,
International Journal of Learning Technologies and Learning Environments, No 2
(2019), Vol 2, 21-34, 2019.11.

「課題研究」科目における早期の研究体験の意義について：「学際」系学士教育課程
への示唆

田尾周一郎, 田中岳, 飯嶋裕治, 副島雄児,
基幹教育紀要, 6, 51-63, 2020.03.

著書

原田恒司

「ジー先生の場の量子論 基礎編」筒井泉氏との共訳 丸善出版

講演

《海外での講演》

"Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant"

Issei Koga, Yutaka Ookouchi,

International Joint Workshop on the Standard Model and beyond、KEK-KIAS-NCTS-ITP-CAS、2019年10月15日

《国内での講演》

「準安定状態の崩壊における高次元静的ブラックホールの触媒効果」

古賀一成、大河内豊

素粒子物理学の進展 2019、ポスター発表、京都大学 基礎物理学研究所、2019年8月1日

「準安定状態の崩壊における高次元静的ブラックホールの触媒効果」

古賀一成、大河内豊

原子核三者若手 夏の学校 2019、口頭発表、原子核三者若手、2019年8月8日

「Catalysis of higher dimensional static black hole in metastable vacuum decay」

古賀一成、大河内豊

Strings and Fields 2019、ポスター発表、京都大学 基礎物理学研究所、2019年8月22日

「準安定状態の崩壊における高次元静的ブラックホールの触媒効果」

古賀一成、大河内豊

日本物理学会 2019年秋季大会、日本物理学会、2019年9月17日

「Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant」

古賀一成、大河内豊

大阪市立大学、理学部、口頭発表、2019年11月12日

「Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant」

古賀一成、大河内豊

素粒子現象論研究会 2019、口頭発表、南部陽一郎物理学研究所 (NITEP)、2019年11月23日

「Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant」

古賀一成、大河内豊

物理学会九州支部例会、口頭発表、物理学会九州支部、2019年11月30日

「Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant」

古賀一成、大河内豊

KEK Theory workshop 2019、口頭発表 KEK、2019年12月3日

「Instability of Higgs Vacuum via String Cloud」

古賀一成、大河内豊

KEK Theory workshop 2019、ポスター発表、KEK、2019年12月5日

「Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant」

古賀一成、大河内豊

研究会「Particle Physics and Cosmology 2020」、宮崎、口頭発表、2019年1月28日

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 C(一般)

準安定なヒッグス真空の崩壊と触媒効果

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

修士論文

古賀一成 (指導教員：大河内豊)：真空崩壊におけるバブル時空の形成と触媒効果による宇宙定数の決定

学外での学会活動

大河内豊:

2019年度 日本物理学会 Jr. セッション委員

国際研究会 YITP Workshop ”Strings and Fields 2019” 2019年8月19- 8月23日 世話
人

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

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:

平成31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:

佐賀県立佐賀西高等学校において進学講演会の講師担当 (2019.08)

九州大学アクティブラーニング教室「ピア・インストラクションによるグループ学習」
の講師担当 (2019.08)

M2B学習支援システム講習会中級編の講師担当 (2019.09)

福岡県修猷館高等学校において出前授業の講師担当 (2019.11)

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 長江大輔 (RCSHE) 准教授
藤田訓裕 助教 郷慎太郎 助教 西畑洗希 助教
岩村龍典 技術職員

《 博士研究員 》

鷺山広平 (特任助教, RCSHE) 足立智 (RCSHE) 田中聖臣 (RCSHE)

《 大学院 博士課程 》

庭瀬暁隆

《 大学院 修士課程 》

吉田郭治 猪野元大樹 笠原妃奈 白坂和也
末川慶英 平位勇磨 村上郁斗 坂木重仁
長田茉莉 浜野友哉 内藤夏樹 東聖人

《 学部 卒業研究生 》

後藤滉一 足立智輝 永田優斗 甲斐民人
富松太郎 中島優人 山田智哉 武藤大河 松尾仁 米村千恵子

担当授業

電磁気学 I・同演習 (森田浩介)、最先端物理学 (森田浩介、寺西高)、物理学入門 II (森田浩介)、実験核物理学 (森田浩介、寺西高)、力学・同演習 (若狭智嗣)、原子核物理学 (若狭智嗣)、原子核・高エネルギー実験学 (寺西高)、物理学総合実験 (藤田訓裕、郷慎太郎、西畑洗希)、物理学の進展 (坂口聡志)、基幹物理 IA 演習 (坂口聡志)、基幹物理 IB 演習 (坂口聡志、郷慎太郎)、物理学概論 A (寺西高)、自然科学総合実験 (寺西高)

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、田中聖臣、長江大輔、浅井雅人、藤田訓裕、庭瀬暁隆、白坂和也、末川慶英、長田茉莉、内藤夏樹、東聖人、村上郁斗) 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。理研仁科センター、オークリッジ国立研究所及び国内外の諸機関と協力し、

4/18～7/2の期間、リングサイクロトロン加速器及び反跳分離装置 GARIS-II を用いて $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ 融合反応による 119 番元素合成実験を遂行した。さらに7月以降は、理研において大規模アップグレードが進行中の超伝導線形加速器 sRILAC による新元素探索を進めるため反跳分離装置 GARIS-III の設置と実験準備を進めている。九大グループは、理研に滞在中の博士課程学生による基幹検出器 Si-box のアップグレードや、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を通じて、新たな実験セットアップの構築に貢献を果たしている。sRILAC と GARIS-III を組み合わせた最新の実験施設は令和2年6月から稼働予定であり、最大化した実験効率をもって新元素の発見を目指す。

超重元素核の融合障壁分布の研究 (庭瀬暁隆、田中泰貴、内藤夏樹、田中聖臣、藤田訓裕、郷慎太郎、坂口聡志、森田浩介)

超重元素合成に用いられる変形アクチノイド核を含む融合反応の障壁分布を理化学研究所にて測定した重元素核間の準弾性散乱データから導出し、障壁分布の広がりや説明に核の変形による効果が重要な役割を果たすことを示した。さらに、得られた障壁分布から短軸側・長軸側からの衝突に対応する入射エネルギーを同定し、蒸発残留核生成断面積のエネルギー依存性と比較することにより、軽い領域において示唆されていた短軸側からの衝突における断面積の増大を世界で初めて直接的に検証した。また、実験的に得られる融合障壁分布から未知の系の融合反応における最適エネルギーを推定する手法を提案した。これらの知見は第8周期の新元素合成における実験条件の決定に大きな貢献を果たすと期待される。

また、九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおいて、軽核であるリチウムとバナジウムの準弾性散乱を測定し、障壁分布を導出した。得られた結果をチャンネル結合計算と比較し、バナジウムの励起状態などとの結合による影響を議論した。

超重元素核の γ 線核分光 (末川慶英、浅井雅人)

超重元素の存在とその安定性は、超重核の殻構造に大きく依存する。殻構造は陽子や中性子の一粒子軌道のエネルギー間隔や順序に直接的に現れる。実験的には、分光学的手法により原子核の基底状態や励起状態のスピン・パリティ、一粒子軌道配位、励起エネルギー等を調べることで殻構造の情報を得ることができる。しかし実験的な困難さから、ウランより重い短寿命重アクチノイド核の核分光研究はほとんど行われていないのが現状である。本研究は中性子欠損重アクチノイド核領域の核構造を明らかにすることを目的とし、原子力機構タンデム加速器に付設されたオンライン同位体分離装置 JAEA-ISOL を用いて、 ^{234}Am の EC 崩壊 γ 線分光実験を実施した。実験は2019年5月と7月に行い、 γ - γ 同時計数測定の実験データの解析から、 ^{234}Am の EC 崩壊によっ

て生成される娘核 ^{234}Pu の励起準位構造を明らかにすることに成功した。また、 ^{234}Am に EC 崩壊する核異性体が存在することを初めて明らかにし、 ^{234}Am の基底状態及び核異性体のスピン・パリティ、陽子・中性子軌道配位を推定した。更に副産物として、 ^{234}Np に半減期約 9 分の未知核異性体が存在することを明らかにし、その半減期を精度良く決定するとともに、核異性体転移に伴う γ 線や特性 X 線の同時計数測定にも成功し、核異性体の励起エネルギーや崩壊様式を明らかにするための情報を得ることができた。今後更に詳細な解析を行い、 ^{234}Am , ^{234}Pu , ^{234m}Np の核構造を明らかにし、この領域の原子核の変形状態や殻構造を明らかにする計画である。

超重核の質量測定 (庭瀬暁隆、森田浩介)

原子核の質量は核種固有の物理量であるため、精密な質量測定によってその Z と A を直接識別することができる。そのため、熱い融合反応で作られる核種のように、崩壊連鎖が自発核分裂等によって既知の核へ辿り着かないような同位体であっても一意な核種同定を行うことができる。理化学研究所では気体充填型反跳分離装置 GARIS-II と多重反射型飛行時間測定式質量分光器 MRTOF を用いた短寿命核の質量測定を行っており、超重核の精密質量分析を目指して研究開発を行ってきた。その開発において中核的な役割を担ってきたのが、本グループの開発した α -TOF 検出器である。 α -TOF は原子核の質量とそれに続く崩壊事象を相関取得するための検出器であり、非常に稀な事象においても確度の高い質量測定を実現する。本年度は総計 4.5 日間のビーム照射において、総計 11 イベントの ^{257}Db 起因の α 崩壊信号に相関した飛行時間信号の取得を行い、世界初となる超重核の直接質量測定に成功した。また、取得した 11 イベントは個々の事象でみても全て質量理論モデルによる計算値と一致しており、 ^{257}Rf や ^{257}Lr といった隣接する同重体からは分離されている。このことは、合成した原子核の原子番号と質量数の同定には 1 イベントあれば充分であるということを実験的に明らかにしたことに他ならない。

重アクチノイド核の核分光研究 (郷慎太郎、田中聖臣、坂口聡志、浅井雅人、森田浩介)

原子番号が 100 を超える超重元素領域においては、陽子数魔法数 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ある可能性が予言されている。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

核の核分光実験研究を推進している。本実験を行うため、日本原子力開発機構における実験課題審査会において実験提案を行い、承認された。実験は来年度に実施予定である。

不安定 Ca 同位体の物質半径測定 (田中聖臣)

近年質量数 36 から 52 までの Ca 同位体の核内陽子分布半径が測定され、二重魔法数核 ^{48}Ca を超えた中性子過剰領域で原因不明の異常増大が発現することが示された。しかし、この異常現象は中性子数が増えるにつれて発現しているものの、これらカルシウム同位体の原子核全体の大きさである物質半径の変化に関する実験的情報はこれまでに得られていなかった。そこで本研究ではカルシウム同位体 $^{42-51}\text{Ca}$ の相互作用断面積測定を理研 RI ビームファクトリーで行い、その実験値から物質半径の導出を行った。得られた物質半径についても ^{48}Ca を超えた領域において急激な増大を示し、加えてその増大の程度は先行研究の陽子分布半径に比べて遥かに大きいことが分かった。また、既に良く知られた核半径が増大するメカニズムでは実験値を全く説明できないことが明らかとなった。詳細な議論の結果、急激な半径増大現象は、核内で硬い構造を持つはずの二重魔法数 ^{48}Ca の芯が余剰中性子付与によりあたかもふやけるように外側へ染み出す変化が起きていることが原因であると示唆された。本研究成果は当該年度に論文出版およびプレスリリース発表され、科学新聞にも掲載された。

準弾性散乱による融合障壁分布測定 (内藤夏樹、村上郁人、坂口聡志、田中聖臣)

低エネルギー領域における核融合反応では反応確率が融合障壁の高さに強く依存しているため、融合障壁の高さおよびその分布は核融合の反応エネルギーを決定する上で直接的な情報を与える。また、融合障壁分布は反応する 2 核の核構造を鮮明に反映するため、原子核構造を探るためのプローブとしての応用も期待できる。これらの興味から九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおいて準弾性散乱による融合障壁分布測定を進めている。昨年度までは準弾性散乱イベントを ΔE -E カウンターテレスコープにより識別していたが、低エネルギー領域ではカウンターテレスコープの物質量が大きすぎるために準弾性散乱イベントを正しく検出できず測定できなかった。そこで極めて小さな物質量の検出器で構成される TOF-E カウンターテレスコープを当該年度に新たに開発した。九州大学加速器・ビーム応用科学センターのタンデム加速器により供給されるイオンビームを用いて性能評価を行い十分な粒子識別能力を有していることを確認した。その後、開発した検出器を用いて $^6\text{Li}+^{51}\text{V}$ および $^{10}\text{B}+^{27}\text{Al}$ 反応系における融合障壁分布測定を行った。並行して、開発した検出器の様々な重イオンビームに対する性能評価を行うために新たにホウ素、ケイ素、ゲルマニウムのイオンビーム開発を行った。これにより水素からヨウ素 ($Z=1$ から $Z=53$) までの幅広い領域で様々

なイオン種を加速できるようになり、検出器開発のプラットフォームとしての良い環境が得られている。

無機シンチレータを用いたインプランテーション検出器の開発 (白坂和也、郷慎太郎、田中聖臣、坂口聡志、森田浩介)

原子核の新元素・同位体合成実験ではこれまで半導体検出器が利用されているが、その時間応答には10-100 ns程度の限界がある。より重く、より不安定な原子核を合成し、その崩壊を検出するためには半導体検出器に替わる時間応答に優れた検出器開発が重要である。本研究室では、 ^{100}Sn 近傍核に期待される非常に早いアルファ崩壊を検出するため、無機シンチレータを活用したインプランテーション検出器開発を行っている。本年度は加速器・ビーム応用科学センター タンデム加速器施設にて実験を行い、その発光特性を評価した。

重イオン検出用 MCP-ToF 検出器の開発 (村上郁斗、長江大輔、田中聖臣、藤田訓裕、坂口聡志、郷慎太郎、森田浩介)

超重元素合成実験やタンデム加速器を用いた実験等の低エネルギービームでの使用を目的とした薄膜と MCP を用いた検出器を開発した。九大タンデム加速器施設において性能試験を行い、時間分解能、検出効率を評価した。得られた時間分解能は150 ps程度、検出効率は高くとも80%程度である。同様の検出器では性能面で劣っていることが判明し、改善が必要である事が分かった。

密度汎関数法による原子核分裂反応の微視的記述 (鷲山広平)

質量数250程度以上の重い原子核の核分裂反応は大多数の核内核子が関与する大振幅集団運動の一つであり、微視的量子多体理論である原子核密度汎関数法に基づく研究が近年発展を遂げている。本研究では、核分裂反応の研究が盛んに行なわれている ^{240}Pu 及び ^{256}Fm に対して核分裂経路上の集団慣性質量の計算を密度汎関数法に基づく局所乱雑位相近似法(LQRPA)を用いて行なった。この研究は、先行研究では無視されたきた集団慣性質量に対する分裂ダイナミクスの動的効果の重要性を調べるためのものである。得られた集団慣性質量は ^{240}Pu 及び ^{256}Fm の基底状態及び核分裂アイソマー状態で他の変形度に比べて大きな値を示し、慣性質量が変形度の関数として大きく変化することを明らかにした。また先行研究に比べて1.5-6倍程度大きな慣性質量の値を取ることが分かり、先行研究の手法が不十分であり、この違いが自発核分裂の寿命の評価に大きな影響を与えることを明らかにした。

荷電交換(p, n)反応による ^{11}Li のガモフ・テラー遷移の研究 (平位勇磨、若狭智嗣)

ガモフ・テラー共鳴 (GTR) とアイソバリックアナログ共鳴 (IAR) のエネルギー差 $E_{\text{GTR}} - E_{\text{IAR}}$ は、これらの共鳴の集団運動を支配する核の残留相互作用のスピンアイソスピン部分に敏感である。安定核ではこれらの系統的な研究が行われており、残留相互作用が原子核にほぼよらないことがわかっている。しかしながら、残留相互作用の中性子過剰性、すなわちアイソスピン依存性は不明である。今回研究を行った ^{11}Li は $(N - Z)/A = 0.45$ と非常に中性子過剰な原子核であり、アイソスピン依存性の影響が大きいことが期待される。実験は、理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) で、核子あたり 182.1 MeV の ^{11}Li を用いて、逆運動学の下で (p, n) 反応を測定した。断面積の角度分布から、断面積が角度が大きくなるにつれて小さくなる、つまり $\Delta L = 0$ の角度分布を持つ GTR のピークを世界で初めて同定した。すでに知られている IAR のエネルギーを用いることで、 $E_{\text{GTR}} - E_{\text{IAR}} = -1.5 \pm 0.1(\text{stat}) \pm 0.3(\text{syst})$ MeV と求めた。これは安定核から予想される結果と無矛盾であり、 ^{11}Li のスピンアイソスピンの集団性が安定核のそれと大きく異なることを示唆している。

核子ノックアウト反応による核内核力の解明に向けた反跳陽子スピン測定系の開発 (猪野元大樹、若狭智嗣)

(\bar{p}, pp) 反応における反跳陽子のスピン測定 (偏極移行量 K_{ij} 測定に対応) に向けて陽子偏極度計 (2nd-FPP) の開発を行なっている。現時点での 2nd-FPP のシンチレータの位置分解能の評価のため、宇宙線による軌道再構成のテスト実験を行なった。実験の結果、エネルギー分解能は 1.6 MeV となり、第一励起状態 (4.4 MeV) のピークの分離に十分な精度であることがわかった。しかしながら、位置分解能は不十分であり、新たに MutiWire Drift Chamber (MWDC) を導入することで位置分解能を向上させることを検討した。GEANT4 によるシミュレーションで評価を行なった結果、位置分解能の向上による軌道再構成の精度向上は、 p -C 弾性散乱イベントの分離能力を大きく改善することがわかった。偏極度測定のシミュレーションも行なうため、GEANT4 に核子散乱過程における偏極の効果を取り入れた。その結果、偏極効果としての ϕ 方向の散乱角度分布が正しく実現された。偏極陽子ビームによるシミュレーションから、MWDC を導入すると Figure of Merit が大きく向上し、実験時の測定時間が約 1/3 になることが分かった。

位置感応型ガス検出器を用いた ^{14}C 加速器質量分析系の開発 (笠原妃奈、西畑洸希、若狭智嗣)

加速器質量分析 (Accelerator Mass Spectrometry : AMS) とは、イオン化した試料中の粒子を加速させ、磁場や電場を用いて目的の粒子の識別を行い、検出器でその数を直接測定することで、試料中の極微量の同位体を高精度で計数し同位体比を測定する分析法である。本学の加速器・ビーム応用科学センターでの AMS システムを確立す

るべく、基本となる ^{14}C -AMS の構築に取り組んでいる。本年度は、位置感応型ガス検出器(マルチアノード・イオンチェンバー)を新たに導入した。その AMS システムを用いて、炭素イオンの Ar ガスストリッパ通過後の電荷分布測定、および ^{14}C の存在比が既知の 3 種類の標準試料による炭素同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比、 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比) の測定を通してシステム全体の性能評価を行った。電荷分布測定では、既知の O_2 ガスストリッパを用いた場合と比較した結果、若干のガス種依存性は認められるものの基本的に無矛盾であることが確認された。標準資料を用いた測定では、イオンチェンバーによる入射粒子のエネルギー損失・入射位置の違いから妨害イオンである $^7\text{Li}^{2+}$ などから ^{14}C を分離することに成功し、標準試料との相対値測定を約 7% の精度で行えることが確認された。今後の課題としては、十分な統計精度のデータを取得し、系統誤差の精査などを行なっていく予定である。

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

中性子数 20 付近の中性子過剰な原子核は、その基底状態で球形が予測されるにも関わらず軸対称に変形していることが実験的に示唆されてきたなど、特異な構造が実験的に示唆され注目を集めている。特に本研究で目的としている中性子過剰な Al 同位体では、励起状態で様々な変形状態が共存しているという予測があり、詳細な実験データが待ち望まれている。しかし、スピン・パリティなどの実験データは少なく、ほぼ基底状態のみに限られる。そこで本研究では、原子核のスピンが揃った(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ることにより、その構造解明を目指す。11月にカナダの TRIUMF 研究所において、スピン偏極した ^{31}Mg を生成し、 ^{31}Al の励起状態のスピン・パリティを決定する実験を行なった。実験では、8台の高純度ゲルマニウム検出器およびその前面に配置したプラスチックシンチレータを用いて、ベータ線の空間的非対称およびガンマ線を同時計測した。予備的な解析では、 ^{31}Al の励起状態において 8 つの状態についてスピンを決定することができ、今までに報告されていない新たな状態も発見した。今後、より詳細な解析を行い、ベータ線の空間的非対称の精密化・ガンマ線エネルギーの精密な決定・新たな準位の探索を行う予定である。

$^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_2)$ 反応の角度分布測定 (久保大志、寺西高)

^{12}C の第 2 励起状態の基底状態への対崩壊分岐比 ($\Gamma_{\text{pair}}/\Gamma$) は、重要な天体核反応であるトリプルアルファ反応の反応率の精度を支配しており、その精密測定が求められている。本学タンデム加速器施設で計画している測定実験では $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_2)$ 反応における共鳴を利用して第 2 励起状態を生成する。本年度はそのための基礎データとして、既知の共鳴エネルギー ($E_\alpha = 13.8 \text{ MeV}$) において、過去の測定データが存在しない角度分布の測定を行った。

${}^6\text{Li}+p$ 共鳴散乱および共鳴反応の逆運動学測定 (吉田郭治、寺西高)

RI ビームによる逆運動学散乱・反応の実験手法のテストを本学タンデム加速器施設において安定核ビームを用いて行っている。本年度は、弾性散乱と組み換え反応の励起関数を一つのセットアップで同時に測定する手法を検証することを目的とし、18.2 MeV の ${}^6\text{Li}$ ビームを厚さ 10.3 mg/cm^2 のポリエチレン標的に照射し逆運動学厚い標的法による測定を行った。解析の結果、 ${}^6\text{Li}(p,p)$ および ${}^6\text{Li}(p,\alpha)$ 反応の励起関数が得られ、それぞれ過去の結果とほぼ一致していることが示された。

発表論文

《原著論文》

Swelling of Doubly Magic ${}^{48}\text{Ca}$ Core in Ca isotopes beyond $N = 28$:

M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suzuki, Y. Tanaka, T. Moriguchi, D. S. Ahn, A. Aimaganbetov, M. Amano, H. Arakawa, S. Bagchi, K. H. Behr, N. Burtebayev, K. Chikaato, H. Du, S. Ebata, T. Fujii, N. Fukuda, H. Geissel, T. Hori, W. Horiuchi, S. Hoshino, R. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. Kenzhina, Z. Korkulu, Y. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, K. Ohnishi, M. Ohtake, T. Ohtsubo, S. Omika, H. J. Ong, A. Ozawa, A. Prochazka, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sugihara, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Suzuki, H. Takeda, Y. K. Tanaka, I. Tanihata, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, T. K. Zholdybayev

Phys. Rev. Lett. **124**, 102501 (2020)

Development of an “ α -TOF” detector for correlated measurement of atomic masses and decay properties:

T. Niwase, M. Wada, P. Schury, H. Haba, S. Ishizawa, Y. Ito, D. Kaji, S. Kimura, H. Miyatake, K. Morimoto, K. Morita, M. Rosenbusch, H. Wollnik, T. Shanley, Y. Benari
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **953** (2019) 163198.

TDHF and a Macroscopic Aspect of Low-Energy Nuclear Reactions:

Kouhei Washiyama and Kazuyuki Sekizawa

Frontiers in Physics **8**, 93 (2020).

Physics of even-even superheavy nuclei with $96 < Z < 110$ in the quark-meson-coupling model:

J. R. Stone, K. Morita, P. A. M. Guichon, and A. W. Thomas

Phys. Rev. C **100**, 044302 (2019).

Fusion Reaction $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ Leading to Formation of the Element Ts ($Z = 117$):

J. Khuyagbaatar, A. Yakushev, Ch. E. Düllmann, D. Ackermann, L.-L. Andersson, M. Asai, M. Block, R. A. Boll, H. Brand, D. M. Cox, M. Dasgupta, X. Derkx, A. Di Nitto, K. Eberhardt, J. Even, M. Evers, C. Fahlander, U. Forsberg, J. M. Gates, N. Gharibyan, P. Golubev, K. E. Gregorich, J. H. Hamilton, W. Hartmann, R.-D. Herzberg, F. P. Heßberger, D. J. Hinde, J. Hoffmann, R. Hollinger, A. Hübner, E. Jäger, B. Kindler, J. V. Kratz, J. Krier, N. Kurz, M. Laatiaoui, S. Lahiri, R. Lang, B. Lommel, M. Maiti, K. Miernik, S. Minami, A. Mistry, C. Mokry, H. Nitsche, J. P. Omtvedt, G. K. Pang, P. Papadakis, D. Renisch, J. Roberto, D. Rudolph, J. Runke, K. P. Rykaczewski, L. G. Sarmiento, M. Schädel, B. Schausten, A. Semchenkov, D. A. Schaughnessy, P. Steinegger, J. Steiner, E. E. Tereshatov, P. Thörle-Pospiech, K. Tinschert, T. Torres De Heidenreich, N. Trautmann, A. Türler, J. Uusitalo, D. E. Ward, M. Wegrzecki, N. Wiehl, S. M. Van Cleve, and V. Yakusheva
Phys. Rev. C **99**, 054306 (2019).

Optimization of an Isothermal Gas-chromatographic Setup for the Chemical Exploration of Dubnium (Db, $Z = 105$) Oxychlorides:

N. M. Chiera, T. K. Sato, T. Tomitsuka, M. Asai, Y. Ito, K. Shirai, H. Suzuki, K. Tokoi, A. Toyoshima, K. Tsukada, and Y. Nagame
J. Radioanal. Nucl. Chem. **320**, 633 (2019).

Sensitivity of Charged Particle Activation Analysis for Long-lived Radioactive Nuclide Determination:

M. Oshima, Y. Yamaguchi, M. Asai, K. Tsukada, J. Goto, S. Bamba, C. Bi, and T. Morimoto
J. Nucl. Sci. Technol. **56**, 866 (2019).

New Excited 2^+ and 3^- Two-proton States in $^{210}_{84}\text{Po}_{126}$ Populated by Two-proton Trans-

fer:

E. Dupont, A. Astier, C. M. Petrache, B. F. Lv, I. Deloncle, J. Kiener, R. Orlandi, H. Makii, K. Nishio, K. Hirose, M. Asai, T. K. Sato, K. Tsukuba, Y. Ito, K. R. Kean, R. Yanagihara, and G. Scamps
Phys. Rev. C **101**, 014309 (2020).

Subbarrier fusion reactions of an aligned deformed nucleus:

K. Hagino and S. Sakaguchi
Phys. Rev. C **100**, 064614 (2019).

Structure of ^{13}Be probed via quasi-free scattering:

A.Corsi, Y.Kubota, J.Casal, M.Gomez-Ramos, A.M.Moro, G.Authélet, H.Baba, C.Caesar, D.Calvet, A.Delbart, M.Dozone, J.Feng, F.Flavigny, J.-M.Gheller, J.Gibelin, A.Giganon, A.Gillibert, K.Hasegawa, T.Isobe, Y.Kanaya, S.Kawakami, D.Kim, Y.Kiyokawa, M.Kobayashi, N.Kobayashi, T.Kobayashi, Y.Kondo, Z.Korkulu, S.Koyama, V.Lapoux, Y.Maeda, F.M.Marques, T.Motobayashi, T.Miyazaki, T.Nakamura, N.Nakatsuka, Y.Nishio, A.Obertellia, A.Ohkura, N.A.Orr, S.Ota, H.Otsu, T.Ozaki, V.Panin, S.Paschalis, E.C.Pollacco, S.Reichert, J.-Y.Rousse, A.T.Saito, S.Sakaguchi, M.Sako, C.Santamaria, M.Sasano, H.Sato, M.Shikata, Y.Shimizu, Y.Shindo, L.Stuhl, T.Sumikama, Y.L.Suna, M.Tabata, Y.Togano, J.Tsubota, T.Uesaka, Z.H.Yang, J.Yasuda, K.Yoneda, J.Zenihoro
Physics Letters B **797**, 134843 (2019).

OEDO, the energy-degrading beamline at RI Beam Factory:

Shin'ichiro Michimasa, Jongwon Hwang, Kazunari Yamada, Shinsuke Ota, Masanori Dozone, Nobuaki Imai, Koichi Yoshida, Yoshiyuki Yanagisawa, Kensuke Kusaka, Masao Ohtake, Masafumi Matsushita, Deuk Soon Ahn, Olga Beliuskina, Nobuyuki Chiga, Kazuya Chikaato, Naoki Fukuda, Seiya Hayakawa, Eiji Ideguchi, Kotaro Iribe, Chihiro Iwamoto, Shoichiro Kawase, Keita Kawata, Noritaka Kitamura, Shoichiro Masuoka, Hiroari Miyatake, Daisuke Nagae, Ryo Nakajima, Takashi Nakamura, Keita Nakano, Shunichiro Omika, Hideaki Otsu, Hiroyoshi Sakurai, Philipp Schrock, Hideki Shimizu, Yohei Shimizu, Toshiyuki Sumikama, Xiaohui Sun, Daisuke Suzuki, Hiroshi Suzuki, Motonobu Takaki, Maya Takechi, Hiroyuki Takeda, Satoshi Takeuchi, Takashi Teranishi, Rieko Tsunoda, He Wang, Yukinobu Watanabe, Yutaka X. Watanabe, Kathrin Wimmer, Kentaro Yako, Hidetoshi Yamaguchi, Lei Yang, Hiroya Yoshida, Susumu Shimoura

Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 043D01 (2019)

New Test of Modulated Electron Capture Decay of Hydrogen-Like ^{142}Pm Ions: Precision Measurement of Purely Exponential Decay:

F. C. Ozturk, B. Akkus, D. Atanasov, H. Beyer, F. Bosch, D. Boutin, C. Brandau, P. Bühler, R. B. Cakirli, R. J. Chen, W. D. Chen, X. C. Chen, I. Dillmann, C. Dimopoulou, W. Enders, H. G. Essel, T. Faestermann, O. Forstner, B. S. Gao, H. Geissel, R. Gernhäuser, R. E. Grisenti, A. Gumberidze, S. Hagmann, T. Heftrich, M. Heil, M. O. Herdrich, P.-M. Hillenbrand, T. Izumikawa, P. Kienle, C. Klaushofer, C. Kleffner, C. Kozhuharov, R. K. Knöbel, O. Kovalenko, S. Kreim, T. Kühl, C. Lederer-Woods, M. Lestinsky, S. A. Litvinov, Yu. A. Litvinov, Z. Liu, X. W. Ma, L. Maier, B. Mei, H. Miura, I. Mukha, A. Najafi, D. Nagae, T. Nishimura, C. Nociforo, F. Nolden, T. Ohtsubo, Y. Oktem, S. Omika, A. Ozawa, N. Petridis, J. Piotrowski, R. Reifarth, J. Rossbach, R. A. Sánchez, M. S. Sanjari, C. Scheidenberger, R. S. Sidhu, H. Simon, U. Spillmann, M. Steck, Th. Stöhlker, B. H. Sun, L. A. Susam, F. Suzaki, T. Suzuki, S. Yu. Torilov, C. Trageser, M. Trassinelli, S. Trotsenko, X. L. Tu, P. M. Walker, M. Wang, G. Weber, H. Weick, N. Winckler, D. F. A. Winters, P. J. Woods, T. Yamaguchi, X. D. Xu, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Y. H. Zhang, X. H. Zhou, and the FRS-ESR, ILIMA, SPARC, and TBWD Collaborations

Phys. Lett. B **797** (2019) 134800

Efficiency and timing performance of time-of-flight detector utilizing thin foils and crossed static electric and magnetic fields for mass measurements with Rare-RI Ring facility:

Shinji Suzuki, Akira Ozawa, Daiki Kamioka, Yasushi Abe, Masamichi Amano, Hiroki Arakawa, Zhuang Ge, Kentaro Hiraishi, Yukina Ichikawa, Kumi Inomata, Atsushi Kitagawa, Takaaki Kobayashi, Hong Fu Li, Takuya Matsumoto, Tetsuaki Moriguchi, Momo Mukai, Daisuke Nagae, Sarah Naimi, Shunichiro Omika, Shinji Sato, Yoshiyuki Tajiri, Kiyoshi Wakayama, Takayuki Yamaguchi

Nucl. Instr. and Meth. A **965** (2020) 163807

Observation of a μs isomer in ^{134}In : Proton-neutron coupling “southeast” of ^{132}Sn :

V. H. Phong, G. Lorusso, T. Davinson, A. Estrade, O. Hall, J. Liu, K Matsui, F. Montes, S. Nishimura, A. Boso, P. H. Regan, R. Shearman, Z. Y. Xu, J. Agramunt, J. M. Allmond, D. S. Ahn, A. Algora, H. Baba, N. T. Brewer, C. G. Bruno, R. Caballero-

Folch, F. Calvino, M. Wolińska-Cichočka, G. Cortes, I. Dillmann, C. Domingo-Pardo, A. Gargano, S. Go, C. J. Griffin, R. K. Grzywacz, L. Harkness-Brennan, T. Isobe, A. Jungclaus, D. Kahl, L. H. Khiem, G. Kiss, A. Korgul, S. Kubono, K. Miernik, A. I. Morales, N. Nepal, M. Piersa, Zs. Podolyák, B. C. Rasco, K. P. Rykaczewski, H. Sakurai, Y. Shimizu, D. W. Stacener, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, J. L. Tain, A. Tarifeño-Saldivia, V. Vaquero, P. J. Woods, R. Yokoyama, and R. C. Yuan
Phys. Rev. C **100**, 011302(R) (2019)

Segmented YSO scintillation detectors as a new β -implant detection tool for decay spectroscopy in fragmentation facilities:

R. Yokoyama, M. Singh, R. Grzywacz, A. Keeler, T. T. King, J. Agramunt, N.T. Brewer, S. Go, J. Heideman, J. Liu, S. Nishimura, P. Parkhurst, V. H. Phong, M. M. Rajabali, B.C. Rasco, K. P. Rykaczewski, D.W. Stracener, J. L. Tain, A. Tolosa-Delgado, K. Vaigneur, and M. Wolińska-Cichočka
Nucl. Instr. Meth. A **937**, 93 (2019)

Proton single particle energies next to ^{78}Ni : Spectroscopy of ^{77}Cu via single proton knock-out reaction:

Zs. Vajta, D. Sohler, Y. Shiga, K. Yoneda, K. Sieja, D. Steppenbeck, Zs. Dombrádi. N. Aoi, P. Doornenbal, J. Lee, H. Liu, M. Matsushita, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, P. Bednarczyk, Zs. Fülöp, S. Go, T. Hashimoto, E. Ideguchi, K. Ieki, K. Kobayashi, Y. Kondo, R. Minakata, T. Motobayashi, D. Nishimura, H. Otsu, H. Sakurai, Y. Sun, A. Tamaii, R. Tanaka, Z. Tian, T. Yamamoto, X. Yang, Z. Yang, Y. Ye, R. Yokoyama, and J. Zenihiro
Phys. Rev. C **100**, 011302(R) (2019)

Search for α decay of ^{104}Te with a novel recoil-decay scintillation detector:

Y. Xiao, S. Go, R. Grzywacz, R. Orlandi, A. N. Andreyev, M. Asai, M. A. Bentley, G. de Angelis, C. J. Gross, P. Hausladen, K. Hirose, S. Hofmann, H. Ikezoe, D. G. Jenkins, B. Kindler, R. Léguillon, B. Lommel, H. Makii, H. C. Mazzocchi, K. Nishio, P. Parkhurst, S. V. Paulauskas, C. M. Petrache, K. P. Rykaczewski, T. K. Sato, J. Smallcombe, A. Toyoshima, K. Tsukada, K. Vaigneur, and R. Wadsworth
Phys. Rev. C **100**, 034315 (2019)

Chiral g-matrix folding-model approach to reaction cross sections for scattering of Ca

isotopes on a C target:

Shingo Tagami, Masaomi Tanaka, Maya Takechi, Mitsunori Fukuda, Masanobu Yahiro
Phys. Rev. C **101**, 014620 (2020)

Development of prototype RICH detector with multi-anode photomultipliers for radioactive ions:

M. Machida, D. Nishimura, M. Fukuda, S. Yagi, T. Sugihara, S. Kanbe, S. Yamaoka, M. Takechi, M. Tanaka, M. Amano, J. Chiba, K. Chikaato, H. Du, S. Fukuda, A. Homma, T. Hori, A. Ikeda, R. Ishii, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, R. Kehl, A. Kitagawa, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, A. Mizukami, T. Moriguchi, M. Nagashima, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Ohnishi, T. Ohtsubo, S. Sato, J. Shimaya, T. Suzuki, S. Suzuki, T. Tahara, Y. Tanaka, T. Yamaguchi, R. Yanagihara
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A **931**, 23–28 (2019)

Commissioning of a portable ionization chamber at high counting rate using heavy ion beams:

M.S. Kwag, K.Y. Chae, S.M. Cha, N.N. Duy, K. Iribe, D.H. Kim, M.J. Kim, S. Oka, T. Teranishi, Y. Ueno, H. Yoshida
Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 322 (2019) 579–584.

Elastic scattering for the ^8B and $^7\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ systems at near-Coulomb barrier energies:

M. Mazzocco, N. Keeley, A. Boiano, C. Boiano, M. La Commara, C. Manea, C. Parascondolo, D. Pierroutsakou, C. Signorini, E. Strano, D. Torresi, H. Yamaguchi, D. Kahl, L. Acosta, P. Di Meo, J.P. Fernandez-Garcia, T. Glodariu, J. Grebosz, A. Guglielmetti, Y. Hirayama, N. Imai, H. Ishiyama, N. Iwasa, S.C. Jeong, H.M. Jia, Y.H. Kim, S. Kimura, S. Kubono, G. La Rana, C.J. Lin, P. Lotti, G. Marquinez-Duran, I. Martel, H. Miyatake, M. Mukai, T. Nakao, M. Nicoletto, A. Pakou, K. Rusek, Y. Sakaguchi, A.M. Sanchez-Benitez, T. Sava, O. Sgouros, V. Soukeras, F. Soramel, E. Stiliaris, L. Stroe, T. Teranishi, N. Toniolo, Y. Wakabayashi, Y.X. Watanabe, L. Yang, Y.Y. Yang, H.Q. Zhang
Physical Review C 100, 024602 (2019).

g Factor of the ^{99}Zr ($7/2^+$) Isomer: Monopole Evolution in the Shape-Coexisting Region:

F. Boulay, G.S. Simpson, Y. Ichikawa, S. Kisyov, D. Bucurescu, A. Takamine, D.S. Ahn, K. Asahi, H. Baba, D.L. Balabanski, T. Egami, T. Fujita, N. Fukuda, C. Funayama, T. Furukawa, G. Georgiev, A. Gladkov, M. Hass, K. Imamura, N. Inabe, Y. Ishibashi, T. Kawaguchi, T. Kawamura, W. Kim, Y. Kobayashi, S. Kojima, A. Kusoglu, R. Lozeva, S. Momiyama, I. Mukul, M. Niikura, H. Nishibata, T. Nishizaka, A. Odahara, Y. Ohtomo, D. Ralet, T. Sato, Y. Shimizu, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, L.C. Tao, Y. Togano, D. Tominaga, H. Ueno, H. Yamazaki, X.F. Yang, J.M. Daugas

Phys. Rev. Lett. **124**, 112501 (2020).

How Different is the Core of ^{25}F from $^{24}\text{O}_{g.s.}$?:

T.L. Tang, T. Uesaka, S. Kawase, D. Beaumel, M. Dozono, T. Fujii, N. Fukuda, T. Fukunaga, A. Galindo-Uribarri, S.H. Hwang, N. Inabe, D. Kameda, T. Kawahara, W. Kim, K. Kisamori, M. Kobayashi, T. Kubo, Y. Kubota, K. Kusaka, C.S. Lee, Y. Maeda, H. Matsubara, S. Michimasa, H. Miya, T. Noro, A. Obertelli, K. Ogata, S. Ota, E. Padilla-Rodal, S. Sakaguchi, H. Sakai, M. Sasano, S. Shimoura, S.S. Stepanyan, H. Suzuki, M. Takaki, H. Takeda, H.T. Okieda, T. Wakasa, T. Wakui, K. Yako, Y. Yanagisawa, J. Yasuda, R. Yokoyama, K. Yoshida, K. Yoshida, J. Zenihiro

Phys. Rev. Lett. **124**, 212502 (2020).

Study of spin-isospin responses of radioactive nuclei with the background-reduced neutron spectrometer, PANDORA:

L. Stuhl, M. Sasano, J. Gao, Y. Hirai, K. Yako, T. Wakasa, D.S. Ahn, H. Baba, A.I. Chilug, S. Franchoo, Y. Fujino, N. Fukuda, J. Gibelin, I.S. Hahn, Z. Halsz, T. Harada, M.N. Harakeh, D. Inomoto, T. Isobe, H. Kasahara, D. Kim, G.G. Kiss, T. Kobayashi, Y. Kondo, Z. Korkulu, S. Koyama, Y. Kubota, A. Kurihara, H.N. Liu, M. Matsumoto, S. Michimasa, H. Miki, M. Miwa, T. Motobayashi, T. Nakamura, M. Nishimura, H. Otsu, V. Panin, S. Park, A.T. Saito, H. Sakai, H. Sato, T. Shimada, Y. Shimizu, S. Shimoura, A. Spiridon, I.C. Stefanescu, X. Sun, Y.L. Sun, H. Suzuki, E. Takada, Y. Togano, T. Tomai, L. Trache, D. Tudor, T. Uesaka, H. Yamada, Z. Yang, M. Yasuda, K. Yoneda, K. Yoshida, J. Zenihiro, and N. Zhang

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **463**, 189 (2020).

Development of a neutron detector with a high position resolution at intermediate energies:

Y. Kubota, M. Sasano, T. Uesaka, M. Dozono, M. Itoh, S. Kawase, M. Kobayashi, C.S. Lee, H. Matsubara, K. Miki, H. Miya, Y. Ono, S. Ota, K. Sekiguchi, T. Shima, T. Taguchi, T.L. Tang, H. Tokieda, T. Wakasa, T. Wakui, J. Yasuda, and J. Zenihiro Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **914**, 32 (2019).

《その他の論文》

First Demonstration of Mass Measurements for Exotic Nuclei using Rare-RI Ring:
D. Nagae, S. Omika, Y. Abe, Y. Yamaguchi, F. Suzuki, K. Wakayama, N. Tadano, R. Igosawa, K. Inomata, H. Arakawa, K. Nishimuro, T. Fujii, T. Mitsui, T. Yamaguchi, T. Suzuki, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, A. Ozawa, S. Naimi, Z. Ge, Y. Yanagisawa, H. Baba, S. Michimasa, S. Ota, G. Lorusso, Y. A. Litvinov, M. Wakasugi, T. Uesaka, and Y. Yano
Proceedings of International STORI2017, accepted

MRTOF+ α -ToF を用いた ^{207}Ra の質量-崩壊特性測定:
庭瀬暁隆, 和田道治, P. Schury, 伊藤由太, 木村創大, 加治大哉, M. Rosenbusch, 渡辺裕, 平山賀一, 宮武宇也, J. Y. MOON, 石山博恒, 森本幸司, 羽場宏光, 田中泰貴, 石澤倫, 高峰愛子, 森田浩介, H. Wollnik
日本放射化学会誌 第 41 号 2020 年 3 月.

New energy-degrading beamline for in-flight RI beams, OEDO:
S. Michimasa, N. Imai, M. Dozono, J.W. Hwang, K. Yamada, S. Ota, K. Yoshida, Y. Yanagisawa, K. Kusaka, M. Ohtake, M. Matsushita, D.S. Ahn, O. Beliuskina, N. Chiga, K. Chikaato, N. Fukuda, S. Hayakawa, E. Ideguchi, K. Iribe, C. Iwamoto, S. Kawase, K. Kawata, N. Kitamura, S. Masuoka, H. Miyatake, D. Nagae, R. Nakajima, T. Nakamura, K. Nakano, S. Omika, H. Otsu, H. Sakurai, P. Schrock, H. Shimizu, Y. Shimizu, T. Sumikama, X. Sun, D. Suzuki, H. Suzuki, M. Takaki, M. Takechi, H. Takeda, S. Takeuchi, T. Teranishi, R. Tsunoda, H. Wang, Y. Watanabe, Y.X. Watanabe, K. Wimmer, K. Yako, H. Yamaguchi, L. Yang, H. Yoshida, S. Shimoura Nucl. Instr. and Meth. B **463** (2020) 143-147

Development of a new in-ring beam monitor in the Rare-RI Ring:
S. Omika, T. Yamaguchi, N. Tadano, Y. Abe, M. Amano, Z. Ge, D. Kamioka, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Naimi, A. Ozawa, F. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Wakayama, Y. Yamaguchi

Nucl. Instr. and Meth. B **463** (2020) 241-243

Studying the exotic decay $^{70}\text{Kr} \rightarrow ^{70}\text{Br}$:

A. Vitéz-Sveiczler, A. Algora, A. I. Morales, B. Rubio, G. G. Kiss, G. de Angelis, F. Recchia, S. Nishimura, J. Agramunt, V. Guadilla, A. Montaner-Pizá, S. E.A. Orrigo, A. Horváth, D. Napoli, S. Lenzi, A. Boso, V. H. Phong, J. Wu, P. A. Söderström, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, D. S. Ahn, H. Baba, P. Doornenbal, N. Fukuda, N. Inabe, T. Isobe, T. Kubo, S. Kubono, H. Sakurai, Y. Shimizu, S. Chen, B. Blank, P. Ascher, M. Gerbaux, T. Goigoux, J. Giovinazzo, S. Grévy, T. Kurtukián Nieto, C. Magron, W. Gelletly, Z. Dombrádi, Y. Fujita, M. Tanaka, P. Aguilera, F. Molina, J. Eberth, F. Diel, D. Lubos, C. Borcea, E. Ganioglu, D. Nishimura, H. Oikawa, Y. Takei, S. Yagi, W. Korten, G. De France, P. Davies, J. Liu, J. Lee, T. Lokotko, I. Kojouharov, N. Kurz, H. Shaffner

Acta Physica Polonica B **51**, 587–594 (2020)

Beta-NMR of short-lived nucleus ^{17}N in liquids:

Mototsugu Mihara, Takanobu Sugihara, Mitsunori Fukuda, Akira Homma, Takuji Izumikawa, Atsushi Kitagawa, Kensaku Matsuta, Tadanori Minaisono, Sadao Momota, Takashi Nagatomo, Hiroki Nishibata, Daiki Nishimura, Kosuke Ohnishi, Takashi Ohtsubo, Akira Ozawa, Shinji Sato, Masaomi Tanaka, Ryo Wakabayashi, Shoichi Yagi, Rikuto Yanagihara

Hyperfine Interactions **240**, 113 (2019)

Beta decay of the $T_z = -2$ nucleus ^{64}Se and its descendants:

B. Rubio, P. Aguilera, F. Molina, J. Agramunt, A. Algora, V. Guadilla, A. Montaner-Pizá, A. I. Morales, S. E.A. Orrigo, W. Gelletly, B. Blank, P. Asher, M. Gerbaux, J. Giovinazzo, S. Grevy, T. Kurtukian, C. Magron, J. Chiba, D. Nishimura, H. Oikawa, Y. Takei, S. Yang, D. S. Ahn, P. Doornenbal, N. Fukuda, N. Inabe, G. Kiss, T. Kubo, S. Kubono, S. Nishimura, Y. Shimizu, C. Sidong, P. A. Söderström, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, P. Vi, J. Wu, Y. Fujita, M. Tanaka, F. Diel, D. Lubos, G. De Angelis, D. Napoli, C. Borcea, A. Boso, R. B. Cakirli, E. Ganioglu, G. De France, S. Go

Journal of Physics: Conference Series **1308**, 012018 (2019)

^{67}Kr two-proton radioactivity: Results and theoretical interpretations:

T. Goigoux, P. Ascher, B. Blank, M. Gerbaux, J. Giovinazzo, S. Grévy, T. Kurtukian Nieto, C. Magron, D. S. Ahn, P. Doornenbal, N. Fukuda, N. Inabe, G. Kiss, T. Kubo, S. Kubono, S. Nishimura, H. Sakurai, Y. Shimizu, C. Sidong, P. A. Söderström, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, P. Vi, J. Wu, Y. Fujita, M. Tanaka, J. Agramunt, A. Algora, V. Guadilla, A. Montaner-Piza, A. I. Morales, S. E.A. Orrigo, B. Rubio, W. Gelletly, P. Aguilera, F. Molina, F. Diel, D. Lubos, G. de Angelis, D. Napoli, C. Borcea, A. Boso, R. B. Cakirli, E. Ganioglu, J. Chiba, D. Nishimura, H. Oikawa, Y. Takei, S. Yagi, K. Wimmer, G. De France, S. Go, B. A. Brown
acta Physica Polonica B **50**, 399 (2019)

原子核のかたちから核図表をみる:

中務孝、江幡修一郎、鷺山広平

日本原子力学会誌 61 巻 8 号 p. 610 (2019)

講演

《 海外での講演 》

Superheavy element search at RIKEN (招待講演):

K. Morita

The 4th International Symposium on Superheavy Elements, December 1-5, 2019, Hakone, Japan

Spontaneous Fission Studies for Neutron-rich Fm and Lr Isotopes:

M. Asai, K. Tsukada, K. Hirose, A. Toyoshima, T. Tomitsuka, N. M. Chiera, Y. Ito, H. Makii, Y. Nagame, K. Nishio, R. Orlandi, K. K. Ratha, T. K. Sato, H. Suzuki, K. Tokoi, M. J. Vermeulen, R. Yanagihara, I. Nishinaka, H. Kamada, M. Shibata, S. Goto, H. Hirose, H. Hayashi, M. Sakama, and A. N. Andreyev

TAN 19: 6th International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements, 25–30 August 2019, Wilhelmshaven, Germany.

Spontaneous Fission Measurements for Neutron-rich Fm and Lr Isotopes Using ^{254}Es Target:

M. Asai, K. Tsukada, K. Hirose, A. Toyoshima, T. Tomitsuka, N. M. Chiera, Y. Ito, H. Makii, Y. Nagame, K. Nishio, R. Orlandi, K. K. Ratha, T. K. Sato, H. Suzuki,

K. Tokoi, M. J. Vermeulen, R. Yanagihara, I. Nishinaka, H. Kamada, M. Shibata, S. Goto, H. Hirose, H. Hayashi, M. Sakama, and A. N. Andreyev
SHE2019: The 4th International Symposium on Superheavy Elements, 1–5 December 2019, Hakone, Japan.

Spectroscopy and Fission studies for Heavy- and Superheavy Nuclei at JAEA Tandem Accelerator:

M. Asai

JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight Program “Nuclear Physics in the 21st Century” Joint Kickoff Meeting, 6–7 December 2019, Kobe, Japan.

Fission mechanism studies using actinide materials including ^{254}Es :

M. Asai

Seminar, 11 December 2019, Oak Ridge National Laboratory, USA.

Isospin-generalized proton elastic scattering as a probe for isovector nucleon density distribution (招待講演):

S. Sakaguchi

9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM), Oct. 2019., DaNang, Vietnam

Research Center for SuperHeavy Elements at Kyushu University:

S. Sakaguchi

nSHE RG collaboration meeting 2019, 30-31 May. 2019, OakRidge National Laboratory, US.

Perspective in the Super Heavy Element Research:

S. Sakaguchi

JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight Program “Nuclear Physics in the 21st Century”, Nuclear Structure & Nuclear Reaction Joint Kickoff Meeting, 6—7 Dec. 2019., Kobe, Japan.

Data Analysis II:

Shintaro Go

nSHE RG Collaboration Meeting, 30-31 May 2019, Oak Ridge, US.

Fusion barrier distribution for reaction between two deformed nuclei via quasi-elastic back-scattering measurement:

M. Tanaka,

International Symposium on Superheavy Elements (SHE2019), 1-5 December 2019, Hakone, Japan.

Remarkable growth in matter radii of Ca isotopes across neutron magic number $N=28$ via interaction cross section measurements:

M. Tanaka,

International Nuclear Physics Conference 2019 (INPC2019), 29 July - 2 August 2019, Glasgow, UK.

Excitation modes and collective mass from Skyrme energy density functional:

Kouhei Washiyama and Takashi Nakatsukasa,

INPC2019, July 29-August 2, 2019, Glasgow, United Kingdom

Heavy-ion fusion and fission dynamics relevant to the synthesis of superheavy elements:

Kouhei Washiyama,

RIBF Users Meeting 2019, September 3-4, 2019, RIKEN, Japan

Toward reliable framework for collective inertia along fission path:

Kouhei Washiyama,

China-Japan Collaboration Workshop on “Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process”, October 10-12, 2019, ITP/CAS, China

Collective inertia along the fission path from Skyrme-QRPA:

Kouhei Washiyama and Takashi Nakatsukasa,

The 4th International Symposium on Superheavy Elements, December 1-5, 2019, Hakone, Japan

Fusion and fission dynamics with density functional theory:

Kouhei Washiyama,

Japan-France Joint workshop on “Clusters in quantum systems: from atoms to nuclei and hadrons”, January 27-31, 2020, Kyushu University, Japan

Correlation measurement of precision mass and decay properties of nuclei via MRTOF-MS with α -ToF detector:

T. Niwase, M. Wada, P. Schury, Y. Ito, D. Kaji, M. Rosenbusch, Y. X. Watanabe, Y. Hirayama, J.Y. MOON, H. Ishiyama, T. Tanaka, A. Takamine, S. Kimura, K. Morimoto, H. Haba, S. Ishizawa, K. Morita, H. Miyatake, H. Wollnik

4th International Symposium on Superheavy Elements, Hakone, Japan, 2019/12/4

Development and first results from a novel “ α -TOF” detector used with a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph (poster):

T. Niwase, M. Wada, P. Schury, Y. Ito, S. Kimura, D. Kaji, M. Rosenbusch, Y. X. Watanabe, Y. Hirayama, H. Miyatake, J. Y. Moon, H. Ishiyama, K. Morimoto, H. Haba, T. Tanaka, S. Ishizawa, A. Takamine, K. Morita and H. Wollnik

6th International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements, Wilhelmshaven, Germany, 2019/8

Development of fast timing implantation detector for superheavy-element research (poster):

K. Shirasaka, S. Go, S. Sakaguchi, R. Grzywacz, M. Higashi, T. Kai, A. Keeler, T. King, J. Matsuo, T. Muto, Y. Nagata, M. Osada, M. Singh, Y. Sukekawa, M. Tanaka, T. Tomimats and K. Morita

The 4th International Symposium on Superheavy Elements, December 1-5, 2019, Hakone, Japan

EC - decay spectroscopy of neutron - deficient nuclei ^{234}Am and ^{234m}Np (poster):

Y. Sukekawa, H. Kamada, M. Asai, A. N. Andreyev, K. Fujita, S. Go, K. Hirose, Y. Ito, H. Makii, A. Mitsukai, K. Morita, Y. Nagame, K. Nishio, T. Niwase, R. Orlandi, A. Osa, S. Sakaguchi, M. Sakama, D. Sato, T. K. Sato, M. Shibata, F. Suzaki, H. Suzuki, M. Tanaka, K. Tokoi, T. Tomitsuka, A. Toyoshima and K. Tsukada

The 4th International Symposium on Superheavy Elements, December 1-5, 2019, Hakone, Japan

Development of MCP ToF Detectors at Kyushu University (poster):

I. Murakami, S. Sakaguchi, M. Tanaka, D. Nagae, S. Adachi, K. Bando, K. Fujita, S. Go, M. Higashi, S. Ishizawa, T. Kai, D. Kaji, J. Matsuo, K. Morimoto, T. Muto, Y.

Nagata, N. Naito, T. Niwase, M. Osada, K. Shirasaka, Y. Suekawa, T. Tomimatsu and K. Morita

The 4th International Symposium on Superheavy Elements, December 1-5, 2019, Hakone, Japan

Measurement of ${}^6\text{Li} + {}^{51}\text{V}$ fusion barrier distribution at Kyushu University (poster):

N. Naito, M. Tanaka, S. Sakaguchi, S. Go, K. Washiyama, M. Higashi, T. Kai, J. Matsuo, I. Murakami, T. Muto, Y. Nagata, M. Osada, K. Shirasaka, Y. Suekawa, T. Tomimatsu and K. Morita

The 4th International Symposium on Superheavy Elements, December 1-5, 2019, Hakone, Japan

《国内での講演》

新元素の探索:

森田浩介

全国高等学校総合文化祭、2019年7月29日、佐賀総文

超重元素合成のための核融合反応機構の初歩:

森田浩介

第58回核化学夏の学校、2019年9月11-14日、由布院

新元素の探索:

森田浩介

錯体化学討論会、2019年9月21日、名古屋大

新元素の探索:

森田浩介

日本放射化学学会第63回討論会、2019年9月25日、福島県いわき市いわき産業創造館

新元素の探索:

森田浩介

サイエンスカフェ IN SAGA、2019年9月28日、佐賀県立九州シンクロ光研究センター

新元素の探索:

森田浩介

埼玉大学むつめ祭、2019年11月2日、埼玉大

新元素の探索:

森田浩介

発明科学セミナー、2019年11月16日、大分県試験研究機関

新元素の探索:

森田浩介

福井県サイエンスフェスタ、2020年2月11日、福井市 AOSSA

新元素・新同位体合成の実験的研究:

坂口聡志

近畿大学セミナー、2019年6月7日、近畿大学

九州大学 超重元素研究センター (RCSHE) の紹介:

坂口聡志

第58回核化学夏の学校、2019年9月11-14日、由布院

重元素領域の新同位体生成法の開拓と核反応機構研究:

坂口聡志

日本物理学会 2019年秋季大会、2019年9月17-20日、山形大学

Current status of search for element 119:

坂口聡志

2019 Symposium on Nuclear Data、2019年11月28-30日、九州大学

“Proton resonant scattering in inverse kinematics with low-energy beams”:

T. Teranishi

Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets, Dec. 19,
Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University.

核図表のなかの砥石:

郷慎太郎

第三回若手放談会、2020年2月19-21日、理化学研究所神戸キャンパス（兵庫県）

スピン偏極 Mg のベータ崩壊を用いた中性子過剰な Al 同位体の構造研究:

西畑洸希

日本物理学会第75回年次大会、2020年3月16日、名古屋大学

Ca 同位体の中性子剥離全断面積測定:

田中聖臣

日本物理学会第75回年次大会、2020年03月16日、名古屋大学（愛知県）

中性子魔法数 28 近傍 Ca 同位体の中性子スキン厚:

田中聖臣

UTTAC セミナー、2019年10月21日、筑波大学（茨城県）

原子核密度汎関数法に基づいた超重核の生成、核分裂の記述:

鷲山広平

基研研究会「原子核物理でつむぐ r プロセス」、2019年5月24日、京都大学、京都

超重元素領域における核融合・核分裂反応:

鷲山広平

近畿大学大学院総合理工学研究科 学際研究・課外セミナー、2019年6月6日、近畿大学、東大阪

Collective inertia along fission path by finite amplitude method:

Kouhei Washiyama

The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model, 2019年9月6日、尖閣壮、佐渡

核分裂経路上での集団慣性質量の記述:

鷲山広平、中務孝

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019年9月19日、山形大学、山形

超重元素合成に関わる核融合・核分裂反応機構:

鷲山広平

理研-九大ジョイントワークショップ「数理が紡ぐ素粒子・原子核・宇宙」、2019年12

月 24 日、九州大学、福岡

核分裂における集団慣性質量と一粒子構造の動的変化:

鷲山広平、日野原伸生、中務孝

日本物理学会第 75 回年次大会 (現地開催中止)、2020 年 3 月 16 日、名古屋大学、名古屋

九大タンデムにおける ZnS(Ag)+LYSO 検出器の軽イオン識別能の評価:

永田優斗、郷慎太郎、高久圭二、長田茉莉、甲斐民人、坂口聡志、佐藤朗、白坂和也、富松太郎、内藤夏樹、西川凌、松尾仁、宮元幸一郎、武藤大河、森田浩介

第 125 回日本物理学会九州支部例会、2019 年 11 月 30 日、佐賀大学

YSO シンチレータの低エネルギーイオンに対する発光特性:

武藤大河、白坂和也、森田浩介、坂口聡志、郷慎太郎、田中聖臣、末川慶英、長田茉莉、内藤夏樹、東聖人、村上郁斗、永田優斗、富松太郎、甲斐民人、松尾仁

第 125 回日本物理学会九州支部例会、2019 年 11 月 30 日、佐賀大学

「 ${}^6\text{Li}+p$ 逆運動学共鳴散乱の測定」:

吉田郭治、寺西高、久保大志

第 125 回日本物理学会九州支部例会、2019 年 11 月 30 日、佐賀大学

「スピン偏極 Mg ビームを用いた中性子過剰 Al の構造研究」:

野友哉、西畑洗希、小田原厚子、下田正、前島大樹、大上能弘、大谷優里花、飯村俊、金谷晋之介、畠山温、浅川寛太、関口直太、平山賀一、若狭智嗣、Levy, Pearson, Lassen, Li

第 125 回日本物理学会九州支部例会、2019 年 11 月 30 日、佐賀大学

Study of Gamow-Teller states in neutron-rich ${}^{11}\text{Li}$:

Yuma Hirai

The 18th CNS International Summer School (CNSSS19), Aug. 21–27, 2019, Tokyo.

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部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)

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

室温超偏極陽子を用いた新しい不安定核分光法の開発

研究代表者：坂口聡志

基盤研究 (B) 「トリプルアルファ反応率の精密決定」 (寺西高 2019～2021 年度)

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

九州大学 QR プログラム・わかばチャレンジ

密度汎関数法による超重元素領域の核分裂反応機構の解明

研究代表者：鷺山広平

他大学での研究と教育

浅井雅人：筑波大学大学院数理物質科学研究科, 集中講義, 2019 年 6 月 26 日

浅井雅人：名古屋大学アイソトープ総合センター, 講義及びセミナー, 2019 年 7 月 2 日

学部 4 年生卒業研究

甲斐民人：(指導教員、郷慎太郎)：インプランテーション検出器開発に向けた YSO + FOP 検出器の位置分解能評価

富松太郎：(指導教員、坂口聡志)：気体中を飛行する重イオンの平均平衡電荷によるイオン化ポテンシャルの推定

永田 優斗：(指導教員、郷慎太郎)：九州大学タンデム加速器における ZnS(Ag)-LYSO 検出器の軽イオン識別能の評価

松尾仁：(指導教員、郷慎太郎)：九大タンデム加速器を用いた YSO シンチレータの発光特性の評価

武藤大河：(指導教員、郷慎太郎)：YSO シンチレータにおける粒子弁別のための波形解析法

後藤 滉一：(指導教員、寺西高)：低エネルギー ^{12}C ビームの薄膜による多重散乱の測定

中島 優人：(指導教員、寺西高)： $^{12}\text{C}+\alpha$ 弾性散乱の角度分布の測定

山田 智哉：(指導教員、寺西高)：ビーム分析電磁石用磁場モニターの開発

足立 智輝：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：位置感応型ガス検出器を用いた ^{14}C 加速器質量分析系の開発

米村 千恵子：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：位置感応型ガス検出器を用いた ^{14}C 加速器質量分析系の開発

修士論文

白坂和也：(指導教員、郷慎太郎、坂口聡志、森田浩介)：インプランテーション検出器開発に向けた YSO シンチレータの発光特性の評価

末川慶英：(指導教員、浅井雅人、郷慎太郎、坂口聡志、森田浩介)： ^{234}Pu の励起状態と ^{234}Np の核異性体の核分光学的研究

吉田郭治：(指導教員、寺西高)： $^6\text{Li}+p$ 共鳴散乱および共鳴反応の逆運動学測定

平位勇磨：(指導教員、若狭智嗣)：荷電交換 (p, n) 反応による ^{11}Li のガモフ・テラー遷移の研究

猪野元大樹：(指導教員、若狭智嗣)：核子ノックアウト反応による核内核力の解明に向けた反跳陽子スピン測定系の開発

笠原妃奈：(指導教員、若狭智嗣・西畑洗希)：位置感応型ガス検出器を用いた ^{14}C 加速器質量分析系の開発

学外での学会活動

- 森田浩介： SHE2019 Honorary Chair of Local Organizing Committee
nSHE Research Group Management Board Member
TAN19 International Advisory Committee
- 若狭智嗣： 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
- 浅井雅人： 日本放射化学会第 63 回討論会 (2019) 実行委員
SHE2019 Local Organizing Committee
- 寺西高 日本物理学会九州支部委員
- 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
日本の核物理の将来レポート編集委員
SHE2019 Local Organizing Committee
核化学夏の学校 現地世話人
FUSION2020 Program Committee
- 郷慎太郎： SHE2019 Local Organizing Committee

その他の活動と成果

「国際周期表年 2019 閉会式への参加」(森田浩介、浅井雅人、坂口聡志、郷慎太郎、鷲山広平、田中聖臣、庭瀬暁隆、白坂和也、末川慶英、内藤夏樹、村上郁斗)
メンデレーエフによる元素の周期律の発見から 150 年にあたる年として、UNESCO は 2019 年を「国際周期表年」と宣言した。パリでの開会式の後、世界各国で元素をテーマとした無数のイベント(国際会議、講演会、展示、子ども向けイベント等)が開催され、特に一般社会へ向けた基礎科学の発信という意味で大きな社会貢献が果たされた。2019 年 12 月 5 日には東京で閉会式(UNESCO 承認の IUPAC 公式行事)が執り行われ、実験核物理研究室から 11 名が参加した。森田教授がニホニウムの発見グループを代表して登壇、スピーチを行い、閉会式参加者一同で周期表第 7 周期の完成を祝った。当日の写真・動画は以下の URL で公開されている。

<https://iypt.jp/en/galleries.html> <https://iypt.jp/en/videos.html>

日本放射化学会第 63 回討論会 木村賞 受賞 (2019. 9. 25) 「113 番超重元素の発見によ

る放射化学の発展への貢献」(森田浩介)

取材対応・掲載：株式会社ニュートンプレス Newton 式超図解『最強に面白い周期表』
2019年7月発売(森田浩介)

取材対応・掲載：毎日新聞 2019.8月 科学面 周期律を発見した150周年周期表の特
集記事(森田浩介)

取材対応・掲載：東京書籍 株式会社 中学理科 2年 2021年度刊行(森田浩介)

取材対応・掲載：啓林館 高校理科 化学基礎 2022年度刊行(森田浩介)

理化学研究所、九州大学、新潟大学、大阪大学、東京都市大学にてプレスリリース発
表「急激に膨れる原子核ーカルシウム同位体で見つかった異常な核半径増大現象ー」
2020年03月13日(田中聖臣)

科学新聞に研究成果が掲載「カルシウム48を超えた領域で突然起きる異常な構造変化」
科学新聞 3771号、2020年03月27日(田中聖臣)

日本放射化学会 第63回討論会における発表“MRTOF+ α -ToF を用いた ^{207}Ra の質量-
崩壊特性測定”に対して、若手優秀発表賞を受賞(庭瀬暁隆)

素粒子実験研究室

研究室構成員

川越 清以 教授

東城 順治 准教授 吉岡 瑞樹 (RCAPP) 准教授

織田 勲 助教 音野 瑛俊 (RCAPP) 助教 末原 大幹 助教

《 博士研究員 》

山中 隆志 (RCAPP、特任助教) 小林 大 (特任助教)

《 大学院 博士課程 》

大石 航 調 翔平 中居 勇樹 角 直幸

高田 秀佐 古賀 淳 関谷 泉 山口 尚輝 竹内 佑甫 野口 恭平

宮崎 祐太

《 大学院 修士課程 》

眞玉 将豊 上杉 悠人 川島 僚介 佐田 智也

出口 遊斗 牧瀬 壮 彌吉 拓哉 Hernandez Barahona Jocsan Ariel

来見田 将大 後藤 輝一 莊司 大志 松本 岳 矢野 浩大 姚 舜禹 (後期)

《 学部 卒業研究生 》

岩下 侑太郎 岩津 祐輝 久原 真美 嶋津 省吾

濱住 周斗 松崎 俊 宮川 侑樹 (前期)

《 研究生 》

姚 舜禹 (前期)

担当授業

- 川越
基幹物理学 IA (前期)×2、物理学ゼミナール (後期)
- 東城
国際科学特論 I (春学期)、物理学ゼミナール (後期)、素粒子物理学 (後期)
- 吉岡
数値計算法 (後期)、原子核・高エネルギー実験学 (後期)

- 織田
物理学総合実験 (通年)、基礎物理学実験 (後期)
- 末原
自然科学総合実験 (後期)、基礎物理実験学 (後期)

研究・教育目標と成果

CERN 研究所 LHC 加速器における ATLAS 実験 (川越 清以、東城 順治、織田 勸、音野 瑛俊、小林 大、調 翔平、山口 尚輝、宮崎 祐太、彌吉 拓哉、Hernandez Barahona Jocsan Ariel、荘司 大志、姚 舜禹)

スイス・ジュネーブ郊外にある欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、ATLAS 実験を推進している。LHC 加速器では、2015 年から重心系エネルギー 13 TeV での運転を再開し、2018 年に実験第二期である Run2 を完了した。2018 年 1 月からは、加速器整備・検出器アップグレードのため、約 3 年間のシャットダウン期間を設ける。その後、2022 年から現行計画の最終段階である第三期 Run3 を遂行し、大規模な加速器増強・検出器アップグレードを経て、2027 年からさらにエネルギーフロンティア物理を推進する計画である。今年度は、Run2 におけるシリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良、ヒッグス粒子の性質の研究、新粒子の探索、検出器アップグレード計画を遂行した。

- **シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良** (東城 順治、織田 勸、音野 瑛俊、調 翔平、山口 尚輝)

ビーム衝突点から発生する多数の荷電粒子の検出において、ATLAS 検出器最内層に配置した内部飛跡検出器が重要な役割を果たす。我々のグループは、内部飛跡検出器の 1 つであるシリコン半導体飛跡検出器 (Semiconductor Tracker : SCT) の運転に精力的に取り組んできた。SCT 検出器の運転に参加する国内研究機関の中で、九州大学は唯一スタッフが CERN に常駐する大学である。2013 年までは東城が国内研究機関が連携して研究を進める上での中心となり、それ以降は音野がその役割を引き継いでいる。音野は、2013 年 11 月より SCT data quality coordinator を務め、2015 年から始まった LHC の運転においてビーム衝突時における SCT 検出器の性能評価を行い、順調なデータ取得を実現した。2016 年 2 月から、織田が SCT 検出器の offline software coordinator を務め、検出器ソフトウェア全般において責任を持っている。Run3 において計算機資源を効率的に使うために、SCT のソフトウェアのマルチスレッド化に取り組み、ATLAS 検出器を構成する検出

器群のうちで最初に完了させた。音野は 2016 年 6 月から SCT 検出器の副運転責任者、2017 年 1 月から 10 月まで運転責任者を務めた。2018 年末までの Run2 において、LHC の単位時間あたりの陽子同士の同時衝突数（瞬間輝度）は $21.0 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ に到達し、設計値 $10 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ を大きく超えて、3 年間で 156 fb^{-1} のデータを供給した。検出器にとっては厳しい環境の中、SCT が原因で取得できなかったデータの割合は 0.1% 以下、取得データのうち SCT の問題で物理解析に使用できなかった割合も 0.1% 以下に留めることができた。ATLAS 実験全体としてのこれらの割合は、5.7% 及び 5.4% であることから SCT が優れた性能を発揮できていることがわかる。Run3 における SCT の安定した運転を目指し、2019 年から様々な活動を開始した。今後の放射線損傷を踏まえた運転計画の策定、SCT の性能の変化を早急に検知し原因を突き止めるためのツール開発、データの物理解析への使用の可否を決める基準の再考などを進めている。我々のグループは、今後も引き続き SCT 検出器に高い性能を発揮させるべく、その運転に大きく貢献してゆく予定である。

- **ヒッグス粒子の性質の研究** (織田 勸)

ヒッグス粒子が Z 粒子対に崩壊し、各 Z 粒子がレプトン (ℓ 、電子またはミューオン) 対に崩壊する、4 レプトンチャンネル ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$) には背景事象が少なく、ヒッグス粒子を完全に再構成できるという利点がある。織田は DAOD と呼ばれる解析用データの作成を担当した。2018 年 10 月までに取得した積分ルミノシティ 139 fb^{-1} の重心系エネルギー 13 TeV のデータを用いた解析結果を 2019 年 7 月にヨーロッパ物理学会 (EPS-HEP2019) において織田が初めて公表した。4 レプトンチャンネルでは、4 レプトンの質量が $115 \text{ GeV} < m_{4\ell} < 130 \text{ GeV}$ の範囲に 316 事象を観測した。 ZZ^* への崩壊分岐比を含めた、ヒッグス粒子のグルーオン融合過程による生成断面積は $1.15 \pm 0.13 \text{ pb}$ であり、素粒子の標準模型に基づく理論計算の結果 $1.17 \pm 0.08 \text{ pb}$ と不定性の範囲内で一致した。ベクトルボソン融合過程による生成断面積の観測値は $130 \pm 45 \text{ fb}$ であり、理論値 $92.0 \pm 3.1 \text{ pb}$ と不定性の範囲内で一致した。4 レプトンの横運動量やジェットの数の微分生成断面積の観測値も理論値と良い一致を示した。

- **新粒子の探索** (織田 勸、音野 瑛俊、調 翔平、山口 尚輝)

ヒッグス粒子の発見によって素粒子標準模型から未発見粒子は無くなったが、謎は依然として多く残されている。一例として、ダークマターは天体観測から存在が示唆されているが候補となる粒子は素粒子標準模型に無い。LHC で

はダークマターを直接生成できる可能性があるため、ATLAS 実験はこれまでも精力的に探索を行ってきた。ただし、ATLAS 実験の標準的な物理解析はヒッグス粒子のようにビーム衝突点で生成後に即座に崩壊する粒子をターゲットとしている。そこで、我々のグループでは SCT の一層目のある 300 mm までを飛程とするような長寿命の新粒子の探索に 2014 年から取り組んでいる。音野は標準模型の枠組みにある粒子の超対称性パートナーが長寿命粒子となる可能性に着目した。Run1 の取得データを用いて探索したが新粒子発見の兆候は残念ながら得られなかった。並行して、長寿命粒子を生む新たなシナリオを理論研究者らと考案し、2015 年に論文誌に受理されている。2016 年はこれらのシナリオについて実際に Run2 の取得データを用いて探索を進め、完了させた。新粒子の発見には至らなかったが、論文を 2018 年に出版している。調は右巻きニュートリノに着目し、探索を開始した。右巻きニュートリノもダークマターの候補となり、同時にニュートリノの質量や宇宙のバリオン非対称性に説明を与えることができる。特に質量領域 2 - 30 GeV の右巻きニュートリノは長寿命となる。音野らの探索とは異なる終状態を持つため新たな開発が必要となるが、事象の再構成効率や背景事象の見積もり、系統誤差の評価などを着実に進めた。2016 年までの取得データの解析において新粒子の発見には至らなかったが、探索結果について論文を 2019 年に出版している。織田は東京工業大学に異動した調らとともに、Run2 全データを用いた右巻きニュートリノの探索を開始した。以前の解析に含まれていなかった電子ニュートリノと結合する右巻きニュートリノも探索できるように、解析方法を更新し、背景事象の見積もりを進めた。山口は長寿命チャージノの探索に着手した。特に、質量差が小さいニュートラリーノへ崩壊するものに着目すると、内部飛跡検出器内で崩壊し、飛跡が消失するという特徴を有する。解析手法の開発により探索領域を拡張できる可能性が高く、今後の進展が期待できる。

- **検出器アップグレード計画** (東城 順治、小林 大、宮崎 祐太、彌吉 拓哉、莊司 大志、Hernandez Barahona Jocsan Ariel、姚 舜禹)

現行の LHC 加速器は、2024 年まで運転して積分ルミノシティ 350 fb^{-1} を ATLAS 実験に提供する予定である。その後、加速器増強により瞬間ルミノシティを $(5 - 7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に向上させ、2027 年から高ルミノシティ LHC (HL-LHC) として再稼働させる計画である。HL-LHC 計画に向けて、ATLAS 実験では検出器アップグレード計画を遂行している。我々のグループは、現行の内部飛跡検出器 (ID) を高放射線耐性シリコン検出器 (ITk) に

アップグレードする計画に参画している。ITk 検出器のうち、特に、新型のシリコンピクセル検出器の開発・製作を担当している。シリコンピクセル検出器は、センサー・読み出しチップ (ASIC) を bumps ボンディング接合したセンサーモジュール、ASIC 制御用のフレキシブル基板、冷却機構との接触部である TPG セル、の 3 つの構成要素を持つ。検出器組立の開発要素として、放射線耐性、高位置精度の接着、ワイヤーボンディング、ワイヤー保護、放電抑制のためのパリエンコーディング、品質管理のための検出器読み出し手法がある。放射線耐性については、東北大学 CYRIC 加速器施設の陽子ビームを用い、陽子線照射による検出器部材の性質を研究した。特に、接着剤・封止剤については、海外共同研究者とも協力して多くの知見を得た。最終的な選定に至るまで、今後もこの研究を重視して進める計画である。組立における接着では、ステンシル法の開発を進めてきた。ステンシル法は、レーザー加工でステンレスシートにパターンを形成し、そのシートを用いて塗布を行う手法であり、量産に向いている。多様なパターンを試みて、最小物質量・接着剤の厚み・一様性・気泡排除・熱応力等の要求を満たすことを実証してきた。高位置精度の組立では、治具の開発が重要である。高精度機械加工により治具試作機を製作・改良し、繰り返し位置精度の要求値である 30 μm 以内を達成することに成功した。この結果を受けて、接着・組立手法について、ITk ピクセル検出器全体で我々のグループが開発した手法が標準手法として採用された。海外共同研究者と協力して、量産体制に進める計画である。ワイヤー保護には通常は封止剤を用いる。CERN 研究者とも協力し、放射線耐性と熱サイクルの要求を満たす封止剤を研究してきたが、これまでのところ残る候補がない状況である。今後は低物質量の材料を用いた保護機構も含めて検討する計画である。検出器読み出しは、昨年度に国内共同研究者と協力して構築した環境を用い、検出器開発・製作全体の工程で稼働させてきた。今後、最終仕様の検出器に向けた開発を完了させ、検出器の製作、CERN 現地での検出器全体の組立に活動を広げていく予定である。

国際リニアコライダー計画 (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、出口 遊斗、上杉 悠人、後藤 輝一)

次世代加速器実験計画「国際リニアコライダー」(ILC) のための物理と測定器の研究を行っている。測定器の開発においては、ILC 電磁カロリメータで用いる読み出し回路の開発および新型センサーの開発、プロトタイプの改良および試験を行った。物理においては、機械学習を用いた崩壊点検出アルゴリズムの改善に取り組んだ。

- シリコン電磁カロリメータ読み出し ASIC の性能評価およびプロトタイプ

開発 (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、後藤 輝一)

シリコン電磁カロリメータの読み出しシステムの開発をフランス (LLR, IJ-Clab 研究所等) と共同で行っている。本年度は、昨年度九州大学で製作したプロトタイプの電圧供給不安定性の問題を解決するため、フレームへの固定方法の改良等を行い、ドイツの DESY 研究所にて 2019 年 7 月にビーム試験を行い安定動作を確認した。また、従来からの問題であるリトリガリング現象 (トリガーが二重・三重に発生しメモリが埋まってしまう問題) の特徴的なパターンを発見し、問題解決への道筋を開いた。2020 年 3 月にもビーム試験を行う予定で追加のプロトタイプの製作・単体試験も行ったが、コロナウイルスの影響でビーム試験は 2020 年 11 月に延期された。

- **高位置・時間分解能のシリコン検出器の開発研究** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、出口 遊人、上杉 悠斗、後藤 輝一)

ILC の電磁カロリメータは、ジェット中の粒子を分離しエネルギー分解能を高めるため、微細分割されたカロリメータとなっている。センサーに用いるシリコンパッド検出器のオプションとして、高時間分解能および高位置分解能 (のいずれか) を持たせたセンサーの研究を行っている。高位置分解能センサーには LGAD と呼ばれるアバランシェゲインを持つセンサーを用いる。本年は昨年構築した ASIC を用いたセットアップを改良し、50ps 以下のセットアップによる時間誤差を得た。このセットアップで東北大学電子光学研究センター (ELPH) にてビーム試験を行い、初めて時間分解能の測定に成功した (100 fC 以上 (増幅後) の信号に対して 385 ± 94 psec)。また、高位置分解能センサーには PSD と呼ばれる 1 つのパッドに対し複数の電極から読み出し抵抗分割により位置感度を得る方法を検討している。本年度は PSD に対する放射線源を用いた測定を行い、高抵抗のサンプルで十分な信号分離比が得られることを放射線源で初めて確認した。

- **ILC における深層学習を用いた崩壊点検出アルゴリズムの開発** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、後藤 輝一)

ILC における二次・三次崩壊点の検出は、ジェットフレーバーの識別等に重要な役割を果たし、その性能は ILC において特に重要な物理であるヒッグスの精密測定等の性能を制限する最重要の要因の一つである。これまでの崩壊点検出は、末原が共同研究者と開発した「LCFIPlus」というソフトウェアが国際研究で利用されているが、このソフトウェアは従来型の場合分けによる方法を用いており、近年急速に進歩した深層学習の手法を使うことで性能を飛躍的に改善することが期待できる。本年度は、Tensorflow/Keras と GPU を

用いた深層学習の研究環境の構築を行うとともに、飛跡のペアが二次崩壊点から発生しているかどうかを判別する深層ニューラルネットワークの設計・性能最適化を開始した。

ミューオン・電子転換過程の探索 (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、大石 航、野口 恭平、川島 僚介、松本 岳)

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設において、ミューオンが電子に転換する過程を探索するため、COMET 実験 (J-PARC E21 実験) を国際共同研究で進めている。実験を実現するため、世界最高強度のパルスミューオンビームを生成する実験施設の建設が進行中である。実験の第一段階 (Phase-I) では、 $\mathcal{O}(10^{-15})$ の一事象発見感度 (SES) での実験を計画している。さらに、Phase-I では、初めて生成するミューオンビームの性質を詳細に調べることが不可欠である。第二段階 (Phase-II) では、 $\mathcal{O}(10^{-17})$ の一事象発見感度を目指す。我々のグループは、Phase-I、Phase-II に用いる検出器の開発を行っている。

● **Phase-I トリガー検出器の開発** (東城 順治、吉岡 瑞樹、松本 岳)

Phase-I の物理測定では、円筒型ドリフトチェンバーとトリガー検出器を組み合わせた検出器システムが主要な役割を果たす。我々のグループは、トリガー検出器の開発を進めている。信号の電子をトリガーするため、UV アクリルを電子同定用チェレンコフ輻射体として用いる。さらに、信号-雑音比とタイミング情報を向上させる得るため、プラスチックシンチレータを組み合わせる。光検出器にはファインメッシュ型光電子増倍管 (FM-PMT) を用い、その後段には前置増幅回路を設置する。今年度は、昨年度に引き続き、プロトタイプ検出器の開発を進めた。特に、前置増幅回路、放射線耐性、検出器筐体の設計に重点を置いた。前置増幅回路の開発では、その信号を用いてトリガーを生成し、信号の読み出しも行うためのトリガー回路 COTTRI の開発も平行して進めた。特に前置増幅回路と COTTRI の接続において、耐放射線を確保するための部品交換による影響と通信手法について開発し、良好な結果を得た。また COTTRI に要求される TDC 実装についても着手した。光検出器の代替案として、設置場所を変えて SiPM 検出器を用いる案を再検討し、その放射線損傷試験を行った。研究は進行中であり、来年度に向けて結論を得られる見込みである。トリガー検出器全体の設計は第一案としては完成し、今後は詳細なシミュレーション等による研究でその最適化を進める予定である。

● **電磁カロリメータの開発** (東城 順治、吉岡 瑞樹、大石 航、川島 僚介)

Phase-I におけるミューオンビームの研究、及び、Phase-II の物理測定では、

ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータ (ECAL) を用いる計画である。我々のグループは、ECAL 検出器の開発を進めている。ECAL 検出器は、高計数率環境下で信号電子のエネルギーを測定し、事象トリガーを生成するために重要な役割を果たす。磁場がある真空中で動作させ、高いエネルギー分解能と速い時間応答を必要とするため、LYSO 結晶をアバランシェ・フォトダイオード (APD) で読み出す。これまでの開発では、LYSO 結晶を選定し、ほぼ実機仕様である試作機を開発・製作して、東北大学電子光学学研究所等においてビーム試験を行ってきた。ビーム試験では、ストローチューブ飛跡検出器の試作機も導入し、両検出器を組み合わせて性能評価を行い、良好な結果を得た。今年度は実機建設に向けて、さらに廉価な LYSO 結晶を入手し、その性能評価を行った。これまでに用いてきた結晶とほぼ同等の性能を得られることが分かった。さらに、実機建設の際に行う結晶の検査項目・手法についてもさらに研究を進めた。これらの結果から、現実的にコストを削減して建設へ向かえる見通しができた。実機の筐体の設計も進行中であり、来年度は設計完了し、筐体の製作を進める予定である。

- **Extinction の研究** (東城 順治、吉岡 瑞樹、野口 恭平)

COMET 実験における J-PARC メインリング (MR) の運転では、ミュオン-電子転換過程の探索感度を向上させるため、8 GeV まで加速し、1.2 μsec の陽子ビームバンチ間隔を用いる。バンチの陽子数に対する、バンチ間に漏れる陽子数である extinction は、Phase-I, Phase-II 実験における感度を確保するためには、 $O(10^{-11})$ であることが要求される。この要求を満たす MR の運転を確立するため、加速器研究者の協力を得て、その研究に着手した。シミュレーションによる運転パラメータの調整、及び、通常の 30 GeV 運転における加速器調整の期間における調整と測定を行った。また、広いダイナミックレンジを持つ必要がある extinction を測定する検出器の開発にも着手した。検出器には、プラスチックシンチレータ、及び、光検出器として光電子増倍管と SiPM 検出器を用いる。今後、8 GeV 運転における extinction の調整と実測を遂行するため、運転パラメータの研究と検出器の開発を進めつつ、J-PARC プログラムへの提案書を作成し、来年度には実験を行う計画である。

ミュオン異常磁気モーメント・電気双極子モーメントの測定 (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志、竹内 佑甫、眞玉 将豊、佐田 智也、来見田 将大) 茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) において、ミュオンの異常磁気モーメント ($g-2$) と電気双極子モーメント (EDM) を

測定するため、J-PARC E34 実験を国際共同研究で進めている。 $g-2$ の測定は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E821 実験が 0.54 ppm の精度で素粒子標準模型 (SM) から 3.3σ のずれを発表し、その結果は SM を超える物理 (BSM) の探索で重要な位置を占めている。また、EDM の測定は、BNL E821 実験が $1.9 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$ の上限値を与えた。有限の EDM は時間反転対称性を破るため、CPT 定理を仮定すれば CP 非保存を意味し、それを生み出す BSM の存在を示唆する。本実験では、極冷ミュオンビームを生成・加速し、収束電場を用いずに超高精度磁場中にミュオンを蓄積する手法を用いる。その手法により、 $g-2$ を 0.1 ppm の精度で、EDM を $10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の感度で、それぞれを分離して測定する計画である。我々のグループは、本実験に用いるシリコンストリップ検出器とミュオン線形加速器を開発している。

- **読み出しチップの開発** (東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志)

シリコンストリップ検出器は、ミュオンを蓄積する磁場内に設置し、ミュオンの崩壊で生成される陽電子の飛跡をヒット情報から再構成する。平均ヒット計数率は 1 ストリップあたり 1.4 MHz から二桁低い領域まで変動する。その環境下で計数率に対して安定であり、高検出効率が要求される。我々のグループは、その検出器に用いる読み出しチップ (ASIC) の開発を進めている。これまでに、64 チャンネルのアナログチップ Slit2013、128 チャンネルのアナログ部 Slit2014 とデジタル部 GM2DV2 の混載チップ SliT128A、Slit2014 に改良を加えたアナログチップ SliT2016TEG、アナログ・デジタル混載チップ SliT128B、SliT128C を開発・製作してきた。SliT128B の性能評価では期待される動作をしないことが判明し、SliT128C の性能評価を重点的に行った。特に、SliT128A では要求を満たさなかったタイムウォークの性能を改善するために、微分回路を導入してゼロクロッシングを用いている。その性能評価のため、評価基板を設計・製作し、ベアチップ実装をワイヤーボンディングにより行った。基本性能は要求を満たすことが分かった。残る課題としてバイアス供給等があり、回路シミュレーションを用いた開発・設計を進め、成功すれば最終版となるチップを製作する予定である。

- **検出器試作機の開発** (東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志、来見 田 将大)

シリコンストリップ検出器の実機に向けた試作機の開発を進めている。検出器の構成要素として、シリコンセンサーはその開発で一定の完成を収め、量産を開始した。読み出し ASIC は SliT128C の開発までは完了し、それを改良した最終チップの設計・製作を進めている。センサーと ASIC の接続には、銅-ポリイミドの大型・高密度フレキシブル基板 (FPC) を用いる。センサー

部に用いる FPC は、設計・試作・評価を経て開発を完了し、量産も完了した。ASIC を搭載する基板は実装度が高い多層リジッド基板とする方針を固め、基板レイアウトの概念設計を完了させた。最終版の ASIC に合わせて設計をさらに進める予定である。センサー部 FPC と ASIC 部基板の接続にも、ピッチ変換をするための FPC を用いる。技術限界レベルの狭ピッチであり、ライン数が非常に多いため、FPC の製作技術としては、難易度が高い。試作機の開発に成功し、量産を開始した。検出器全体は複数のベーン構造から構成される。低物質量のベーンと支持構造体の設計・試作機の開発も並行して進めている。ベーン数は、現実的な支持構造体の設計とシミュレーションによる性能評価により決めた。また、ベーンの試作機を製作し、センサーの接着等組み立て手法の研究にも着手した。高位置精度の組立、ノイズ評価、熱設計等の各開発要素が同時に進行中である。今後、機械的・電氣的な要求を満たすベーン試作機を開発していく計画である。

- **ミュオン線形加速器の開発**（東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志、竹内 佑甫）

冷却ミュオンビームの開発は、本実験を原理的に成功させる最も重要な要素の一つである。開発中の冷却ミュオン源から供給される低エミッタンスのミュオンビームを 3 段階の線形加速器を用いて加速する計画である。第 1 段階には RFQ 加速器、第 2 段階は上流側から IH-DTL 加速器と DAW 加速器から構成し、第 3 段階には電子加速器を用いる。これらの加速器のうち、第 2 段階の DAW 加速器の開発に着手した。製作した低電力モデルの固有状態の周波数をベクトルネットワークアナライザーで、また、電場分布をビーズ摂動法を用いて測定した。低電力モデルの測定結果を用いて、また、加速器コンプレックス全体のビーム輸送をシミュレーションにより研究し、DAW 加速器の実機的设计を開始した。DAW 加速器の加速空洞、及び、それらを接続して駆動するためのブリッジカプラーの設計を平行して進めている。来年度には設計を完了させ、実機サイズの試作機を製作する予定である。

ミュオンラジオグラフィーによる火山研究（川越 清以、東城 順治、中居 勇樹）

宇宙線ミュオンを用いたミュオンラジオグラフィーは、構造体を透過するミュオンを検出し、その強度分布から構造体の密度を測定する手法である。近年、この手法により火山内部を視覚化に成功し、また、原子炉・氷河・ピラミッド等へも応用が拡がり注目を集めている。九州大学は、総合的な火山専門教育を実施して火山研究者の育成と新分野の創出を目的とした「実践的火山専門教育拠点」を設置した。理学研究院の物理・化学・生物・地球惑星科学部門、及び、理学研究院附属地震火山観測研究

センター (SEVO) が協力して拠点を形成している。その活動の一環として、我々のグループは、ミュオンラジオグラフィーに用いる検出器の開発と実際の観測への応用を目指している。

- **ミュオンラジオグラフィーに用いる検出器の開発** (川越 清以、東城 順治、中居 勇樹)

ミュオンラジオグラフィーにおける宇宙線ミュオンの検出では、ミュオンの飛来角度と強度を測定することが要求される。検出器の技術として、素粒子実験分野では標準的、かつ、現代的なアプローチを取ることにした。検出器にはプラスチックシンチレータを用い、飛来方向を測定するために3層構造とした。プラスチックシンチレータは、各層の水平・鉛直2方向に配置し、3層全体での総数は144本である。光検出器には、コスト削減と簡略化のため、浜松ホトニクス社のMPPCを用い、プラスチックシンチレータの1本の両端を直接読み出す方式とした。MPPCへの電圧印加と信号の読み出しにはジー・エヌ・ディー社のNIM EASIROCモジュールを用いて、多チャンネル読み出しシステムを構築した。論理回路にはNIMモジュールを用いずに、特定用途の基板へ実装することにより、停電力化を図った。実際の観測に向けて、野外での運転に必要なモニターを実装し、電源は発電機・ソーラーパネルをハイブリッドで用いる方式とし、長期連続運転に備える対策を施した。また、野外での観測のために、検出器を格納・設置する構造体を構築した。九州大学キャンパス内の実験室において試験運転し、建物の構造体の密度分布を見ることに成功した。さらに検出器に長期安定性を持たせるために環境センサー等を実装して改良を行い、実際の観測に向けて検出器を完成させた。

- **古墳の観測と阿蘇・米塚の観測への応用** (川越 清以、東城 順治、中居 勇樹)

ミュオンラジオグラフィー検出器の開発を進めるとともに、実際の観測に向けた情報収集を行ってきた。当初は、火山研究の研究対象としても重要視されている雲仙岳の平成新山溶岩ドームを観測対象として検討を開始した。複数の観測地点候補を視察・選定したが、シミュレーションによる研究から実際の観測が難しいことが分かった。そこで、同様の観点から研究対象を阿蘇・米塚とすることとした。米塚は、約3000年前に形成された高さ約80mの典型的なスコリア丘であり、景観が美しいことで有名である。内部構造は、ミュオンラジオグラフィー以外の手法による研究も行われてきたが、自明ではないため研究対象としても大変興味深い。米塚は、環境省が管轄する阿蘇くじゅう国立公園内にあり、文化庁が指定する天然記念物である。今年度

は、九州大学キャンパス内の比較的小規模な池の浦古墳を観測対象とし、実際に野外観測を遂行した。古墳から約 100 m の位置に検出器を設置し、予想される密度分布を測定することに成功した。この結果に基づき、シミュレーションを用いて、米塚の観測が現実的な計画として可能であることを示した。

中性子を用いた基礎物理 (吉岡 瑞樹、角 直幸、高田 秀佐、古賀 淳、牧瀬 壮、矢野 浩大)

- **高精度中性子崩壊寿命測定実験** (吉岡 瑞樹、角 直幸、牧瀬 壮、矢野浩大)
我々は茨城県東海村の J-PARC 加速器を用いて中性子崩壊寿命を高精度で測定する実験を推進している。中性子寿命を導出するためには入射中性子の流量と β 崩壊の量を知る必要があるが、これまで行われてきた実験では中性子と蓄積容器壁面との相互作用や流量に関する系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験では入射中性子流量と β 崩壊電子をガス検出器である Time Projection Chamber (TPC) で同時測定することにより、これまでの実験に伴っていた系統誤差を回避することが可能となる。我々は、この新たな手法を用いて 0.1% の精度で中性子の寿命を測定することを目指している。本年度はデータ収集を引き続き行い、また、既取得データの解析を行なった。データ解析より、検出器動作ガスで散乱された中性子が検出器壁面の LiF に衝突することにより放出されたガンマ線が叩き出すコンプトン電子が主要な背景事象（以下、ガス起因事象）であることが判明している。そこで、ガス起因事象を低減するために、ソレノイド磁場を用いた新規実験の検討を行っている。昨年度に実機の作製・動作試験を行い、良好な性能を確認している。本年度はソレノイド磁石がある高エネルギー加速器研究機構に検出器実機を輸送し、統合試験を行った。超伝導磁石を励磁し、磁場環境下でも検出器実機が正常動作することを確認した。また、宇宙線および各種放射線源を用いた性能評価を行い、期待通りの性能が出ていることが示せた。その後、超伝導磁石および検出器を J-PARC に輸送し、ビームラインに設置した。初めての中性子ビーム照射試験を行い、 ^3He 吸収反応事象の観測に成功した。また、磁気遮蔽体を設置し、ソレノイド磁場が本実験現場周辺の電子機器に与える影響を測定した。中性子ビーム整形装置に若干の性能低下が見られたため、今後の対策が必要である。
- **複合核状態における時間反転対称性の破れの探索実験** (吉岡 瑞樹、高田 秀佐、古賀 淳、牧瀬 壮)
中性子吸収反応による複合核共鳴状態では部分波干渉によって空間反転対称性の破れが極めて大きく観測される場合が存在する。時間反転対称性の破

れについても同様の増幅効果が現れる可能性が理論的に示唆されており、中性子の電気双極子能率探索実験を超えた感度を持ちうる。本実験は茨城県東海村の J-PARC にて行う計画だが、現在は J-PARC/MLF/BL04 で取得したデータによる標的核の選定および各種デバイス開発を行っている。本年度は、標的核候補の一つであるスズ、カドミウム、インジウムのデータ取得およびデータ解析を行った。今後はより詳細な解析ののち、未知パラメータの決定を目指す。並行して、光三重励起状態を用いた動的核偏極法による中性子偏極装置の開発を行っている。本年度、結晶偏極装置一式を理化学研究所の小型中性子発生ビームラインに設置し、中性子照射試験を行った。取得データの解析結果を投稿論文として纏めた。また、九州大学にて同様の動的核偏極装置の整備を行っている。電磁石、レーザーの設置および動作確認を行い、続いて陽子による核磁気共鳴の確認を目指している。

- **低エネルギー中性子の小角散乱を用いた未知相互作用の探索実験**（吉岡 瑞樹）

我々は低エネルギーの中性子とキセノン原子の散乱によりナノメートルスケールで未知の相互作用を探索する実験を推進している。取得データの解析の結果ナノメートル以下で世界最高感度を達成し、すでに投稿論文として公表している。本年度は系統誤差の理解のため、キセノン原子以外の希ガスでのデータ収集を行った。取得データの解析をまとめ、投稿論文として出版されている。また、ナノ粒子との散乱による新規実験の検討しており、予備データの取得を行った。

発表論文

《原著論文》

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of soft-drop jet observables in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **101**, 052007 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of isolated-photon plus two-jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 179 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for electroweak production of supersymmetric particles with compressed mass spectra in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **101**, 052005 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV decaying into displaced hadronic jets in the ATLAS inner detector and muon spectrometer,” Phys. Rev. D **101**, 052013 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct stau production in events with two hadronic τ -leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **101**, 032009 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $Z(\rightarrow \ell^+\ell^-)\gamma$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 054 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the azimuthal anisotropy of charged-particle production in Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.44$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **101**, 024906 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections for single diffractive dissociation in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS ALFA spectrometer,” JHEP **02**, 042 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum and process dependent azimuthal anisotropies in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$ TeV p +Pb collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, 73 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ Z boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV measured by the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **802**, 135262 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in mass distributions of jet pairs using 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 145 (2020).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of J/ψ production in association with a W^\pm boson with pp data at 8 TeV,” JHEP **01**, 095 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson decays $H \rightarrow ee$ and $H \rightarrow e\mu$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **801**, 135148 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment,” Phys. Rev. D **101**, 012002 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **124**, 082301 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of electron and photon triggers in ATLAS during LHC Run 2,” Eur. Phys. J. C **80**, 47 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral currents in processes with one top quark and a photon using 81 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **800**, 135082 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of charginos and sleptons decaying into final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, 123 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $bbl\nu\ell\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Lett. B **801**, 135145 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for displaced vertices of oppositely charged leptons from decays of long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **801**, 135114 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for lepton-flavour-violating decays of the Higgs boson in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **800**, 135069 (2020).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of long-range two-particle azimuthal correlations in Z -boson tagged pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV,” Eur. Phys. J. C **80**, 64 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for Higgs boson pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **800**, 135103 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Magnetic Monopoles and Stable High-Electric-Charge Objects in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **124**, 031802 (2020).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fluctuations of anisotropic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **01**, 051 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential and double-differential cross-sections in the ℓ +jets channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 1028 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of angular and momentum distributions of charged particles within and around jets in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **100**, 064901 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom-squark pair production with the ATLAS detector in final states containing Higgs bosons, b -jets and missing transverse momentum,” JHEP **1912**, 060 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated-photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 36 fb^{-1} of ATLAS data,” JHEP **1910**, 203 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015 - 2017 LHC proton-proton collision data,” JINST **14**, P12006 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of K_S^0 and Λ^0 production in $t\bar{t}$ dileptonic events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 1017 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 935 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive cross-section for the production of jets in association with a Z boson in proton-proton collisions at 8 TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 847 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of flow harmonics correlations with mean transverse momentum in lead-lead and proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 985 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement with $t\bar{t}$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **79**, 970 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm -boson and Z-boson production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 901 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Resolution of the ATLAS muon spectrometer monitored drift tubes in LHC Run 2,” JINST **14**, P09011 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of boosted Higgs bosons decaying into b -quark pairs with the ATLAS detector at 13 TeV,” Eur. Phys. J. C **79**, 836 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **100**, 052011 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1909**, 091 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a heavy charged boson in events with a charged lepton and missing transverse momentum from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, 052013 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for excited electrons singly produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 803 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of a same-sign W boson pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, 161801 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive Z -boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 666 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral leptons in decays of W bosons produced in 13 TeV pp collisions using prompt and displaced signatures with the ATLAS detector,” *JHEP* **1910**, 265 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, 032007 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of ZZ production in the $\ell\nu\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **1910**, 127 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial and differential W^+W^- production cross-sections at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 884 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Modelling radiation damage to pixel sensors in the ATLAS detector,” *JINST* **14**, P06012 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top-quark mass in $t\bar{t} + 1$ -jet events collected with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **1911**, 150 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a right-handed gauge boson decaying into a high-momentum heavy neutrino and a charged lepton in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **798**, 134942 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section and charge asymmetry of W bosons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 760 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for invisible Higgs boson decays with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, 231801 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of light-by-light scattering in ultraperipheral Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, 052001 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the production of three massive vector bosons with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **798**, 134913 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the production of three massive vectorbosons in pp collisions with the ATLAS detector,” *PoS DIS* **2019**, 135 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section for a Higgs boson in association with a vector boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ channel

in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **798**, 134949 (2019).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb^{-1} of pp collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **796**, 68 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $VH, H \rightarrow b\bar{b}$ production as a function of the vector-boson transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1905**, 141 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet-substructure observables in top quark, W boson and light jet production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1908**, 033 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of prompt photon production in $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV $p+\text{Pb}$ collisions with ATLAS,” Phys. Lett. B **796**, 230 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on mediator-based dark matter and scalar dark energy models using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data collected by the ATLAS detector,” JHEP **1905**, 142 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles decaying into a top-quark pair in the fully hadronic final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 092004 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison of Fragmentation Functions for Jets Dominated by Light Quarks and Gluons from pp and $\text{Pb}+\text{Pb}$ Collisions in ATLAS,” Phys. Rev. Lett. **123**, 042001 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for third-generation scalar leptoquarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1906**, 144 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Combinations of single-top-

quark production cross-section measurements and $|f_{LV}V_{tb}|$ determinations at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments Combinations of single-top-quark production cross-section measurements and $|f_{LV}V_{tb}|$ determinations at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments,” JHEP **1905**, 088 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the four-lepton invariant mass spectrum in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 048 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $W^\pm Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 535 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron reconstruction and identification in the ATLAS experiment using the 2015 and 2016 LHC proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **79**, 639 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS calorimeter,” Eur. Phys. J. C **79**, 481 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy charged long-lived particles in the ATLAS detector in 36.1 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **99**, 092007 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for scalar leptoquarks and differential cross-section measurements in dilepton-dijet events in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **79**, 733 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for low-mass resonances decaying into two jets and produced in association with a photon using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **795**, 56 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet azimuthal correlations and condi-

tional yields in pp and p+Pb collisions at sNN=5.02TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **100**, 034903 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ratio of cross sections for inclusive isolated-photon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ and 8 TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 093 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar resonances decaying into $\mu^+\mu^-$ in events with and without b -tagged jets produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1907**, 117 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 072009 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-quark decays $t \rightarrow Hq$ with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1905**, 123 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for large missing transverse momentum in association with one top-quark in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1905**, 041 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak $W^\pm Z$ boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **793**, 469 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino and neutralino production in final states with a Higgs boson and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **100**, 012006 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1905**, 164 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 mesons into muon pairs using data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 098 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in leptonic final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV in ATLAS,” Eur. Phys. J. C **79**, 382 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}$ production with additional heavy-flavour jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 046 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $WW^{(*)}WW^{(*)}$ decay channel using ATLAS data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **1905**, 124 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 072001 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}WW^*$ decay mode at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1904**, 092 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Production of a Long-Lived Neutral Particle Decaying within the ATLAS Hadronic Calorimeter in Association with a Z Boson from pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. Lett. **122**, 151801 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of W and Z boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 128 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with two charged leptons and two jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1901**, 016 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible Higgs boson decays in vector boson fusion at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **793**, 499 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of top-quark and W -boson tagging with ATLAS in Run 2 of the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 375 (2019).

E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono, R. Ruiz De Austri, “Sampling the $\mu\nu$ SSM for displaced decays of the tau left sneutrino LSP at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 934 (2019).

H. Fukuda, N. Nagata, H. Oide, H. Otono and S. Shirai, “Cornering Higgsino: Use of Soft Displaced Track,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 101801 (2020).

The ILD Collaboration, “International Large Detector: Interim Design Report”, DESY 20-034, KEK 2019-57, arXiv:2003.01116.

Yu Kato, Kiichi Goto, Taikan Suehara, CALICE SiW-ECAL group, “Analysis of SiW-ECAL technological prototype beam test with electron beam”, Proc. CHEF2019, arXiv:2002.12019.

Y. Uesugi, R. Mori, H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe, “Study of position sensitive silicon detector (PSD) for SiW-ECAL at ILC”, 2020 JINST **15** C05033.

Y. Deguchi, K. Kawagoe, E. Mestre, R. Mori, T. Suehara, T. Yoshioka, “Study of silicon sensors for precise timing measurement”, 2020 JINST **15** C05051.

K. Goto (for the CALICE SiW-ECAL group), “Preparation and operation of SiW-ECAL technological prototype for DESY test beam 2019”, Proc. LCWS2019, arXiv:2002.06480.

K. Kawagoe, Y. Miura, I. Sekiya, T. Suehara, T. Yoshioka, A. Irles *et al.*, “Beam test performance of the highly granular SiW-ECAL technological prototype for the ILC”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **950** (2020) 162969.

P. Ahlburg, J. Dreyling-Eschweiler, T. Suehara *et al.* “EUDAQ – a Data Acquisition Software Framework for Common Beam Telescopes”, 2020 JINST **15** P01038.

K. Fujii, C. Grojean, M. E. Peskin, T. Barklow, Y. Gao, S. Kanemura, H. Kim, J. List, M. Nojiri, M. Perelstein, R. Poeschl, J. Reuter, F. Simon, T. Tanabe, J. D. Wells, J. Yu, J. Tian, T. Suehara, M. Vos, G. Wilson, J. Brau, H. Murayama, “Tests of the Standard Model at the International Linear Collider”, DESY 19-146, KEK Preprint 2019-22, SLAC-PUB-17467, arXiv:1908.11299.

The CALICE Collaboration, G. Eigen *et al.*, “Characterisation of different stages of hadronic showers using the CALICE Si-W ECAL physics prototype”, Nucl. Instrum. Meth. **A 937** (2019) 41.

R. Abramishvili *et al.* [COMET Collaboration], “COMET Phase-I Technical Design Report,” PTEP **2020**, no. 3, 033C01 (2020).

H. Nishiguchi, P. Evtoukhovitch, Y. Fujii, E. Hamada, N. Kamei, S. Mihara, A. Moiseenko, K. Noguchi, K. Oishi, J. Suzuki, J. Tojo, Z. Tsamalaidze, N. Tsverava, K. Ueno, A. Volkov, “Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I,” Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162800 (2020).

T. Yamanaka *et al.*, “Positron tracking detector for J-PARC muon $g-2$ /EDM experimentt,” Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162786 (2020).

Y. Tsutsumi, T. Kishishita, Y. Sato, M. Shoji, M. M. Tanaka, T. Mibe and J. Tojo, “Prototype Front-end ASIC for Silicon-strip Detectors of J-PARC Muon $g-2$ /EDM Experiment,” PoS TWEPP **2018**, 090 (2019).

M. Abe *et al.* [J-PARC $g-2$ /EDM Collaboration], “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment,” PTEP **2019**, no. 5, 053C02 (2019).

P. Strasser *et al.* [MuSEUM Collaboration], “New precise measurements of muonium hyperfine structure at J-PARC MUSE,” EPJ Web Conf. **198**, 00003 (2019).

Y. Sato *et al.* [J-PARC g-2/EDM Collaboration], “Development of Silicon Strip Detector for J-PARC muon g-2/EDM Experiment,” PoS ICHEP **2018**, 541 (2019).

K. Hirota, T. Yoshioka *et al.*, ”Design and Construction of an Imaging beamline at the Nagoya University Neutron Source”, EPJ Web of Conferences 231, 05002 (2020).

C. Haddock, T. Yoshioka *et al.*, ”Measurement of the total neutron-scattering cross-section ratios of noble gases of natural isotopic composition using a pulsed neutron beam”, Phys. Rev. C 100 (6), 064002 (2019).

R. Kitahara, J. Koga, A. Morishita, H. Otono, N. Sumi, T. Tomita, T. Yoshioka *et al.*, ”Improved accuracy in the determination of the thermal cross section of $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ for neutron lifetime measurement”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019 (9), 093C01 (2019).

C. Haddock, T. Yoshioka *et al.*, ”A search for deviations from the inverse square law of gravity at nm range using a pulsed neutron beam”, EPJ Web of Conferences 219, 05002 (2019).

J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, ”Measurement of the angular distribution of prompt gamma-rays emitted in the $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$ reaction for a T-violation search”, EPJ Web of Conferences 219, 09004 (2019).

N. Nagakura, J. Koga, A. Morishita, H. Otono, N. Sumi, T. Tomita, H. Uehara, T. Yoshioka *et al.*, ”New project for precise neutron lifetime measurement at J-PARC”, EPJ Web of Conferences 219, 03003 (2019).

S. Endo, T. Yoshioka, S. Takada, J. Koga *et al.*, ”Measurement of the angular distribution of γ -rays emitted from the compound state after neutron capture by ^{81}Br for a search of T-violation”, EPJ Web of Conferences 219, 09003 (2019).

T. Okudaira, S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, ”Measurement of the angular distribution of γ -rays after neutron capture by ^{139}La for a T-violation search, EPJ Web of Conferences 219, 09001 (2019).

T. Yamamoto, S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, "Measurement of P-Violation in $^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$ - a first step towards a T-Violation search", EPJ Web of Conferences 219, 09002 (2019).

《Proceedings》

著書

マーティン/ショー 素粒子物理学 原著第4版、KS物理専門書 ISBN978-4-06-511974-7
ブライアン.R・マーティン (著), グレアム・ショー (著), 駒宮 幸男 (監訳), 川越 清以 (監訳), 吉岡 瑞樹 (訳), 神谷 好郎 (訳), 織田 勸 (訳), 末原 大幹 (訳)

講演

《海外での講演》

Higgsino ; jet + soft displaced track :

Hidetoshi Otono

Searching for long-lived particles at the LHC: Sixth workshop of the LHC LLP Community, November 2019, Ghent, Belgium

Measurement of cross sections in Higgs boson decays to four leptons with the ATLAS detector :

Susumu Oda

European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2019), July 2019, Ghent, Belgium

Searches for supersymmetric particles with macroscopic or stable lifetimes using the ATLAS detector :

Hidetoshi Otono

27th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY2019), May 2019, Corpus Christi, Texas, USA

ILC Physics and Detectors:

K. Kawagoe,

WHEPP 2019, Dec. 2019, Guwahati, India

Study of position sensitive silicon detector (PSD) for SiW-ECAL at ILC:
Y. Uesugi, R. Mori, H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe,
Calorimetry for the High Energy Frontier 2019 (CHEF2019), Nov. 2019, Fukuoka,
Japan

Study of silicon sensors for precise timing measurement:
Y. Deguchi, K. Kawagoe, E. Mestre, R. Mori, T. Suehara, T. Yoshioka,
Calorimetry for the High Energy Frontier 2019 (CHEF2019), Nov. 2019, Fukuoka,
Japan

Preparation and operation of SiW-ECAL technological prototype for DESY test beam
2019:
K. Goto (for the CALICE SiW-ECAL group),
Linear Collider Workshop 2019, Oct. 2019, Sendai, Japan

Study of Position Sensitive Silicon Detector (PSD) for SiW-ECAL at ILC:
Y. Uesugi, R. Mori, H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe,
Linear Collider Workshop 2019, Oct. 2019, Sendai, Japan

Study of silicon sensors for precise timing measurement:
Y. Deguchi, K. Kawagoe, T. Yoshioka, T. Suehara, R. Mori, E. Mestre, S. Callier,
Linear Collider Workshop 2019, Oct. 2019, Sendai, Japan

Preparation and Operation of FEV13 for DESY test beam 2019:
T. Suehara, Y. Kato, K. Goto on behalf of SiW-ECAL group,
CALICE Collaboration Meeting, Oct. 2019, CERN, Switzerland

Exploring the structure of hadronic showers and hadronic energy reconstruction with
highly granular calorimeters:
K. Kawagoe,
29th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Aug. 2019,
Toronto, Canada

Toward realistic implementation of large imaging calorimeters:

K. Kawagoe,
29th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Aug. 2019,
Toronto, Canada

Technologies in ILC detectors:

T. Suehara,
KAIST-KAIX Workshop for Future Particle Accelerators, Jul. 2019, Daejeon, Korea

HEP_07: SiW ECAL:

T. Suehara on behalf of SiW-ECAL group,
TYL/FJPPL/FKPPL workshop, May 2019, Jeju island, Korea

Study on silicon sensors with high timing/position resolution:

T. Suehara, R. Mori, Y. Deguchi, Y. Uesugi,
CALICE Collaboration Meeting, Apr. 2019, Utrecht University, Netherlands

FEV13 at test beams:

T. Suehara, Y. Miura,
CALICE Collaboration Meeting, Apr. 2019, Utrecht University, Netherlands

Introduction, Welcome and Themes :

Junji Tojo
3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation, June 2019, Fukuoka,
Japan

Performance Study of LYSO crystal for the Electromagnetic Calorimeter in the COMET
Experiment (poster) :

Ryosuke Kawashima
3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation, June 2019, Fukuoka,
Japan

A Study of the Performance of the Tracker and Calorimeter for the COMET Experi-
ment (poster) :

Kou Oishi
3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation, June 2019, Fukuoka,

Japan

Positron Tracking Detector for Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC :

Tamaki Yoshioka

3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan

Error Studies for Muon Linac in the Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC :

Yusuke Takeuchi

3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan

Development of Positron Tracking Detector for Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC
(poster) :

Takashi Yamanaka

3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation, June 2019, Fukuoka,
Japan

Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC :

Takashi Yamanaka

2019 Korean Physical Society Spring Meeting, April 2019, Daejeon, Korea

Lifetime of Neutron Apparatus (LiNA) with time projection chamber and solenoid coil
:

So Makise

INT Workshop INT-19-75W Fundamental Symmetries Research with Beta Decay,
November 2019, Seattle, US

Precise Neutron Lifetime Measurement : An integration test with a Gaseous Detector
and a Solenoidal Magnet :

Kodai Yano

The 3rd J-PARC symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan

Precise neutron lifetime measurement using pulsed neutron beam at J-PARC :

Naoyuki Sumi

The 3rd J-PARC symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan

Study for the experimental sensitivity of T-violation in compound nuclear reaction of ^{117}Sn :

Jun Koga

The 3rd J-PARC symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan

Study of γ ray from 4.53 eV p-wave resonance of ^{111}Cd using compound nuclear reaction :

So Makise

The 3rd J-PARC symposium (J-PARC2019), September 2019, Tsukuba, Japan

《 国内での講演 》

LHC-ATLAS 実験シリコンストリップ検出器のオフラインソフトウェアのマルチスレッド化

織田 勸

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

LHC-ATLAS 実験シリコンストリップ検出器の使用可能ストリップ増加を目指した各ストリップの評価

山口 尚輝

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

高輝度化 LHC に向けた ATLAS シリコンピクセル検出器の冷却機構の性能評価に関する研究

宮崎 祐太

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器における熱応力に関する研究

彌吉 拓哉

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器モジュールのワイヤー保護の研究

荘司 大志

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるストリップ型シリコン検出器 (SCT) の性能評価

音野 瑛俊

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月、山形大学

HL-LHC アップグレードに向けた測定器開発現状～日本グループの活動～

小林 大

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月、山形大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器用新部材の評価

小林 大

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月、山形大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器の量産における
接着工程の評価

彌吉 拓哉

日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月、山形大学

LHC における長寿命中性レプトンの探索

織田 勸

新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2019、2019 年 6 月、伊賀、三
重

ATLAS ITk Pixel Module Assembly

小林 大

測定器開発プラットフォーム・シリコン検出器、2020 年 1 月、高エネルギー加速器研
究機構、つくば、茨城

趣旨説明

東城 順治

測定器開発プラットフォーム・シリコン検出器、2019 年 9 月、高エネルギー加速器研
究機構、つくば、茨城

ATLAS Silicon Pixel Detector

小林 大

測定器開発プラットフォーム・シリコン検出器、2019 年 9 月、高エネルギー加速器研究機構、つくば、茨城

ILC が切り拓く新技術とその多彩な応用: 趣旨説明

末原大幹

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月

深層学習を用いた ILD 事象再構成アルゴリズムの改良

後藤輝一

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月

国際リニアコライダーのための Position Sensitive silicon detector(PSD) の開発研究

上杉悠人

日本物理学会 2019 年秋期大会、2019 年 9 月、山形大学

国際リニアコライダーに向けた高時間分解能センサーの性能評価

出口遊斗

日本物理学会 2019 年秋期大会、2019 年 9 月、山形大学

COMET 実験に向けた J-PARC 陽子ビームのエクステンクシヨンの改善

野口 恭平

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

COMET 実験用トリガー検出器のフロントエンド回路開発

松本 岳

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

COMET 実験電磁カロリメータに用いる LYSO 結晶の性能評価

川島僚介 日本物理学会 2019 年秋季大会、2019 年 9 月、山形大学

J-PARC E34 実験：ミューオン線形加速器中速部用 DAW 空洞の開発

竹内 佑甫

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験：シリコンストリップ検出器の高位置精度の組み立て方法の開発

来見田 将大

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験：崩壊陽電子飛跡再構成アルゴリズムを用いた測定精度の見積もり

山中 隆志

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

ソレノイド磁場を用いた中性子寿命測定のための宇宙線カウンターの開発

矢野 浩大

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

時間反転対称性の破れ探索実験に向けた $^{111}\text{Cd}(n,\gamma)$ 反応における p 波共鳴分布の解析に関する報告

牧瀬 壮

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

$^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$ 反応における γ 線放出角度依存性と解析の現状

古賀 淳

日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学

中性子の精密寿命測定のための宇宙線カウンターの開発

矢野 浩大

第 125 回日本物理学会支部例会、2019 年 12 月、佐賀大学

Fundamental physics using neutron at J-PARC and accelerator-driven compact neutron source

吉岡 瑞樹

2019 年度核データ研究会、2019 年 11 月、九州大学

Integration Test with a Gaseous Detector and a Solenoidal Magnet for the Precise Neutron Lifetime Measurement

矢野 浩大

2019年度核データ研究会、2019年11月、九州大学

時間反転対称性の破れ探索に向けた $^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$ 反応による γ 線角相関に関する研究
古賀 淳

2019年度核データ研究会、2019年11月、九州大学

複合核反応における ^{111}Cd 4.53 eV p 波共鳴由来の γ 線角度分布測定
牧瀬 壮

2019年度核データ研究会、2019年11月、九州大学

Triplet-DNP による陽子偏極を利用した中性子スピフィルターの開発 -小型中性子源
RANS での性能評価-

高田 秀佐

日本物理学会 2019年秋季大会、2019年9月、山形大学

複合核反応における Cd の特定の p 波由来の γ 線精密測定に関する研究
牧瀬 壮

日本物理学会 2019年秋季大会、2019年9月、山形大学

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究 (研究領域提案型)

ヒッグス粒子で探る真空と世代構造

研究分担者 東城 順治 (研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 花垣 和則)

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (S)

大強度ミュオン源で解き明かす荷電レプトンのフレーバー転換探索の新展開

研究分担者 東城 順治 (研究代表者 大阪大学 久野 良孝)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (S)

ミュオン異常磁気能率の精密測定による新物理法則の探索

研究分担者 吉岡 瑞樹 (研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 齊藤 直人)

文部科学省研究費補助金、基盤研究(A)

J-PARCパルス中性子ビームを用いた中性子寿命測定:中性子寿命問題の解明

研究分担者 吉岡 瑞樹 (研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 三島 賢二)

文部科学省研究費補助金、基盤研究(B)

中性子・ナノ粒子散乱による未知相互作用の探索

研究分担者 吉岡 瑞樹 (研究代表者 大阪大学 嶋 達志)

文部科学省研究費補助金、基盤研究(B)

ソレノイド磁場と新型ガス検出器を組み合わせた高精度中性子寿命測定実験

研究代表者 吉岡 瑞樹

文部科学省研究費補助金、基盤研究(B)

時間反転対称性の破れの探索のための、偏極中性子による原子核反応の精密測定

研究分担者 吉岡 瑞樹 (研究代表者 名古屋大学 北口 雅暁)

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究(研究領域提案型)

LHCにおける長寿命中性レプトンの探索

研究代表者 織田 勸

文部科学省研究費補助金、基盤研究(B)

LHC陽子衝突点超前方における高エネルギーニュートリノ研究

研究分担者 音野 瑛俊 (研究代表者 九州大学 有賀 智子)

文部科学省研究費補助金、若手研究

ストリップ型シリコン検出器と超伝導磁石を用いたミュオンラジオグラフィーの新展開

研究代表者 音野 瑛俊

文部科学省研究費補助金、基盤研究(A)

将来電子・陽電子加速器実験における暗黒物質探査

研究分担者 末原 大幹 (研究代表者 カブリ数物連携宇宙研究機構 松本 重貴)

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会

素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理に関連する実験分野に関する学術研究動向 - 将来素粒子実験計画の国際的新展開 -

代表者 川越 清以

高エネルギー加速器研究機構：大学等連携支援事業

九州大学と周辺地域における加速器科学分野の若手研究者育成

事業代表者 東城 順治

カリフォルニア大学アーバイン校：受託研究

FASER: Tracker Mechanics, Trigger, and Detector Support

代表者 音野 瑛俊

九州大学：QR プログラム

FASER 実験による長寿命の新粒子の発見を目指した飛跡検出器の開発

研究代表者 音野 瑛俊

笹川科学研究助成

有機半導体の粒子検出器への応用可能性の探索

研究代表者 小林 大

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)

角 直幸 (DC2)：新型ガス検出器を用いた世界最高精度での中性子寿命測定実験

学部4年生卒業研究

久原 真美、嶋津 省吾、松崎 俊：フォトダイオードとシンチレータを組み合わせた検出器による γ 線検出

岩下 侑太郎、岩津 祐輝、濱住 周斗：オルソポジトロニウムの寿命測定

修士論文

- 出口 遊斗 (指導教員 末原 大幹) : 国際リニアコライダーにおける粒子識別精度向上のための高時間分解能シリコンセンサー開発に向けた研究
- 川島 僚介 (指導教員 東城 順治) : COMET 実験電磁カロリメータに用いるLYSO 結晶の性能評価
- 牧瀬 壮 (指導教員 吉岡 瑞樹) : ^{111}Cd (n, γ) 反応における p 波共鳴分布に関する研究
- 上杉 悠人 (指導教員 末原 大幹) : 国際リニアコライダーのための高位置分解能シリコンセンサーの開発
- 彌吉 拓哉 (指導教員 東城 順治) : ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組立工程と熱耐性の研究

博士論文

- 角 直幸 (指導教員 川越 清以) : Development of a Detector System for Precise Neutron Lifetime Measurement using Magnetic Field
- 中居 勇樹 (指導教員 東城 順治) : Development of a muography system to survey large scale structures
- 調 翔平 (指導教員 川越 清以) : Search for heavy neutral leptons using displaced vertices in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector

学外での学会活動

- 川越
 - 高エネルギー加速器研究機構 : リニアコライダー計画推進委員会委員
 - 高エネルギー加速器研究機構 : 日米科学技術協力事業高エネルギー物理研究計画委員会委員
 - 高エネルギー加速器研究機構 : 素粒子原子核研究所運営会議委員
 - 高エネルギー加速器研究機構 : 加速器・共通基盤研究施設運営会議委員
 - 東京大学素粒子物理国際研究センター : 研究協議会委員
 - Asia-Europe-Pacific School of High Energy Physics : 国際組織委員会委員
 - ILD concept group : Deputy Spokesperson

- 東城
高エネルギー加速器研究機構：サマーチャレンジ企画委員

- 吉岡
高エネルギー物理学研究者会議：将来計画検討委員
高エネルギー加速器研究機構：サマーチャレンジ企画委員
日本物理学会：九州支部委員

- 音野
高エネルギー物理学研究者会議：高エネルギーニュース編集委員

物性理論研究室

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 》

上戸美乃 西山大樹 尾家道弘 山下晃弘

《 学部 卒業研究生 》

木下智貴 林拓夢 米澤弦起 堀川貴広

担当授業

福田順一: 非平衡物理学, 統計力学 I・同演習 (, 物理学入門 II)

松井淳: 量子統計力学, 基幹物理学 IB 演習, 物理数学 II (, 物理学ゼミナール)

藪中俊介: 力学・同演習, 統計力学 I・同演習 (, 最先端物理学)

研究・教育目標と成果

液晶配向欠陥の顕微鏡像 (福田順一)

ネマチック液晶が 2 枚の平行平板間で示す欠陥構造 (特にそのコアの部分) が光学顕微鏡でどのように見えるかを, 光の電磁場に関する Maxwell 方程式を数値的に直接解いた結果を解析することで理論的に調べた. 顕微鏡像はレンズの開口数に強く依存することなどが, その結果から明らかになった.

コレステリックブルー相液晶の格子配向と表面アンカリングとの関係 (福田順一)

平板に接したコレステリックブルー相液晶の格子が, その平板において好まれる液晶配向の方向 (表面アンカリングの容易軸) に対して特定の向きをとることが実験で知られている. その原因を解明すべく, 連続体シミュレーションによる解析を開始した (Slobodan Žumer 教授 (Jožef Stefan Inst., Slovenia) との共同研究).

機械学習を用いた液晶系の構造解析 (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開発し、液晶高分子などの系に適用した（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）

液晶高分子複合系の光学特性の解析 (福田順一)

液晶高分子複合系が相分離の結果形成する柱状の高分子を含む秩序構造について、電場のないとき、及び電場印加時の光学特性、特に電場による液晶配向の違いと光の散乱特性との関係を、Maxwell 方程式を数値的に直接解くことで調べた（九大先導研 菊池裕嗣教授らのグループとの共同研究）。

スメクチック A 液晶のシミュレーション (西山大樹, 福田順一)

層状の秩序を有し、分子の向きが層に垂直であるスメクチック A 液晶について、液晶配向のみに着目した連続体モデルを用いた数値計算を行った。特に張力印加時に起こる層の波打ち不安定性についての計算を行い、波打ちの振幅について理論とよく一致した結果が得られた。

過冷却液体の異常拡散 (松井淳)

分子動力学シミュレーションで解析したジャンプ拡散の待ち時間分布において、ロングテールがあらわれる。このベキ指数を求めるため、最尤法と観測時間の有限性を考慮した解析を行った。

円環分子の固液転移 (上戸美乃, 松井淳)

円環分子の特徴は、分子の中心（重心）付近に質量分布がないことである。固液転移において重要となる分子間の排除堆積効果は、円盤分子の場合よりも小さくなるため、円環分子で構成される系の転移点や構造がどのようなものか興味深い。モンテカルロ法を用いた計算機実験を試み、低温領域で見出される 2 種類の秩序相の秩序変数を導入した。

Bardeen-Moshe-Bnader 現象の解明 (藪中俊介)

$d = 3, N = \infty$ での $O(N)$ 模型では、ガウス固定点の周りでマージナルな方向が現れることにより、三重臨界点のなす固定線が存在する。しかしその固定線は、Bardeen-Moshe-Bnader 固定点という点で途切れるということが主張されていた。しかし、この固定点が、成分数 N が有限の場合に存在するののかという問題は長年答えられていなかった。私のこれまでの $O(N)$ 模型に関する研究成果を生かしながら、パリ第 6 大学の博士課程の Claude Fleming 氏、Bertrand Delamotte CNRS 研究員と共同でこの問題を解明した。

発表論文

《 原著論文 》

“Machine Learning-Aided Local Structure Analysis for Liquid Crystal Polymers”
H. Doi, K.Z. Takahashi, K. Tagashira, J. Fukuda and T. Aoyagi,
Scientific Reports **9** (2019) 16370(1–12).

“Drag coefficient of a rigid spherical particle in a near-critical binary fluid mixture,
beyond the regime of the Gaussian model”
S. Yabunaka and Y. Fujitani,
Journal of Fluid Mechanics **886** (2020) A2 (1–24).

《その他の論文》

「キラル液晶薄膜中のスカーミオンとその光学的性質」
福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, I. Muševič
液晶 **24** (2020) 32–39.

講演

《海外での講演》

J. Fukuda

“Exotic ordered structures of a thin film of a chiral liquid crystal and their
optical properties”

International Conference on Liquid Crystals, Liquid Crystalline Polymers
and Nanosystem (2019年12月15日, Mahatma Gandhi Univ., India *Plenary
talk*)

J. Fukuda

“Exotic structures and their optical properties of a thin cell of a chiral liquid
crystal”

Soft Matter Seminar (2019年9月25日, Faculty of Mathematics and Physics,
University of Ljubljana, Slovenia)

J. Fukuda

“Simulation Study on the Self-organized Structures of a Liquid Crystal”

National Taiwan Normal University — Kyushu University Joint Forum on
Facilitating Interdisciplinary Research and Education (2019年5月28日,
台湾師範大学, 招待講演)

J. Fukuda

“Exotic ordered structures in a thin film of a chiral liquid crystal”
Seminar in the program “The mathematical design of new materials” (2019
年4月3日, Isaac Newton Institute, Cambridge, UK)

《 国内での講演 》

福田順一

「コレステリックブルー相の秩序形成の理論」
日本物理学会第75回年次大会 (2020年3月17日, 名古屋大学) (学会は中止
されたが, 発表は有効の扱い)

福田順一

「キラル液晶薄膜の秩序構造とその光学的性質」第9回ソフトな物理・工学の
未来を考える会 (第28回和田岡野研OB会) (2019年10月6日, 東京大学)

福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, I. Mušević

「キラル液晶薄膜が形成する秩序構造の Kossel diagram による解析」日本物
理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 12 日, 岐阜大学)

福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, I. Mušević

「キラル液晶薄膜の秩序構造が示す Kossel diagram」2019 年日本液晶学会討
論会 (2019 年 9 月 4 日, 筑波大学)

福田順一

「キラル液晶薄膜の特異な秩序構造とその光学」ERATO 横山液晶微界面プ
ロジェクト 発足 20 周年記念研究会 (2019 年 6 月 29 日, 箱根)

藪中俊介、藤谷洋平

「臨界点近くの 2 成分混合系中のコロイドの抵抗係数」
第 9 回ソフトマター研究会 (2019 年 11 月 26 日, 名古屋大学 坂田・平田
ホール)

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

福田順一:

基盤研究 (B) 「ソフトマターの秩序構造の光学的直接観察をサポートする理論的枠組みの構築」(研究代表者, 継続)

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)

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)

福田順一:

平成 31 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」(研究代表者)

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—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)

他大学での研究と教育

福田順一: リュブリャナ大学 (スロベニア) (JSPS 二国間共同研究に基づく共同研究)

藪中俊介: パリ第 6 大学 (フランス) (科研費若手研究に基づく共同研究)、チューリッヒ大学 (スイス) (JSPS スイスとの共同研究に基づく共同研究)

学部 4 年生卒業研究

木下智貴: (指導教員: 藪中俊介, 福田順一): 流体相互作用を含むアクティブ相分離

林拓夢：(指導教員：松井淳, 福田順一)：MD シミュレーションによる揺らぎの定理の検証

米澤弦起：(指導教員：福田順一)：整数量子ホール効果とトポロジカル絶縁体

修士論文

西山大樹：(指導教員：福田順一)：スメクチック A 液晶のシミュレーション

学外での学会活動

福田順一:

日本物理学会 九州支部 支部長

SPIE OPTO “Emerging Liquid Crystal Technologies” Program Committee

ソフトマター研究会 運営委員

日本液晶学会 物理・物性研究フォーラム主査

松井淳:

計算統計物理学研究会の開催

その他の活動と成果

福田順一:

2019 年度 日本液晶学会賞 論文賞 A 部門 受賞

American Physical Society Outstanding Referee (2020) 受賞

Editorial Board Member of Scientific Reports

Editorial Board Member of Liquid Crystal Reviews

Editorial Board Member of Crystals

入学試験実施委員 (理学部)

統計物理学 研究室

研究室構成員

中西 秀 教授

野村 清英 准教授

《 大学院 博士課程 》

相場 信孝 守屋 俊志

《 大学院 修士課程 》

金子 甲二郎 (休学) 加峰 悠貴 益子 通生流 藤村 啓

《 学部 卒業研究生 》

渡利 広希 米澤 弦起 佐藤 咲季 林 拓夢

木下 智貴

担当授業

中西： 基幹物理学 II, レトリック I, 解析力学, 物理学基礎演習

野村： 物性物理学 II, 相転移の統計力学, 一般相対性理論, 量子統計物理学

研究・教育目標と成果

1. 2次元シートのパッキング (早瀬、坂上、中西) : 平らな紙が無作為に丸められて押しつぶされたときにどのような構造を取るかを明らかにするために、無造作に丸めた紙の内部構造をマイクロ CT を用いて調べた。マイクロ CT により丸めた紙の多数の断面のデータを取得し、その3次元構造を再構成した。得られたデータから構造因子やフラクタル次元などを推定した。また、タングステンを含むインクは紙よりも X 線を吸収することを用いて、紙の上に引いた直線の紙を丸めた時の3次元構造のデータを抽出した。
2. 量子スピン系における磁化率の発散 (相場、野村) : 2次元量子スピン系において、ゼロ磁化での磁化率が $T = 0$ における相境界で発散することが報告されている。本研究では、1次元量子スピン系においても、同様の発散があ

るかを確認するために、磁化率とエネルギーの磁化による4階微分 A を数値計算によって求めた。その結果、1次元系においても磁化率と4階微分 A は相境界で発散し、その発散は基底状態と励起状態間のエネルギーギャップの存在に対応することを明らかにした。また、特定のパラメータでは4階微分 A の発散が相転移を伴わない相変化に対応することを数値計算により見出した。今後、実験グループとの共同により、4階微分 A に対応する物理量の発散を実験的に観測することで、本研究の裏付けたい。

3. 1次元 $S=1$ 量子スピンドイマー・トライマーモデルの $SU(3)$ 対称性 (益子、野村) : 2017年に Oh *et al.* によって提案された、1次元量子スピン系 Dimer-Trimer(DT) モデルのハミルトニアンについて、エネルギー固有値を数値的に計算した。数値計算アルゴリズムには Lanczos 法を採用し、 $SU(3)$ 対称性および粒子数保存を用いてハミルトニアンをブロック対角化し、計算メモリを節約した。その結果、 $SU(3)$ 対称な DT モデルの系は、セントラルチャージ $c=2$ 、スケーリング次元 $x=2/3$ であることが分かった。これは、この系が BKT 的なユニバーサリティクラスに属する事を意味している。
4. 1次元 $S=1$ ボンド交代次近接量子スピン鎖ハイゼンベルグモデルでの1次-2次相転移の切り替わり (藤村, 野村) : 2つのパラメータを含む、1次元 $S=1$ ボンド交代次近接量子スピン鎖ハイゼンベルグモデルの $T=0$ での相境界を、 z 軸ひねり境界条件の下での基底状態と第一励起状態の準位交差によって求めた。さらにその相境界上の相転移のユニバーサリティクラス (スケーリング次元とセントラルチャージ) を同定し、相転移が2次相転移から1次相転移に切り替わる点を求めた。
5. ひねり境界条件を使った1次元量子スピンモデルのイジングユニバーサリティクラスの相転移点の数値計算 (守屋、野村) : 量子スピンモデルの $S=1/2$ ボンド交代 XXZ 鎖において、イジングユニバーサリティクラスの相転移点を y 軸ひねり境界条件と z 軸ひねり境界条件を用いて数値計算を用いて求めた。有限サイズ効果が小さくなるように計算する物理量を組み合わせることにより、先行研究に比べて精度の良い結果を得た。また、 $S=1, 3/2$ の場合でも同様の数値計算を行った。
6. $S=1/2$ Majumdar-Ghosh モデル近傍のエネルギーギャップの関数形 (加峰、野村) : $S=1/2$ 次近接相互作用のスピン鎖で、磁化0で波数 $q=0$ と π の状態の最低エネルギーを数値的に調べた。これらのエネルギーは、Majumdar-Ghosh モデルに対応するパラメータでは、サイズによらず厳密に縮退する。そ

れよりも次近接相互作用が大きな領域では、サイズを固定した時、これら2つのエネルギー差はパラメタに対して振動的に振る舞う。このエネルギー差の符号が変わるゼロ点から、非整合振動の波数を推定した。また相関距離についても推定し、解析的な議論と良い一致を見出した。

発表論文

《原著論文》

1. Sachi Nakao-Kusune, Takahiro Sakaue, Hiraku Nishimori, and Hiizu Nakanishi, Phys. Rev. E **101**, 012903 (2020).
“Stabilization of a straight longitudinal dune under bimodal wind with large directional variation”

《Proceedings》

著書

講演

《海外での講演》

1. Sachi Nakao-Kusune, Hiizu Nakanishi, Hiraku Nishimori, StatPhys27, Buenos Aires, Argentina, July 8-12, 2019.
”Stabilizing effect of wind-switch on isolated longitudinal dunes”
(poster presentation)

《国内での講演》

1. 日本物理学会秋季大会、2019年9月10日～13日、岐阜大学
 - (a) 相場信孝、野村清英、量子スピン系における磁化率の異常性と厳密解や共形場による対応
 - (b) 益子通生流、守屋俊志、野村清英、一次元 $S=1$ 量子スピン系における DT モデルの $SU(3)$ 対称性
 - (c) 守屋俊志、野村清英、ひねり境界条件を用いた Ising 転移の解析
 - (d) 野村清英、Lieb-Schutz-Mattis の定理とひねり境界条件

2. 第125回 日本物理学会 九州支部例会、佐賀大学 本庄キャンパス、2019年11月30日
 - (a) 藤村啓、野村清英、1次元 $S=1$ ボンド交代次近接量子スピン系の相転移
 - (b) 加峰悠貴、野村清英、Majumdar-Ghosh モデル近傍におけるエネルギーギャップの解析と整合・非整合波数
 - (c) 益子通生流、野村清英、守屋俊志、一次元 $S=1$ 量子スピン系における DT モデルの $SU(3)$ 対称性
 - (d) 守屋俊志、野村清英、ひねり境界条件を用いたイジングユニバーサリティの相転移の数値的計算
 - (e) 相場信孝、野村清英、量子スピン系における磁化率の異常性と共形場の対応
3. 第14回 量子スピン系研究会、あきた芸術村、2020年1月8日～9日
 - (a) 守屋俊志、野村清英、ひねり境界条件を用いた2次元イジングユニバーサリティクラスの相転移点の計算手法
 - (b) 野村清英、量子梯子系のスピンネマチック相とレベルスペクトロスコピー法と対称性
 - (c) 相場信孝、野村清英、”量子スピン系における磁化率の異常性”
4. 第75回 日本物理学会年次大会、名古屋大学（中止）
 - (a) 岡本清美、利根川孝、野村清英、坂井徹、異方的 $S=1/2$ 梯子系におけるネマティック TLL 相：摂動論
 - (b) 野村清英、岡本清美、利根川孝、坂井徹、異方的 $S=1/2$ 梯子系におけるネマティック TLL 相：対称性
 - (c) 利根川孝、岡本清美、野村清英、坂井徹、異方的 $S=1/2$ 梯子系におけるネマティック TLL 相：数値計算
 - (d) 坂井徹、岡本清美、利根川孝、野村清英、リング交換相互作用のある3本鎖スピンチューブのスピンネマティック相
 - (e) 相場信孝、野村清英、量子スピン系における磁化率の異常性とその発展
 - (f) 守屋俊志、野村清英、ひねり境界条件を用いた1次元量子スピン系の2次元イジングユニバーサリティクラスの相転移点の計算方法
 - (g) 益子通生流、野村清英、守屋俊志、一次元 $S=1$ 量子スピン系における Dimer-Trimer モデルの $SU(3)$ 対称性

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

学部4年生卒業研究

1. 佐藤 咲季 「スクイーズド光」
2. 林 拓夢 「MD シミュレーションによるゆらぎの定理の検証」
3. 渡利 広希 「カオス時系列データを用いた、ストレンジアトラクターの次元推定」
4. 米澤 弦起 「2次元トポロジカル絶縁体」
5. 木下 智貴 「流体相互作用を含むアクティブ相分離」

修士論文

1. 益子 通生流 「一次元 $S = 1$ 量子スピン Dimer-Trimer モデルの $SU(3)$ 対称性」
2. 加峰 悠貴 「 $S = 1/2$ Majumdar-Ghosh モデル近傍のエネルギーギャップの関数形」

博士論文

学外での学会活動

凝縮系理論

研究室構成員

河合伸 准教授 成清修 准教授

《 学部 卒業研究生 》

西村 柁 前村征哉 山 正樹

担当授業

身の回りの物理学 B (春学期、秋学期、河合伸)、物理数学 I(河合伸)、原子分子の量子力学

統計力学 II(成清修)、特殊相対性理論・電気力学 (成清修)、物理学総論 (成清修)、教職実践演習 (成清修)、非線形物理学 (成清修)

研究・教育目標と成果

科学技術の発展と感染症との関連性 (河合伸)

STM 観測下でのプローブ先端温度について、モデルハミルトニアンを用いて研究した。低温での STS スペクトルの温度ぼやけは、基板温度よりもプローブ先端温度に支配されることが明らかになった。

ホール伝導度とフェルミ面の曲率の関係を明らかにした (成清修)

金属のホール伝導度がフェルミ面の曲率で表現できることが、大昔に Tsuji (論文執筆時に九大教養部に所属) によって示された。しかし、導出方法がわかりにくいのと、考察が cubic 対称性に限られていることが不満であった。この不満を解消する提案を Haldane が 2005 年の arXiv 論文で行ったが出版はされていない。微分幾何学の根本に立ち返って Haldane の仕事を検証したところ、方向性は正しいが、結論が間違っていることが判った。結果として、任意の対称性において、ホール伝導度をフェルミ面の曲率で表現することができた。[その他の論文]

情報損失問題の総括を行った (成清修)

ブラックホールに関連して、情報損失問題は現在も活発に研究されている。多くの論者は、情報を保存させるための努力を続けている。しかし、実験科学の立場からすれば、ブラックホールなど無くても、常に情報が損失しているのは自明であると思われる。このことについて、以下の観点から総括を行った。実験科学ならば、観測可能なものについて語るべきであるが、観測可能な有界系は開放系であるため、情報損失は常に起こっている。また、因果律を理論に実装するためには、(有界系でも)無限自由度の場の理論を用いなければならないが、これはユニタリー変換で閉じた理論ではないため、情報は保存しない。[その他の論文]

フォン・ノイマン環の必然性を論じた (成清修)

「物理の理論は観測データを構造化する手続きである」との立場から研究を進めている。実験には誤差が不可避なので、誤差の範囲でしか語る事が許されない。誤差を含んだ実験と対応させることができるのは、位相を含んだ理論ということになる。観測データを表現する位相空間を用意し、位相空間の点の近傍によって実験精度が考慮される。このような現実的な考察の延長上に、弱位相で閉じた*環 (フォン・ノイマン環) がある。実験科学の表現のためには、フォン・ノイマン環を用いることが必然なのである。フォン・ノイマン環に関する議論は長大になるが、その手始めとして、必然性を論じた。[その他の論文]

発表論文

《その他の論文》

Note on a geometrical formula for the Hall conductivity in metals

O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/2344834>)

Origins of Information Loss

O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/2560386>)

学部生のための「マイクロ・マクロ双対性」とその周辺の物理学講義

第1講：マイクロ・マクロ双対性の門前

成清修

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/2560376>)

学部4年生卒業研究

西村 桓：(指導教員、成清修)：経路積分における時空の最適化

前村征哉：(指導教員、成清修)：圏論的量子論における局所ゲージ不変性

山 正樹：(指導教員、成清修)：量子電磁力学の代数的アプローチ

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

《 博士研究員 》

船島 洋紀

《 大学院 博士課程 》

大山 耕平 田邊 巧祐

《 大学院 修士課程 》

上野 裕之 馬場 佳吾 松友 寛太

《 学部 卒業研究生 》

飯森 陸 木下 啓也 仲村 拓哉

《 訪問研究者 》

Prof. Hoa Kim Ngan Nhu-Tarnawska (Pedagogical University)

担当授業

熱力学 (和田裕文)、磁性体物理学 (和田裕文)、基幹物理学 IB (和田裕文)、物性物理学 I(光田暁弘)、基幹物理学 IB(光田暁弘)、物理学総合実験 (光田暁弘)、物理学入門 II(光田暁弘)

研究・教育目標と成果

巨大磁気熱量効果を示す Mn 化合物を用いた磁気冷凍作業物質の開発 (和田裕文、田邊巧祐)

Fe₂P 型を持つ (Mn,Fe)₂(P,Si) 化合物は巨大磁気熱量効果を示す。この物質をベースとした磁気冷凍材料の開発とその物理を調べている。今年度は大電株式会社との共同研究で室温以上の比較的高温領域で巨大磁気熱量効果を示す物質の探索を行った。その結果、室温以下と変わらないくらいの性能を示す物質の開発に成功している。

磁場中伝導現象の研究 (和田裕文、船島洋紀、田邊巧祐、上野裕之)

遍歴電子メタ磁性体 La(FeSi)₁₃ についてはこれまでホール効果の測定を行ってきたが、

今年度は熱伝導度の温度変化を調べた。これまで一次転移を示す物質の熱伝導度がキュリー温度近傍で異常を示すこと、およびその解釈をおこなってきたが、この系でも同じような熱伝導度の異常が観測された。また、船島洋紀氏が学術研究員（特任助教）として着任したので、 $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ や ErCo_2 の正常ホール効果についてバンド計算で求めるための研究を開始した。

新規価数転移物質 $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ における強磁場磁化過程と Ga 置換効果 (和田裕文、光田暁弘、大山耕平)

これまで Eu 系の価数転移に注目して研究を行ってきたが、最近、 $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ が新しい価数転移物質として報告された。この結晶構造は六方晶と直方晶の超構造であり、これまで報告されている物質群 (層状正方晶 ThCr_2Si_2 型) とは大きく異なっている。一方、報告されている価数転移の振舞は従来の物質と非常に良く似ている。そこで、我々は結晶構造の違いによる価数転移の振舞の相違に興味を持ち、本物質の強磁場効果および Ga 置換効果を調べた。強磁場磁化過程においては 30T 付近に磁化の鋭い跳びが見られ、本物質でも明瞭な磁場誘起価数転移が観測された。この測定を最低温度 4.2K から徐々に温度を上げながら測定していくと転移磁場が低温へシフトし、その振舞を磁場-温度相図にまとめると、価数転移物質に共通で見られる 1/4 楕円形状の相境界線となった。この相境界線は磁性体に対するクラウジウス-クラペイロンの式で定量的に再現されることも見いだした。更に Ga 置換効果についても調べた。Ga 置換により格子定数は大きくなり Eu の価数は 2 価の方向へシフトし、価数転移温度は低温側へシフトした。Ga10%置換で価数転移は抑制され、全温度範囲でほぼ 2 価で一定であることも明らかになった。この領域では Eu^{2+} の反強磁性秩序が安定化する。この結果を温度-Ga 置換量相図にまとめると、Ga 置換とともに価数転移温度が直線的に 20K まで減少し、突然反強磁性秩序が出現する。この相図も既存の Eu 系価数転移物質に非常によく似ていることが明らかになった。次年度以降は、外部の研究者と共同で光電子分光測定を行い、微視的な電子状態の観点から研究を進めて行く。

価数秩序物質 EuTX の化学的及び静水圧的圧力効果 (光田暁弘、和田裕文、馬場佳吾)

六方晶 ZrBeGe 型構造をもつ EuTX ($\text{T}=\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ni}$, $\text{X}=\text{P}, \text{As}$) は多段の価数転移を示すとともに各相の Eu の平均価数が $2 + n/6$ ($n = 1, 2, 3, 4$) を示し、低温で磁気秩序が見られることから価数秩序の可能性が指摘されている。本年度は、過去に当研究室で詳しく調べた $\text{EuPtP}_{1-x}\text{As}_x$ 系について静水圧力効果を調べた。この系は As 置換によって負の化学的圧力を印加しており、As 置換とともに n が減少する (Eu の価数が 2 価方向へ移行する) 振舞が既に明らかにされている。今回は静水圧力を印加することで化学的圧力と静水圧力の対応関係を調べることを目的とした。その結果、 $n = 1 \leftrightarrow 2$ の価数

転移温度が圧力とともに高温へシフトし、 $n = 2$ の温度領域が拡大することが明らかになった。これは予想通りの結果であったが、更に圧力を加えても $n = 2 \leftrightarrow 3$ の明瞭な価数転移は出現せず、圧力に対して緩やかに $n = 3$ に向かっているような振舞が観測された。これは、負の化学的圧力の逆の振舞とはなっていない。As 置換によって導入される結晶のランダムネスの効果が効いている可能性が考えられる。次年度は、高圧下で新奇な相が見つまっている EuPdP について低温・高圧下の粉末 X 線回折を行い、新奇な相の原因や価数秩序の振舞を調べる。

発表論文

《 原著論文 》

Thermal conductivity of giant magnetocaloric Mn compounds:

H. Wada, K. Fukuda, T. Ohnishi, K. Soejima, K. Otsubo, K. Yamashita
J. Alloys Compd. vol. **785** (2019) 445-451.

Magnetic transport properties of heavy fermionic EuNi_2P_2 :

H. Wada, K. Tanabe, I. Yamamoto and A. Mitsuda
Solid State Commun. vol. **300** (2019) 113665 (5 pages).

Electronic Structure of the Valence Transition System $\text{Eu}(\text{Rh}_{1-x}\text{T}_x)_2\text{Si}_2$ ($\text{T} = \text{Co}, \text{Ir}$)
Studied by High-Energy Resolution Fluorescence Detection X-Ray Absorption Spectroscopy:

Ryohei SHIMOKASA, Naomi KAWAMURA, Taku KAWABATA, Gen ISUMI, Takayuki UOZUMI, Akihiro MITSUDA, Hirofumi WADA, Fuminori HONDA, Masato HEDO, Takao NAKAMA, Yoshichika NUKI, Masaichiro MIZUMAKI, Kojiro MIMURA
JPS Conf. Proc. **30** (2020) 011134-1-5

Ultrasound investigation of the Eu-based mixed valence system EuRh_2Si_2 :

Yoshiki NAKANISHI, Shinya KUDO, Kyouhei KIKUTANI, Mitsuteru NAKAMURA, Masahito YOSHIZAWA, Akihiro MITSUDA
JPS Conf. Proc. **30** (2020) 011133-1-5

Point-Contact Spectroscopy Study of YbPd/W Interface:

Masanobu Shiga, Takurou Harada, Takuya Takahashi, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yuji Inagaki, Tatsuya Kawae
JPS Conf. Proc. **30** (2020) 011139-1-6

Pressure-induced Cubic Valence Fluctuating Ground State in YbPd:
Kohei Oyama, Kousuke Tanabe, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Naohisa Hirao, Saori Imada Kawaguchi, Yasuo Ohishi, Jun Gouchi, Yoshiya Uwatoko
JPS Conf. Proc. **30** (2020) 011141-1-6

Development of Low-Energy Fluctuations Toward Structural Transition in YbPd Inferred from ^{105}Pd NMR:
Y. Nakai, R. Nakanishi, T. Fujii, M. Hirata, K. Oyama, A. Mitsuda, K. Ueda, H. Wada, T. Mito
JPS Conf. Proc. **30** (2020) 011140-1-4

Observation of Kondo resonance in valence-ordered YbPd:
Shiga Masanobu, Okimura Kengo, Takata Hiroki, Mitsuda Akihiro, Maruyama Isao, Wada Hirofumi, Inagaki Yuji, Kawae Tatsuya
Phys. Rev. B **100** (2019) 245117-1-7

Photoinduced valence dynamics in $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.21}\text{Ge}_{0.79})_2$ studied via time-resolved x-ray absorption spectroscopy:
Y. Yokoyama, K. Kawakami, Y. Hirata, K. Takubo, K. Yamamoto, K. Abe, A. Mitsuda, H. Wada, T. Uozumi, S. Yamamoto, I. Matsuda, S. Kimura, K. Mimura, H. Wadati
Phys. Rev. B **100** (2019) 115123-1-6

《その他の論文》

YbPdにおける価数秩序構造を反映した磁気秩序:

大山耕平、田邊巧祐、光田暁弘、和田裕文

九州大学低温センターだより No.14 (2020) p.7-12

講演

《 海外での講演 》

Novel pressure effects on functional nano spintronic devices:

Akihiro Mitsuda, Motoki Kaneda, Kanta Matsutomo, Takashi Kimura, and Hiromi Yuasa

Joint 5th Int'l Symposium on Frontiers in Materials Science & 3rd Int'l Symposium on Nano-materials, Technology and Applications, Duy Tan University (Vietnam), 2019年11月

《 国内での講演 》

$(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)_{2/3}\text{La}_{1/3}\text{FeO}_3$ の X 線吸収分光:

高橋龍之介, Yujun Zhang, 大山耕平, 光田暁弘, 高橋英史, 小野瀬雅穂, 石渡晋太郎, 伊奈稔哲, 瀬戸山寛之, 和達大樹

日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020年03月

点接合分光法を用いた希土類化合物の電子状態測定:

高橋拓也, 志賀雅亘, 原田琢良, 光田暁弘, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也

日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020年03月

超音波測定による中間価数物質 EuNi_2P_2 の弾性特性:

宋木直茂, 村上陸, 工藤慎也, 中村光輝, 吉澤正人, 中西良樹, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020年03月

$\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ の Ga 置換による Eu の価数状態変化:

大山耕平, 光田暁弘, 和田裕文, 高橋龍之介, Yujun Zhang, 和達大樹, 瀬戸山寛之

日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020年03月

$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.21}\text{Ge}_{0.79})_2$ の強磁場磁気特性:

鈴木悠太, 松田康弘, 小濱芳允, 光田暁弘

日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020年03月

時間分解軟 X 線吸収分光で観測した $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.21}\text{Ge}_{0.79})_2$ の超高速光誘起価数転移:

山神光平, Yujun Zhang, 山本航平, 上田大貴, Urs Staub, Sang Han Park, Soonnam Kwon, 三村功次郎, 光田暁弘, 和田裕文, 和達大樹

日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020年03月

点接合分光法を用いた重い電子系物質 EuNi_2P_2 の混成ギャップの観測:
志賀雅亘, 沖村健吾, 原田琢良, 光田暁弘, 丸山勲, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也
日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020 年 03 月

Observation of the hybridization gap in the intermediate valence system EuNi_2P_2 using point-contact spectroscopy:

Masanobu Shiga, Kengo Okimura, Takuro Harada, Isao Maruyama, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yuji Inagaki, and Tatsuya Kawae
Taiwan-Japan International Workshop, Saga University (Japan), 2019 年 11 月

Sinusoidal Magnetic Structure Associated with Valence Order in YbPd :

Kohei Oyama, Masaki Sugishima, Kousuke Tanabe, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Kenji Ohoyama, Takeshi Matsukawa, Yukihiko Yoshida, Akinori Hoshikawa, Toru Ishigaki, and Kazuaki Iwasa

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University (Japan), 2019 年 11 月

点接合分光法を用いた EuNi_2P_2 の混成ギャップの観測:

志賀雅亘, 原田琢良, 高橋拓也, 光田暁弘, 丸山勲, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也
第 125 回日本物理学会九州支部例会, 佐賀大学本庄キャンパス, 2019 年 11 月

点接合分光法を用いた YbInCu_4 の電子状態測定:

高橋拓也, 志賀雅亘, 原田琢良, 光田暁弘, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也
第 125 回日本物理学会九州支部例会, 佐賀大学本庄キャンパス, 2019 年 11 月

高圧下におけるナノ磁性薄膜の電流磁気効果:

松友寛太, 有木大晟, 宮崎圭司, 木村崇, 光田暁弘
電子情報通信学会・磁気記録・情報ストレージ研究会 (MRIS), 九州大学西新プラザ,
2019 年 10 月

Point-Contact Spectroscopy Study of YbPd/W Interface:

Masanobu Shiga, Takuro Harada, Takuya Takahashi, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yuji Inagaki, and Tatsuya Kawae

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019, Okayama Convention Center (Japan), 2019 年 9 月

Pressure-induced cubic fluctuating ground state in YbPd:

Kohei Oyama, Kousuke Tanabe, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Naohisa Hirao, Saori Imada Kawaguchi, Yasuo Ohishi, Jun Gouchi, and Yoshiya Uwatoko

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019, Okayama Convention Center (Japan), 2019 年 9 月

Suppression of Valence Transition and Valence Order in $\text{EuPtP}_{1-x}\text{As}_x$:

Akihiro MITSUDA, Masaki SUGISHIMA, Kiyofumi NITTA, Masaichiro MIZUMAKI, and Hirofumi WADA

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019, Okayama Convention Center (Japan), 2019 年 9 月

$\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ の点接合分光実験:

志賀雅亘, 沖村健吾, 原田琢良, 丸山勲, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学, 2019 年 9 月

$\text{Eu}_2\text{Pt}_6(\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x)_{15}$ における Ga 置換効果:

大山耕平, 光田暁弘, 和田裕文, 鳴海康雄, 萩原政幸, Yujun Zhang, 和達大樹

日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学, 2019 年 9 月

点接合分光法を用いた価数秩序物質 YbPd の電子状態測定:

志賀雅亘, 沖村健吾, 高田弘樹, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学, 2019 年 9 月

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

巨大磁気熱量効果を示す一次相転移磁性体の熱伝導度研究

研究代表者：和田裕文

文部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

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

JST ALCA

階層構造磁気蓄熱再生器を持つ磁気ヒートポンプの開発

研究代表者:川南 剛

学部4年生卒業研究

飯森 陸：(指導教員、光田暁弘)：ラッシュバ磁気抵抗の圧力依存性

木下 啓也：(指導教員、和田 裕文)： $\text{LaFe}_{12}\text{B}_6$ の磁気熱量効果における Co 置換の影響

仲村 拓哉：(指導教員、光田暁弘)：反強磁性体 $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Ga}_{15}$ における Ni 置換効果

修士論文

上野 裕之:(指導教員、和田裕文)：遍歴電子メタ磁性体 $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ の熱伝導度測定

馬場 佳吾:(指導教員、光田暁弘)：価数秩序転移を示す EuTX 系における化学的および静水圧的圧力効果

学外での学会活動

光田暁弘：日本物理学会九州支部役員

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：九州大学理学部附属極低温実験室運営委員

光田暁弘：九州大学理学部大学説明会委員

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 —————
物性物理学 III (週 1 コマ)
電磁気学 II (週 1 コマ)
最先端物理学 (オムニバス方式の分担者 1 回担当)
基幹物理学 IA (週 1 コマ 全学共通教育)
基幹物理学 IB (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)
半導体物理学 (週 1 コマ)

上記講義数は、物理学科の一般教授の約 2 倍である。

今年度の電磁気学 II は、地球惑星科学科の受講者ゼロ。

————— 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)

———— 量子微小物性 A 渡部 —————

(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 146 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 171 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し、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 125 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 179 回

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 57,R5563(1999) 被引用 106 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 657 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, *Ferroelectrics* 349, 190-209 (2007) (自己論文の解説) 被引用 44 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 3.5 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 1.8

0° 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》

Y. Watanabe, Electrostatics Liberating Restrictions on Ferroelectric by Unification of Polar Discontinuity e- h+ layers and Criteria of Intrinsicity, Ferroelectrics556, 1, 29-

36 (2020).

《Proceedings》

Y. Watanabe, Verification of Permittivity for Depolarization as Unity by Ab Initio Calculations, Ferro2020 Extended abstract(2020)

講演

《海外での講演》

国際会議

Y. Watanabe, Renovation of Electrostatics of Ferroelectrics Liberating Ferroelectricity from Established Restrictions, European Meeting on Ferroelectricity EMF (2019, Swiss). (招待講演)

Y. Watanabe, Verification of Permittivity for Depolarization as Unity by Ab Initio Calculations Fundamental Physics of Ferroelectrics (2020, USA).

外部資金

《文部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

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-scope Structures (ISFD-15) 組織委員

European Meeting on Ferroelectricity EMF (2019, Swiss) 座長

その他の活動と成果

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

村田学術振興財団 選考委員

Integrated Ferroelectrics, Editorial Board

九州大学出版会 理事

中等教育担当教員研修事業（高校教員を対象としたリカレント教育）：設定取りまとめ
と補助

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

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 》

胡少杰

《 大学院 博士課程 》

有木大晟 Md. Kamruzzaman Amany E. Harby

《 大学院 修士課程 》

伊藤大樹 藤田光翔

Hossain Towfiq

Zheng Gang 松田亮 屋富祖稔 宮崎圭司

須小遼河 吉瀬みのり

《 学部 卒業研究生 》

岩堀 拓真 大日方 初良 高山 裕成 鍋島 すみれ

中田 巧 新谷 将司

《 訪問研究者 》

紅林 秀和 (客員教授 University College London)

担当授業

物理実験学 (木村崇)、基幹物理学 I A (木村崇)、基幹物理学 IB (木村崇)、電磁気学 1・同演習 (木村崇)、物理学総合実験 (木村崇、山田和正)、物理学基礎実験 (大西紘平)、自然科学総合実験 (大西紘平)

研究・教育目標と成果

動的スピン注入における強磁性体膜厚依存性 (木村崇、大日方)

強磁性共鳴 (FMR) を利用した動的スピン注入は、その構造が簡易的であることもあり、精力的に研究されている。強磁性体/非磁性体の二層構造において、FMR が誘起された時、強磁性体から非磁性体にスピン流が注入される。このスピン流注入のメカニズムに関しては、主にスピンプンピングで説明されるが、FMR ヒーティング効果も

そのメカニズムの一因となり得る。スピントルク強磁性共鳴法という測定手法は、得られる信号の対称成分がスピン注入による逆スピンホール効果に由来するものであることから、動的スピン注入を評価する際にも、広く利用されている。しかしながら、近年、異方性磁気抵抗効果なども同じく対称成分として検出されることが指摘されている。そこで、より精度よく動的スピン注入による逆スピンホール効果を検出するために、新しい構造を用いてホモダイン検波信号の測定を行った。また、動的スピン注入におけるFMRヒーティング効果の寄与を評価するために、動的スピン注入における強磁性体の膜厚依存性を調査した。

スピン依存ペルチェ効果の観測 (木村崇、須小 遼河)

電流と熱流が相互現象を起こすように、スピン流と熱流も互いに影響を及ぼすことがわかっており、本研究はその中でもスピン依存ペルチェ効果の観測を目的としている。これは強磁性金属と常時性金属の間の界面にスピン流を流すことで熱流が発生する現象である。我々は横型スピバルブを改良したデバイスを用いることで、強磁性ハーフメタルCoFeAlとCuのペアにおける効果の観測に成功し、引き続きその特性に関する検証を行っている。

YIG 薄膜上の Pt 薄膜における磁気伝導、及び熱伝導特性 (木村崇、河邊 怜也)

強磁性体/常磁性重金属二層膜では、様々な現象が重なり合っており、本質的な現象を見極めるのは困難であるとされる。このような二層膜YIG/PtをGGG基板上に作成し、本質的な現象を見極めることを目指した。試料振動型磁力計や強磁性共鳴法、磁気抵抗測定を用い、磁気伝導特性及び熱伝導特性を測定した。

層間結合した強磁性体多層膜における非線形スピンドYNAMIKSの観測 (木村崇、屋富祖)

複数の磁性層を有する磁性多層膜にマイクロ波を照射すると各磁性層の共鳴状態に対応した磁化の歳差運動が励起される。この場合、磁性層間の層間相互作用や歳差運動が原因でスピン流注入が生じ、各磁性層の共鳴モードは変調される。そのような多層膜の多重共鳴を観測するために、超高真空スパッタ装置を用いてCoFeB/Pt/NiFe多層膜を作成し、強磁性共鳴測定装置や振動試料型磁力計で、各磁性層の共鳴特性に関して詳細な評価を行った。

スピン偏極超伝導電流の探索 (大西)

昨年度から引き続き、英国ケンブリッジ大学に長期滞在し、面内構造における超伝導体におけるスピン偏極超伝導電流 (STC) の探索を行った。スピバルブ構造におけ

るスピン吸収効果と組み合わせることにより、STCの定量的評価方法の確立を目指し、実験を行った。昨年度に立ち上げた測定系を用いて、実際にケンブリッジ大学で作成した素子を測定したところ、明瞭なスピン信号が得られた。しかしながら、STC生成層の有無によるスピン信号の明瞭な変化は観測できなかった。今後、バイアス電流によるジュール熱の影響やSTC生成層の構成の違いについて、検討を加える。

超伝導 Nb 細線におけるスピン偏極準粒子の緩和過程 (大西、岩堀 拓真)

本研究では、Nb超伝導体に注入された準粒子のスピン偏極状態が、準粒子の緩和過程に与える影響を評価した。スピン偏極電子を生成するために、強磁性体のCoFeAl細線をNb超伝導体に接続した微細多端子構造素子を作製した。この素子を用いて、準粒子流により生じる非局所抵抗の距離依存性を評価したところ、準粒子がスピン偏極している場合、緩和に要する距離が長くなるという結果が得られた。今後、電流を変化させた場合や素子に磁場を印加した場合の緩和過程についても評価を行う。

重金属細線を含む横型スピバルブ構造素子による第二高調波の磁場依存性 (木村崇、松田)

散逸的な熱流がスピン流に変換される物理現象が、多くの先行研究によって確認されている。その現象の一つであるスピネルンスト効果の観測が本研究の目的である。観測に向けて、横型スピバルブ構造素子による非局所測定やCOMSOLによる熱流評価を行った。しかし、検出信号が極めて微小であったので、有意な結果を報告するために、実験技術や素子構造の改良に取り組んでいる。

スピギャップレス半導体のプレーナーホール効果 (山田)

近年、スピギャップレス半導体(SGS)が学術面および応用面で注目されている。SGSにおいて、マイノリティスピンのバンドはギャップを持ち、マジョリティスピンのバンドはギャップレスであり、完全スピン偏極である。SGSの候補としてCoFeMnSi(CFMS)がある。英国ヨーク大学に長期滞在し、ヨーク大学が保有しているHiTUS装置を使用し、室温基盤および加熱基盤上でCFMSを成膜した。プレーナーホール効果の測定を行った。室温基盤と比較し、加熱基盤上で成膜したプレーナーホール効果の符号が反転することが分かった。加熱基盤上で成膜した膜は、結晶性がよく、スピン偏極率が高く、電子が散乱する際にスピン反転の確率が低いためであると考えられる。

発表論文

《原著論文》

Thermal Spin-Valve Effect in Magnetic Multi-layered Nanowires:

Nagarjuna Asam, Kazuto Yamanoi, Kohei Ohnishi, Takashi Kimura,

Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, **32** (2019) pp. 3109-3113

Temperature dependence of mobility of conducting polymer polyaniline with secondary dopant:

Kazumasa Yamada, Bunju Shinozaki, Takashi Narikiyo, Yousuke Takigawa, Norihiro Kuroda, Toru Bando, Hiroaki Nakamura,

Synthetic Metals, **247** (2019) pp. 124-130

Bolometric ferromagnetic resonance techniques for characterising spin-Hall effect at high temperatures:

Phu P., Yamanoi K., Ohnishi K., Hyodo J., Rogdakis K., Yamazaki Y., Kimura T., Kurebayashi H.,

Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **485** (2019) pp. 304-307

Signature of spin-dependent Seebeck effect in dynamical spin injection of metallic bilayer structures:

Kazuto Yamanoi, Minoru Yafuso, Keishi Miyazaki and Takashi Kimura,

JPhys Mater, J. Phys. Mater. **3** pp.014005 (2020) <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ab45cc>

Spin-orbit torque-driven current-induced domain wall motion in Gd-Fe magnetic wires:

Y. Kurokawa, M. Wakae, S. Sumi, H. Awano, K. Ohnishi, and H. Yuasa,

Jpn. J. Appl. Phys. **58** (2019) pp.030905-1-4

Quasi-antiferromagnetic multilayer stacks with 90 degree coupling mediated by thin Fe oxide spacers:

G. Nagashima, Y. Kurokawa, Y. Zhong, S. Horiike, D. Schonke, P. Krautscheid, R. Reeve, M. Klaui, Y. Inagaki, T. Kawae, T. Tanaka, K. Matsuyama, K. Ohnishi, T. Kimura, and H. Yuasa,

J. Appl. Phys. **126** (2019) pp. 093901-1-8

Asymmetric nonlocal signal induced by thermoelectric effects in a lateral spin valve:

N. Asam, T. Ariki, T Kimura,

Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures **117** (2020) pp.113738

Spin-transport in superconductors:

K. Ohnishi, S. Komori, G. Yang, K. R. Jeon, L. A.B. Olde Olthof, X. Montiel, M. G. Blamire, J. W.A. Robinson,

Applied Physics Letters, **116** (2020) 130501

Superconductivity in Palladium Hydride Systems:

Tatsuya Kawae, Yuji Inagaki, Si Wen, Souhei Hirota, Daiki Itou, Takashi Kimura, journal of the physical society of japan, **89** (2020) pp.051004

Pressure Effects on Magnetic and Transport Properties in CoFe-Based Spin Valve:

Akihiro Mitsuda, Motoki Kaneda, Kanta Matsutomo, Takashi Kimura, Hiromi Yuasa, Materials Transactions, **61** (2020) pp.1483-1486

講演

《 海外での講演 》

Magnetic properties and the planar Hall effect of CoFeMnSi films:

Kazumasa Yamada, Takashi Kimura, Kelvin Elphick, Marjan Samiepour and Atsumi, Hirohata,

MMM2019, Las Vegas, USA, (Nov 2019)

Electrical Detection of Spin Nernst Effect Using Lateral Spin Valve Structure:

Ryo Matsuda, Ryoga Suko, Daiki Ito, Takashi Kimura,

MMM2019, Las Vegas, USA, (Nov 2019)

Observation of the spin-dependent Peltier effect in lateral spin valve:

R. Suko, R. Matsuda, D. Ito and T. Kimura,

MMM2019, Las Vegas, USA, (Nov 2019)

Electrical detection of diffusive spin current absorbed at Ag/Bi Rashba interface:

D. Ito and T. Kimura,

MMM2019, Las Vegas, USA, (Nov 2019)

Non linear spin dynamics induced in magnetically coupled CoFeB/Pt/NiFe trilayer:

M. Yafuso and T. Kimura,

MMM2019, Las Vegas, USA, (Nov 2019)

Spin-dependent heat transport in a Co-Cu-Py trilayer:

Md Kamruzzaman, Shaojie Hu, Takashi Kimura,

FMS-NANOMATA2019, DaNang, Vietnam (Nov2019)

Anomalous Hall effect in Cr₂Ge₂Te₆/Pt hybride structure:

Shaojie HU, Takashi Kimura,

FMS-NANOMATA 2019, Danang, Vietnam (Nov 2019)

Novel pressure effects on functional nano spintronic devices:

Akihiro Mitsuda, Motoki Kaneda, Kanta Matsutomo, Takashi Kimura and Hiromi Yuasa,

FMS-NANOMATA 2019, Danang, Vietnam, Japan (Nov 2019)

Nonlocal spin transport in strong spin-orbit bilayer spin channel:

Takashi Kimura,

FMS-NANOMATA 2019, Danang, Vietnam (Nov 2019)

Nonlocal spin transport in strong spin-orbit bilayer spin channel:

Daiki Itou and Takashi Kimura,

FMS-NANOMATA 2019, Danang, Vietnam (Nov 2019)

Spin-dependent heat transport in a Co-Cu-Py trilayer:

Md Kamruzzaman, Shaojie Hu, Takashi Kimura,

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University, Japan (Nov 2019)

Study of Superconducting Transition of PdHx Prepared by Low-temperature Absorption:

Si Wen, Souhei Hirota, Yuji Inagaki, Daiki Itou, Takashi Kimura, and Tatsuya Kawae,

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University, Japan (Nov 2019)

Electrical detection of diffusive spin current absorbed at Ag/Bi Rashba interface:

Daiki Ito, and Takashi Kimura,

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University, Japan (Nov 2019)

Electrical Detection of Spin Nernst Effect Using Lateral Spin Valve Structures:

Matsuda Ryo, R. Suko, D. Ito, K. Ohnishi, T. Kimura,

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University, Japan (Nov 2019)

Magnetolectric Materials for Spintronics Applications:

Amany Harby, and Takashi Kimura,

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University, Japan (Nov 2019)

Anomalous Hall effect in Cr₂Gr₂Te₆/Pt hybrid structure:

Shaojie Hu, and Takashi Kimura

Taiwan-Japan International Workshop, Saga University, Japan (Nov 2019)

《国内での講演》

非磁性重金属における熱流-スピン流変換の実験的観測:

松田亮、須小遼河、伊藤大樹、有木大晟 木村崇

第43回 日本磁気学会 京都市 (2019年9月)

常磁性重金属界面におけるスピン吸収とスピン変換:

伊藤大樹、木村崇

第43回 日本磁気学会 京都市 (2019年9月)

Ag/Bi チャネル層への非局所スピン注入と検出:

伊藤大樹、木村崇

日本物理学会 2019年秋季大会, 岐阜大学 (2019年10月)

ボロメトリックスピントルク共鳴法を用いた高温スピンホール角の評価:

山野井一人、大西浩平、兵頭潤次、山崎仁丈、木村崇、紅林秀和

日本物理学会 2019年秋季大会, 岐阜大学 (2019年10月)

常磁性重金属細線を含む横型スピバルブ構造素子によ第二高調波の非対称磁場依存性:

松田亮、須小 遼河、伊藤 大樹、有木 大晟、木村崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

横型スピバルブを用いたスピン依存ペルチェ効果の観測:

須小遼河、松田 亮、伊藤大樹、有木大晟、大西紘平、木村崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

熱起因現象を意識した CoFeB/Pt 二層膜におけるスピダイナミクスの評価:

宮崎圭司、屋富祖稔、木村崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

CoFeB/Al 界面におけるスピン伝導の評価:

大日方初良、宮崎圭司、伊藤大樹、大西紘平、木村 崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

層間結合した強磁性多層膜における非線形スピダイナミクスの観測:

屋富祖 稔、宮崎圭司、木村 崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

非局所スピン注入によるラシュバ・エデルシュタイン効果の電氣的検出:

伊藤大樹、木村 崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

YIG 薄膜上の Pt 薄膜における磁気伝導、及び熱伝導特性:

河邊怜也、伊藤大樹、宮崎圭司、屋富祖 稔、木村 崇

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

高圧下におけるナノ磁性薄膜の電流磁気効果:

松友寛太、有木大晟、宮崎圭司、木村 崇、光田暁弘

磁気記録・情報ストレージ研究会 福岡県 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

Spin-dependent heat transport in a Co-Cu-Py trilayer:

Md Kamruzzaman, Shaojie Hu, Takashi Kimura,

IEICE Technical Committee on Magnetic Recording & Information Storage (MRIS)
2019,Nishijin Plaza, Kyushu University,2019/10/18

CoFeB/Al 界面におけるスピン伝導の評価:

大日方初良、宮崎圭司、伊藤大樹、大西紘平、木村崇
電子情報通信学会 九州大学 西新プラザ (2019年10月)

強磁性/非磁性二層薄膜におけるホモダイナミック検波信号の起源:

大日方初良、宮崎圭司、木村崇
第125回日本物理学会九州支部例会 佐賀大学 (2019年11月)

超伝導 Nb 細線へのスピン偏極準粒子注入:

岩堀拓真、松田亮、伊藤大樹、大西紘平、木村崇
第125回日本物理学会九州支部例会 佐賀大学 (2019年11月)

強磁性 / 非磁性重金属多層膜における微視的結晶構造とスピンドイナミクス:

高山裕成、宮崎圭司、屋富祖稔、伊藤大樹、木村崇
第125回日本物理学会九州支部例会 佐賀大学 (2019年11月)

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:

中田巧、高山裕成、屋富祖稔、山田和正、木村崇
第125回日本物理学会九州支部例会 佐賀大学 (2019年11月)

大日方初良、宮崎圭司、伊藤大樹、大西紘平、木村崇:

強磁性/非磁性二層膜における高周波電気磁気信号の解析
日本物理学会第75回年次大会 名古屋大学 (現地開催中止) (2020年3月)

強磁性電極を有する Nb 超伝導細線素子における準粒子伝導特性:

岩堀拓真、松田亮、伊藤大樹、大西紘平、木村崇
日本物理学会第75回年次大会 名古屋大学 (現地開催中止) (2020年3月)

各種磁性薄膜における応力誘起磁気異方性の評価:

中田巧、高山裕成、屋富祖稔、山田和正、木村崇
日本物理学会第75回年次大会 名古屋大学 (現地開催中止) (2020年3月)

各種磁性多層膜における磁気ダンピング項の非線形性の評価:

高山裕成、伊藤大樹、屋富祖稔、宮崎圭司、木村崇

日本物理学会第75回年次大会 名古屋大学（現地開催中止）（2020年3月）

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究

ナノスピン変換科学

研究分担者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

熱スピン注入による磁歪制御とナノスピナクチュエータの開発

研究代表者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、挑戦的研究 (開拓)

ナノスピナダイナミクス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

文部省科学研究費補助金、若手研究 (B)

高効率スピン注入によるスピン偏極超伝導電流生成の実現

研究代表者：大西 紘平

文部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

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

戦略的国際研究交流推進事業費補助金

ワイヤレス動作するグリーン・ナノスピndeバイスの国際研究開発拠点

主担当研究者：木村 崇

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

修士論文

藤田 光翔：(指導教員、木村崇)：ヒロト フレキシブル基板上の磁性薄膜の磁気異方性制御に関する研究

伊藤 大樹：(指導教員、木村崇)：CoFeAl/Ag 界面及び Bi/Ag 界面における新奇スピントランスポートに関する研究

吉瀬 みのり：(指導教員、木村崇)：磁性体における偏光方位角度分解ラマン散乱分光 (東京工業大学 佐藤教授)

複雑物性基礎

研究室構成員

木村 康之 教授

水野 大介 准教授 稲垣 紫緒 准教授

植松 祐輝 助教

《 博士研究員 》

野口朋寛

《 大学院 修士課程 》

壹岐 晃平 岩本 健太 内海 脩帆 近堂 くるみ

杉野 裕次郎 福本 昂平 三谷 一晃 安藤 祐貴

林 和気 藤原 誠 白木 啓悟 江藤 高宏

《 学部 卒業研究生 》

益永 真聡 荊原 佳祐 河本 彩帆 田旗 栄太

満生 明輝 井口 昇之

《 研究生 》

担当授業

物理学の進展(木村康之)、振動と波動(木村康之)、複雑系物理学(木村康之)、物理学特別講義C(生物物理学)(水野大介)、基幹物理学II(水野大介)、物理学総合実験(木村康之・水野大介・稲垣紫緒・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)
- 新規なレーザートラップ手法の開発や、それによる力測定・粒子操作をコロイド系に適用し、その物性測定及び非線形挙動の解明を行なうことを目指した。(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。(2, 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)
- 非平衡現象を解明するための新規なマイクロレオロジー測定システムの開発を旨とした。(2)
- 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。(6, 7)
- 粉粒体のバンド構造や局所構造の解明を旨とした。(8, 9)
- 流動化した粉粒体の粘度測定。(10)
- 粉体時計に関する実験的研究。(11)
- 細胞骨格, コロイド系の局所非線形力学応答の普遍的性質の解明。(14)
- 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。(15,17,18)
- 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。(16)
- 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。(17)
- 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。(15,13)
- 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。(12)

(1) **光駆動回転粒子系での協同運動解明** (岩本、木村)

波面がらせん状の光渦は粒子に軌道角運動量を与えることができ、流体中を流体相互作用しながら円軌道上を回転する系で、光渦中にトラップした楕円粒子がすりこぎ運動すること、また、その回転速度を渦度と入射強度により制御することに成功した。さらに、2つの光渦に1個ずつ楕円体粒子を捕捉して回転させる系を実現し、光渦間距離および駆動力を変化させることで、位相ロック状態から位相ドリフト状態への遷移を観察することに成功した。また、球状粒子を用いたシミュレーションにより非平衡相図の作成を行った。

(2) **電気泳動マイクロレオロジー測定法の開発とソフトマター系への応用** (壺岐、木村)

媒質に分散したコロイド粒子に交流的な外力を与えてその応答を測定するアクティブマイクロレオロジー測定システムの開発を進めている。ことに、外力として交流電場を印加し、荷電コロイド粒子を励振する電気泳動マイクロレオロジー測定システムを構築し、これを用いて高分子水溶液の希薄、準濃厚系での広い周波数範囲での局所粘弾性測定を行った。

(3) **コレステリック液晶コロイドの相互作用の研究** (林、木村)

分子配向秩序に空間的な螺旋変調を持ったコレステリック液晶中にミクロンサイズのコロイド粒子を分散させた系での欠陥をまとった粒子の構造と相互作用の研究を行った。ことに垂直配向セル中でセル厚が螺旋周期より小さな系において、交流電場印加により粒子の凝集、分散を制御可能なことを発見し、これを用いて粒子間相互作用の研究を行った。

(4) **ホログラフィック顕微鏡の開発** (満生、木村)

ホログラフィを利用した新規な3次元粒子追跡手法の確立を目指した。その結果、特にレーリー・ゾンマーフェルト後方伝達関数を用いた方法により、多粒子の3次元同時追跡を可能にするシステムを実現した。さらにローレンツ・ミー散乱理論を用いた厳密解へのあてはめ法も実現し、粒子サイズおよびそのダイナミクスの同時測定を実現した。

(5) **差分動的顕微鏡の開発と空間的不均一性のある流体の局所粘性測定** (田旗、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) **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。気液界面の負のゼータ電位が不純物に由来する可能性を提案した。また、ナノチューブ中の水の異

方的誘電テンソルの性質を、電磁気学に基づいて理論的に研究した。

- (7) **水と有機溶媒の混合系における電解質の効果と電気物性の研究** (植松、木村)
水と油の混合系において、相分離が電気物性に与える影響と電解質の効果を解明するための電気化学セルの製作を進め、インピーダンス測定を実施した。

- (8) **回転円筒容器における粉体の相分離現象の研究** (近堂、稲垣、木村)
水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体を入れ、回転させたときに観察されるサイズ分離現象について、実験を行った。従来、粉体のサイズ分離現象は、動的安息角に有意に差のある粒子の組み合わせの時によく観察されると思われていたが、実際には動的安息角に差がなくても粉粒体のサイズ分離が起きることがあるのが確認されていた。どのような物理量によってサイズ分離現象が起こる条件を決められるか調べるために、粒子を球状のものに限定し、粒子のサイズと比重を系統的に変えることで、回転ドラムにおけるサイズ分離現象がどういうときにおこるか、実験を行った。その結果、軸方向の分離が起こるには、粒径差、比重比、円筒容器の内径と平均粒径の比、の3つのパラメータが大事であることがわかった。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。

- (9) **粉粒体の巨視的対流に関する研究** (内海、黒河、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、高充填に封入した粒子の流れ場を測定した。一種類の粒子を複数の色に着色してから一重円筒に封入し、その後回転させると、粒子が拡散しながらも、全体として一定の方向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。二重円筒で同様の実験を行うと、左右対称な流れ場が形成された。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。

(10) **流動化した粉粒体の粘度測定** (河本、稲垣、木村)

粉粒体のサイズ分離現象は、回転や振動によって流動化したときにおこる。我々は、サイズ分離現象を誘起する要素の一つとして、粉粒体の粘度に着目し、比重やサイズの異なる粒子を流動化させて、粘度の測定を行った。今後、粘度のデータと、サイズ分離の実験データを比較し、粘度の影響を定量的に評価していく。

(11) **粉体時計に関する実験的研究** (益永、稲垣、木村)

サイズの異なる粒子を仕切りのあるセルに入れて加振すると、粒子が分離して、その空間分布が時間的に振動することが知られており、粉体時計と呼ばれる。我々は、セルの数を変えたり、二重円筒を用いた周期境界条件にするなどして、粒子の局在分布の時間的空間的变化を調べる実験を行った。セルが3つの場合には、局在分布の振動が観察されたが、周期境界条件では局在化した分布の振動は観察されなかった。今後は、セルの形を改良することで、新しい時空間構造の実現を試みていく。

(12) **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。

(13) **剛体球コロイド濃厚懸濁系の非線形・非平衡レオロジー** (林原、江藤、荊原、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。実際に局所外力の加わった粒子近傍の動力学が凍結することも確認し、観測された現象を説明する理論の構築を試みている。

- (14) **細胞骨格の非線形局所力学応答におけるスケール不変性の研究**（白木、水野）
フィードバックマイクロレオロジーにより、局所的な外力印加下における細胞骨格ゲルの力学応答を観測した結果、非線形挙動にスケール不変性が存在する可能性を見出した。wormlike chain がネットワーク化したゲルモデルの理論解析を進めることで、そのアファイン弾性率の非線形挙動には実際にスケール不変性が存在することを証明した。現在、種々の細胞骨格ゲルについて実験による検証を進めるとともに、数値シミュレーションにより具体的なマスターカーブを得ることを試みている。

- (15) **細胞内部環境のガラス的挙動**（杉野、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。本年度は、生理活性物質と代謝生成物の交換を行うことで、長期間安定して代謝活動を維持できる細胞質モデルを作成して、その物理特性の非平衡度依存性を系統的に調べることを試みた。

- (16) **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、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。

(17) 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 (福本、安藤、水野)

培養液中で遊走するバクテリア (大腸菌) や単細胞微生物 (クラミドモナス) が生み出す非平衡揺らぎが、我々の提案する新しい極限安定分布に属することを明らかにした。その時間発展を解析することで、非平衡揺らぎに新しい極限分布が現実の物理系において普遍的に現れる機構とその出現条件を明らかにした。さらに、遊走微生物が存在を許された空間の次元と、現実の空間の次元を様々に制御した実験を行うことで、この新しい極限分布が現実世界で観測される非ガウス揺らぎを一般的に表現することを示しつつある。本年度は、理論を長距離相互作用を含む形式に拡張してさらに一般化した。

(18) 粘弾性体中を遊走する微生物によるレプテーション増強の非平衡機構 (三谷、水野)

粘弾性体中を遊走するバクテリア (スピロプラズマ) が生み出す揺らぎが、レプテーション/チキソトロピーの増強を介して、媒質の力学的性質を大きく変化させるメカニズムをマクロ・ミクロの両面から究明している。生理活性物質と、代謝生成物の交換を許す計測チャンバー内で、定常的・安定的に濃厚なスピロプラズマを遊走させることに成功した。非平衡状態における実効的な温度をマイクロレオロジー法により新たに定義することで、温度-時間換算則、歪み速度-周波数換算則等の古典的規則や概念を、非平衡状態に拡張して理解することを目指す。

(19) 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 (藤原、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、通常細胞内環境ではマクロ液滴の発生は特殊な例であり、むしろミクロなスケール (10-300 nm 程度) の液滴 (ミクロ液滴) が重要な役割を果たすことを示しつつある。

《 来年度の目標 》

研究（1 - 19）のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《 原著論文 》

1. AC electrophoretic mobility of individual microscale colloidal particles measured using holographic video microscopy, Toyokazu Ikeda, Haruka Eitoku and Yasuyuki Kimura, *Applied Physics Letters* **114**, 153703 (2019). doi: 10.1063/1.5088723
2. Controlled armoring of metal surfaces with metallodielectric patchy particles, Tomohiro G. Noguchi, Yasutaka Iwashita and Yasuyuki Kimura, *Journal of Chemical Physics* **150**, 174903 (2019). doi: 10.1063/1.5090440
3. Nanomolar surface-active charged impurities account for the zeta potential of hydrophobic surfaces, Yuki Uematsu, Douwe Jan Bonthuis, and Roland R. Netz, *Langmuir* **36**, 3645-3658 (2020). doi:10.1021/acs.langmuir.9b03795
4. Giant Axial Dielectric Response in Water-Filled Nanotubes and Effective Electrostatic Ion-Ion Interactions from a Tensorial Dielectric Model, Philip Loche, Cihan Ayaz, Alexander Schlaich, Yuki Uematsu, and Roland R. Netz, *J. Phys. Chem. B*, **123**, 10850-10857, (2019). doi:10.1021/acs.jpccb.9b09269
5. Rapid local compression in active gels is caused by nonlinear network response, Daisuke Mizuno, Catherine Tardin, Christoph Schmidt, *Soft Matter* (2020), DOI: 10.1039/C9SM02362C
6. Experimental and theoretical energetics of walking molecular motors under fluctuating environments, Takayuki Ariga, Michio Tomishige, Daisuke Mizuno *Biophysical Reviews* (2020). doi:10.1007/s12551-020-00684-7
7. 生体分子モーター・キネシンの“散逸”を計測する, 有賀隆行, 富重道雄, 水野大介, *生物物理*, **59** (6), 001-005 (2019) DOI: 10.2142/biophys.59.001

8. Optimization of Optical Trapping and Laser Interferometry in Biological Cells Yujiro Sugino, Masahiro Ikenaga and Daisuke Mizuno, Applied Sciences, **10** (14), 4970, (2020) DOI: 10.3390/app10144970
9. 吉寄隆一, 平井康丸, 井上真大朗, 稲垣紫緒, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司, 四角柱容器に堆積した靱層の底面圧力と空隙率, 農業食料工学会誌, **81**, 6, 383-391, (2019).

講演

《 海外での講演 》

1. Is the origin of the negative surface charge of hydrophobic water surface OH ion adsorption? (Seminar) Yuki Uematsu (Technische Universität Graz in Austria, 2019年10月25日)
《European Colloid Interface Society 2019, KU Leuven in Belgium, 2019年9月8日–13日》
2. Universal Glass-forming behavior and metabolism driven fluidization (ORAL, invited) D. Mizuno (2019 International Workshop on Glass Physics in Beijing, 中国 北京 Chinese Academy of Sciences (ITP-CAS), 2019年9月28日)
3. Microscopic Mechanics of Active Matters and Living Systems (ORAL, invited) D. Mizuno (2019 NTNU-Kyushu U Joint Forum, 台湾 NTNU, 2019年5月28日)
4. Non-equilibrium assemblies of optically driven colloidal particles (POSTER) Kenta Iwamoto, Keita Saito, Yasuyuki Kimura
5. AC electrophoretic mobility of an optically trapped colloidal particle (POSTER) Kohei Iki, Yukiteru Murakami, Yasuyuki Kimura
6. AC electrophoretic mobility of a single colloidal particle studied by holographic video microscopy (ORAL) Toyokazu Ikeda, Yasuyuki Kimura
7. Emulsion Droplets Stabilized by Amphiphilic Janus Regular Polygonal Particles (ORAL) Ryotaro Koike, Tomohiro Noguchi, Yasutaka Iwashita, Yasuyuki Kimura
8. Two-dimensional nematic colloidal assemblies and their electrical response (POSTER) Yuta Tamura, Yasuyuki Kimura

《 国内での講演 》

1. 電気泳動光散乱法の基礎 (招待講演) 木村康之 (散乱研究会, ヒューリックホール@東京, 2019年11月22日)
 2. Impurity effect on hydrophobic surfaces (ORAL, invited) Yuki Uematsu (International Workshop on “Water Mediated Low-Dimensional Coulomb Systems” for Bilateral Joint Research Projects between JAPAN and SLOVENIA, Kyoto University, 2020年1月30日)
 3. Optical trap and laser interferometry in living cells (ORAL, invited) D. Mizuno (OPIC optics photonics international congress 2019, パシフィコ横浜, 2019年4月25日)
 4. 細胞の活きの良さの測り方 光捕捉とレーザー干渉を用いた力学測定 (口頭, 招待) D. Mizuno (2019 光塾, 理化学研究所 神戸キャンパスキャンパス, 2019年11月12日)
 5. ガラス形成物質としての細胞質の代謝由来の構造緩和 (口頭, 依頼) D. Mizuno (日本物理学会 シンポジウム ガラスの物理とその広がり, パシフィコ横浜, 2019年9月18日)
 6. Glassy mechanics of living cytoplasm, and its similarity to droplet suspensions (口頭, 招待) D. Mizuno (第92回日本生化学会シンポジウム 液体相分離と細胞機能, 理化学研究所 神戸キャンパスキャンパス, 2019年11月12日)
 7. Structural relaxations, Energy dissipations, and Effective temperature in active cytoplasm (集中講義・セミナー) 水野大介 (東北大学物理学科, 2019年7月18-19日)
 8. 非平衡系としての細胞内部の力学環境のマイクロレオロジー (集中講義・セミナー) 水野大介 (千葉大学物理学科, 2020年2月17-19日)
 9. Is the origin of the negative surface charge of hydrophobic water surface OH ion adsorption? (セミナー) 植松祐輝 (東京大学柳澤研究室セミナー, 2019年11月11日)
 10. Intentionally added ionic surfactants induce Jones-Ray effect at air-water interface (POSTER) Yuki Uematsu, Kengo Chida, Hiroki Matsubara (5th International Kyushu Colloid Colloquium, 沖縄科学技術大学院大学, 2019年11月9日)
 11. 混み合い遊走微生物懸濁液中におけるレオロジー (ポスター) 福本昂平, 杉野裕次郎, 水野大介 (第9回ソフトマター研究会, 名古屋大学, 2019年11月26日)
- 《Optical Manipulation Conference (OMC19), 横浜市, 2019年4月24-26日》

12. AC electrophoretic mobility of an optically trapped colloidal particle (ORAL)
壹岐晃平、木村康之
13. Motion of micro-sized colloidal particles induced by optical vortex (ORAL)
岩本健太、木村康之
《西日本非線形研究会 2019, 九州大学, 2019 年 6 月 29 日》
14. 回転ドラムでの動径方向分離における不安定性 (口頭) 近堂くるみ
15. 光駆動された粒子系のリズム運動 (口頭) 岩本健太
16. 回転に誘起される粉粒体のゆっくりとした対流現象について (口頭) 内海脩帆
《OKINAWA COLLOIDS 2019, 名護市, 2019 年 11 月 3 日-8 日》
17. Effect of the Interfacial Water Properties on Electrophoresis (ORAL, invited)
Yuki Uematsu
18. Intentionally added ionic surfactants induce Jones-Ray effect at air-water interface (ORAL) Yuki Uematsu, Kengo Chida, Hiroki Matsubara
19. AC Electrophoretic Mobility of an Optically Trapped Colloidal Particle in Complex Fluids (ORAL) Kohei Iki, Yukiteru Murakami, Yasuyuki Kimura
20. Switching of Self-propelling Modes for Liquid Crystal Droplets in Surfactant Solution (ORAL) Mariko Suga, Saori Suda, Masatoshi Ichikawa, Yasuyuki Kimura
21. Motion of Colloidal Particles in Optical Vortices (ORAL) Kenta Iwamoto, Yasuyuki Kimura
22. Geometric Effect of Amphiphilic Regular Polygonal Particles on Emulsion Droplet Structure (ORAL) Ryotaro Koike, Yasutaka Iwashita, Yasuyuki Kimura
23. Controlled Adsorption of Metallodielectric Patchy Particles to Metal Surfaces (ORAL) Tomohiro Goroh Noguchi, Yasutaka Iwashita, Yasuyuki Kimura
24. Application of Holographic Microscopy to Characterization of a Single Colloidal Particle (ORAL) Toyokazu Ikeda, Yasuyuki Kimura
25. Formation of anisotropic colloidal assemblies in cholesteric liquid crystals (POSTER) Kazuki Hayashi, Yasuyuki Kimura
《第 125 回 日本物理学会 九州支部例会, 佐賀大学, 2019 年 11 月 30 日》
26. 流動状態における粉粒体の粘性 (口頭) 河本彩帆, 稲垣紫緒
27. 回転円筒容器内における粉粒体のゆっくりとした対流現象について (口頭) 黒河俊介, 内海脩帆, 稲垣紫緒
28. 二分散粉体ガスのクラスタリング現象 (口頭) 益永真聡, 稲垣紫緒
29. 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

30. 外力誘起により流動する濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (口頭)
水野大介, 江藤高宏, 荊原佳祐
 31. レーザー干渉法による粒子追跡の感度向上へ向けた、光てこの応用 (口頭)
井口昇之, 三谷一晃, 水野大介
 32. 生体高分子ゲルの局所力学応答 (口頭) 水野大介, Francis van Esterik, 本田
菜月, 白木啓悟
 33. 動的差分顕微鏡法を用いたコロイド分散系のダイナミクス解析 (口頭) 田旗
栄太, 木村康之
 34. ホログラフィック顕微鏡を用いた多粒子 3 次元追跡 (口頭) 満生明輝, 池田
豊和, 木村康之
- 《日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学, 2019 年 9 月 10 日–13 日》
35. ガラス形成物質としての細胞質の代謝由来の構造緩和 (口頭) 水野大介
 36. 定常的な力学的駆動に誘起される粉粒体のゆっくりとした対流現象について
(口頭) 内海脩帆, 稲垣紫緒
 37. 回転ドラムでの動径方向分離における界面不安定性 (口頭) 近堂くるみ, 稲
垣紫緒
- 《日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大学, 2020 年 3 月 16 日–19 日》
38. レーザー干渉法を用いたアクティブマターの力学計測 (口頭) 杉野裕次郎,
福本昂平, 三谷一晃, 西澤賢治, 高橋達郎, 水野大介
 39. 生体高分子ゲルの局所力学応答 (口頭) 白木啓悟, 本田菜月, Francis van
Esterik, 水野大介
 40. 局所外力印加によりひき起こされるミクروسケールでの高分子の構造緩和
(口頭) 西澤賢治, 本田菜月, 水野大介
 41. 光てこを用いたレーザー干渉法による粒子追跡 (口頭) 井口昇之, 三谷一晃,
水野大介
 42. 局所的な力印加における濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (ポス
ター) 荊原佳祐, 江藤高宏, 林原蹴斗, 荻原僚, 水野大介
 43. 外力誘起により流動する濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー (ポス
ター) 江藤高宏, 荊原佳祐, 荻原僚, 水野大介
 44. アクティブ環境下でのキネシンの運動 (口頭) 有賀隆行, 立石圭人, 富重道
雄, 水野大介
 45. 疎水性界面の負のゼータ電位の正体について (口頭) 植松祐輝, D. Bonthuis,
R. Netz

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

時空間変化する非平衡ソフトマターの局所力学物性の解明

研究代表者：木村康之

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

代謝依存的にガラス形成する細胞質のマイクロレオロジー

研究代表者：水野大介

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

粉粒体のサイズ分離現象：散逸粒子系の動的秩序形成の機構解明

研究代表者：稲垣紫緒

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

コンバインの穀粒タンクに堆積する粳のかさ密度によるコメの登熟歩合計測法の開発

研究代表者：平井康丸 (九州大学農学研究院)

研究分担者：稲垣紫緒

日本学術振興会海外特別研究員

閉じ込められた電解質溶液の流体輸送の理論と実験による包括的な研究

派遣者：植松祐輝 (フランス)

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

2019年度新分野創成センター先端光科学研究分野プロジェクト

フィードバックと補償光学を用いた細胞内粒子の光捕捉操作とレーザー干渉計測

研究代表者：水野大介

他大学での研究と教育

水野大介：東北大学で「Microrheology of active systems」と題して集中講義を行った (2019年7月18日、19日)。

水野大介：千葉大学で「マイクロレオロジーを用いた非平衡系の力学計測」と題して

集中講義を行った（2020年2月18日-20日）。

学部4年生卒業研究

田旗 栄太：(指導教員、木村康之)：動的差分顕微鏡法を用いたコロイド分散系のダイナミクス解析

益永 真聡：(指導教員、稲垣紫緒)：二分散粉体ガスのクラスタリング現象

荊原 佳祐：(指導教員、水野大介)：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

黒河 俊介：(指導教員、稲垣紫緒)：回転円筒容器における粒径とバンドの振る舞いの関係

河本 彩帆：(指導教員、稲垣紫緒)：流動状態における粉粒体の粘性

満生 明輝：(指導教員、木村康之)：ホログラフィック顕微鏡を用いた粒子追跡

井口 昇之：(指導教員、水野大介)：レーザー干渉法による粒子追跡における光での応用

修士論文

岩本 健太：(指導教員、木村康之)：流体力学的に結合したコロイド粒子系の同期現象

壹岐 晃平：(指導教員、木村康之)：光トラップ交流電気泳動測定法の開発とその応用

内海 脩帆：(指導教員、稲垣紫緒)：回転円筒容器における粉粒体の巨視的対流

近堂 くるみ：(指導教員、稲垣紫緒)：粒子サイズ・比重に依存した回転ドラムにおける分離ダイナミクス

安藤 祐貴：(指導教員、水野大介)：アクティブマター系(遊走微生物懸濁液)の非平衡揺らぎ 物理的な極限分布の適用可能性の検証

三谷 一晃：(指導教員、水野大介)：遊走微生物が生み出す非平衡揺らぎによる高分子ゲルの揺らぎとレオロジー計測

杉野 裕次郎：(指導教員、水野大介)：代謝回転を導入した細胞質モデルの力学計測

福本 昂平：(指導教員、水野大介)：混み合い遊走微生物懸濁液のアクティブレオロジー

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)

複雑流体

研究室構成員

前多裕介 准教授

《 博士研究員 》

Ziane Izri

《 大学院 博士課程 》

福山達也 別府航早 坂本 遼太

《 大学院 修士課程 》

白木天晴 賀屋紘典

《 学部 卒業研究生 》

萩原 宙 巖 路燦

担当授業

生物物理学（前多）、基礎物理学実験・同演習（前多）、物理学ゼミナール（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. 非平衡輸送現象の物理学

温度勾配下で分子が輸送される現象を Soret 効果とよばれ、DNA などの生体高分子は低温側に輸送されることが知られている。Soret 効果は古くから知られている現象であるが、近年の技術的発展をうけて、荷電コロイドや荷電高分子の実験・理論の両面から精力的に研究が進められている。自在な分子操作という観点から、Soret 効果は空間 2 次元での様々な分子制御に展開できる。しかし、未だ理解が十分ではない点に、空間 2 次元を「動く」温度勾配下での輸送現象がある。高粘性流体中を伝搬する温度勾配では流動が生じることが報告されており、自在な分子操作を実現するには、Soret 効果のみならず流れとの協同作用を理解しなくてはならない。そこで我々は、伝搬速度や伝搬する幾何形状を制御可能な温度勾配を実現する系を新たに構築し、動く温度勾配下のダイナミクスについて解析を行った。その結果、温度勾配が動く方向とは逆向きに溶液の流れが生じること、さらに特定の温度勾配の伝播速度で流速が最大となる共鳴的な振る舞いが生じることを見出した。熱拡散方程式およびストークス方程式

から得た流速の近似解は実験結果の多くを説明し、Soret 効果に起因する粘性勾配が流れの方向を決定すること、そして共鳴的な振る舞いは熱拡散と熱膨張の競合によることを明らかにした。

さらに、我々は動く温度勾配下において駆動される流動現象との類似性に着目し、細胞集団を連続体と近似した理論モデルを構築し、シグナル伝搬下での細胞集団の運動メカニズムの探求を行った。動く温度勾配下の流動現象の理論モデルを拡張し、細胞集団に置いても摩擦変化と密度変化の相乗的な作用から一方向性の運動が生じることを導いた。これは、ERK 活性に対する接着と変形の応答によってシグナル伝搬に沿う一方向の運動が誘起されることを意味する。さらに我々は実験検証を行い、細胞集団運動速度が ERK シグナルの強度に対し 2 次関数的になることを見出した。この結果は細胞集団運動が ERK シグナルに誘起される密度変化・接着変化の相乗効果によって駆動されていることを示す。また、シグナル伝搬速度に対しては特徴的な速度で集団運動速度が最大になり、これはシグナルが速く伝搬することで多くの細胞が動けるものの、密度・接着変化の効果が小さくなることに由来するものである。類似の周波数依存性は温度勾配下の流動現象でも現れることから、物質や系の詳細に寄らないソフトマターの流動現象が高分子から細胞集団まで広く共通していることを示唆している。本研究を論文としてまとめ、投稿準備をすすめた。

2. 遺伝情報分子の起源に関する研究

DNA は遺伝情報を蓄積する分子であり、生命の根幹を支える自己複製に重要な要素である。生命を構成する要素分子や原始生命そのものの誕生を説明する仮説の 1 つに化学進化説がある。単純な分子から酵素触媒や高エネルギー反応で複雑な高分子が段階的に合成されていったとする化学進化説は、生命の構成要素の誕生に有力な手がかりを与えるが、温度・濃度一様な平衡系では、分子の重合反応や連結反応（ライゲーション）がランダムに起こるため、再反応確率は分子の重合度に対して指数関数的に減衰することとなる。すると遺伝情報を十分保持する DNA は平衡系では極めて低い確率でしか現れないという結論に辿り着く。化学進化の濃度問題と呼ばれるこの指数関数的減衰を統計力学的視点から解決することを目的に、本研究では連結反応による DNA 成長の実験・理論解析を行った。

単純な DNA 成長の反応として、1 1 種の DNA 断片を PCR (polymerase chain reaction) で合成し、リガーゼ酵素による連結反応を行った。これらの DNA から長さや配列が異なる分子が 5 5 種類得られるが、その長さと濃度を同時に高精度検出する分析手法を開発した。その結果、温度一定・希薄溶液の条件下においては DNA の長さに対して濃度が指数関数的に減少する分布関数となり、平衡系では予想通りランダムな酵素反応が起こることを明らかにした。DNA 以外にも共存分子が存在する複雑な溶液

系でライゲーション反応による DNA の長さや濃度の分布関数を計測すると、共存分子の濃度が高まるに連れて指数関数の減衰が抑えられ、長く連結した DNA の濃度が高まることがわかった。そして、共存分子の濃度が 12% を越えると DNA の長さに対する濃度分布は指数関数的にならず、ロングテールを引くべき減衰に近い分布関数が得られることを見出した。これらの実験結果を説明する理論モデルを構築し、共存分子が指数関数的な濃度減衰を回避する詳細なメカニズムとして、枯渇相互作用による分子間引力が重要であることを明らかにした。本研究は *Physical Review Research* に掲載された（論文 3）

3. 遺伝子発現する人工細胞の合成生物学

本研究の狙いは、ミクロンサイズのリン脂質ベシクルの形態を持ちながら、自らを複製する能力を持つミニマム細胞を構築することにある。ミニマム細胞とは、現実の細胞を模倣しながらも、可能な限り単純な仕組みで動作する人工物を意味する概念である。このような目標を達成するためには、新たな技術開発が必要となる。そこでマイクロ流体デバイスを用いて、リン脂質ベシクルに最小限の構成要素となるタンパク質群を封入する新たな手法の開発を行った。25 ミクロン直径のマイクロウェルを平面脂質二重膜でシールし、無細胞転写翻訳の遺伝子発現を行うマイクロ流体デバイスを作成した。これらの区画内には、水、DNA、そして必要なタンパク質分子のリボソーム、RNA ポリメラーゼ、tRNA、ATP、イオン等が閉じ込められ、遺伝子発現が自律的に行われる無細胞反応系を構成している。内部には deGFP を発現する plasmid DNA が封入されており、自律的な遺伝子発現が起こる。遺伝子発現の計測を同時に 5000 個とることができ、その分布関数を解析すると外部からのエネルギー源の取り込みが、高効率なタンパク質合成に重要であることを明らかにした。本研究は *ACS Synthetic Biology* に掲載され、九州大学からプレスリリースを行った（論文 2）

3. アクティブマターの物理学

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。

バクテリア大腸菌 *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 を薬剤処理し、細胞

間のネマチック相互作用を制御する新規の系を構築した。さらに、表面処理を施した Polydimethyl siloxane チャンバーの微小容器内にバクテリア懸濁液を封入する手法を確立し、花型の境界形状をもつ微小容器内での集団運動を PIV (Particle Image Velocimetry) から解析を行った。その結果、回転集団運動が対をなした渦ペアが形成されること、渦の回転方向が同じ向き・反対向きの渦ペアが出現することが明らかとなった。渦ペア形成をもたらす要因を明らかにするため、Vicsek モデルとよばれる群れ運動に関する基礎的モデルを平均場近似の下で解析したところ、渦ペアの向きを反転する際に幾何学的な法則が存在することを発見した。さらに、渦が奇数個の三つ子型マイクロウエルでは、隣り合う渦同士の回転軸が反平行で安定化することが許されず、パターンの転移点がシフトすることがわかった。

また、新たなデバイス作成技術の確立により、バクテリア懸濁液をマイクロウエルに確実に封入し、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、論文投稿を行った (論文 4)。現在はバクテリア以外にも、ダイニン分子モーターやキネシン分子モーターに運ばれる微小管の集団が渦形成することが知られており、この渦形成を幾何形状の設計から理解する試みも進めている。

4. アクトミオシンゲルと人工細胞の物理学

細胞は自律的に変形し、動く。力学的な視点で細胞を眺めてみると、細胞は「小さな区画に囲まれた粘弾性流体」である。この要件を満たす人工細胞を創出し、細胞機能と分子を結ぶ物理的原理を明らかにできると期待できる。このような動機のもと、我々はアクチンとミオシンモーターを含む *Xenopus egg* 抽出液を油中液滴に封入し、細胞サイズの区画を設けた人工細胞モデルを構築した。観察開始から数分後、アクトミオシンネットワークの収縮によって細胞小器官が凝集したクラスターが形成される。このクラスターが位置する場所は、人工細胞の中心点もしくは境界近傍かの二相に分かれていた。アクチン骨格の動態を蛍光顕微鏡で観察したところ、境界から中心に向かってリング状のアクチンゲルの収縮が起こり、クラスターを中心に移動させる内向きの力が発生していた。一方で、境界のアクチンコルテックスと内部のクラスターの間がアクチン繊維で結ばれることで、クラスターを境界に運ぶ外向きの力が出現する。とりわけ、細胞内空間のサイズと細胞骨格の特徴的サイズの比が外向きの力の発生を誘起する転移現象に重要であり、2つの収縮作用の競合が対称性を破るメカニズムであることを明らかにした。本研究で得た知見は、細胞内の幾何学対称性を決定する力学機構の理解に寄与することが期待される。本研究内容を論文にまとめ、論文投稿と改訂をすすめた。

さらに、特定の条件下ではこの人工細胞はアクチンゲルの収縮と相関しながら自律的な一方向性の運動を示すことがわかった。この運動のメカニズムを詳細に明らかにするべく、更なる実験と理論モデル解析をすすめている。

6. 回転する弾性バブルの力学

弾性体は身の回りにあふれた素材であるが、1次元の紐状の弾性体や2次元の膜状の弾性体に比べて、リボンのように紐でありつつ弾性膜としての性質ももつような弾性体については、十分な理解が得られていない。とりわけ、弾性リボンが束になり、強制的な外力が与えられたときに、どのような応答を示すかは応用状重要な課題でありながら系統的な研究が存在しなかった。そこで我々は、弾性リボンを束にして、棒に拘束させて回転遠心力を与える「弾性バブル」とよぶべき系を新たに構築した。回転遠心力がシャボン玉の表面張力と同様の役割を果たしながらも、通常のシャボン玉にはみられない弾性変形が起こることがわかった。とりわけ、リボンのねじれがあることで、形と運動が組み合わさって振動現象を示すことがわかった。回転速度を上げていくに連れて振動が誘起され、回転エネルギーの増大と共に振幅が増大しつつも周期が一定であることから、Hopf分岐に類似した挙動をしめしていた。今後、この振動現象が生じるメカニズムを明らかにし、弾性バブルの動力学的な変形の詳細を明らかにする。

発表論文

《原著論文》

1. Jun Takagi, Ryota Sakamoto, Gen Shiratsuchi, Yusuke T. Maeda, and Yuta Shimamoto.
Mechanically distinct microtubule arrays determine the length and force response of the meiotic spindle
Developmental Cell 49, 267-278 (2019)
2. Ziane Izri, David Garenne, Vincent Noireaux, and Yusuke T. Maeda.
Gene expression in on-chip membrane-bound artificial cells
ACS Synthetic Biology 8, 1705-1712 (2019)
3. Takaharu Y. Shiraki, Ken-ichiro Kamei, and Yusuke T. Maeda.
Randomness and optimality in enhanced DNA ligation with crowding effects
Physical Review Research 2, 013360 (2020)

4. Kazusa Beppu, Ziane Izri, Tasuku Sato, Yoko Yamanishi, Yutaka Sumino, and Yusuke T. Maeda.

Edge current and pairing order transition in chiral bacterial vortex
arXiv:2002.01247 (2020)

5. Tatsuya Fukuyama and Yusuke T. Maeda.

Optothermal diffusiophoresis of soft biological matters: From physical principle to molecular manipulation
Biophysical Reviews 12, 309-315 (2020)

《その他の論文》

6. 前多裕介, 別府航早.

遊泳バクテリアで探るアクティブマターの秩序と制御
生物物理 60, 13-18 (2020)

講演

《国内での講演》

1. Ziane Izri, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda: On-chip membrane-bound transcription and translation as minimal cells, 新学術領域「発動分子科学」第2回領域会議, 九州大学, 2019年5月24日-25日.
2. Ryota Sakamoto, Makito Miyazaki, Yusuke T. Maeda: Adhesion-independent migration of actomyosin droplet, 新学術領域「発動分子科学」第2回領域会議, 九州大学, 2019年5月24日-25日.
3. 前多 裕介: 交わる物理学と生命科学: 分子, 細胞, 細胞集団の非平衡ダイナミクス, 第1回理研科学者会議セミナー(招待講演), 理化学研究所, 2019年6月10日.
4. 前多 裕介: 非接触型の自律運動とアクティブゲルの力学, 第9回分子モーター討論会(招待講演), 国立遺伝学研究所, 2019年6月28日-6月29日.

5. 賀屋紘典, 高松凌, 前多 裕介: セルフリー遺伝子発現の転写抑制と幾何的制御, 2019年日本物理学会秋季大会, 岐阜大学, 2019年9月10日-9月12日.
6. 福山達也, 江端宏之, 木戸秋悟, 近藤洋平, 青木一洋, 前多裕介: 細胞間シグナルと集団運動を結ぶ連続体力学モデルと実験検証, 2019年日本物理学会秋季大会, 岐阜大学, 2019年9月10日-9月12日.
7. 別府航早, Ziane Izri, 前多裕介: 遊泳バクテリアのキラリティーと集団運動の制御, 2019年日本物理学会秋季大会, 岐阜大学, 2019年9月10日-9月12日.
8. 前多裕介, 福山達也, 坂本遼太: 発動分子集合体のソフトマター物理学: 輸送現象からアクティブゲルまで, 第68回高分子討論会 (招待講演), 福井大学, 2019年9月25日-27日.
9. 前多裕介, 福山達也: 非平衡ソフトマターの輸送現象と生命科学への展開, OCU先端光科学シンポジウム (招待講演), 大阪市立大学, 2019年10月19日-20日.
10. Yusuke T. Maeda: Structure and dynamics in soft active matter: Towards smart material, 第3回日英先端科学シンポジウム (招待講演), 2019年11月7日-10日.
11. Yusuke T. Maeda: Geometric principle for controlling active matters: From bacterial suspension to active cytoskeletons, 第3回日英先端科学シンポジウム (招待講演), 2019年11月7日-10日.
12. 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介: サイズが誘起する秩序形成: 細胞内から多細胞まで, 第42回日本分子生物学会年会 (招待講演), 福岡国際会議場 2019年12月10日.
13. Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda: Chirality of bacterial vortices and enhanced pairing order as collective effects, Workshop on physics of soft, active and living matter, 千葉大学, 2020年1月7日.
14. Tatsuya Fukuyama, Hiroyuki Ebata, Kazuhiro Aoki, Yusuke T. Maeda: Continuum mechanical model of ERK wave-driven collective cell migration in wound healing, Workshop on physics of soft, active and living matter, 千葉大学, 2020年1月7日.

15. Takaharu Shiraki, Ken-ichiro Kamei, Yusuke T. Maeda: Kinetics of length-selective and optimal DNA growth with crowding effects, Workshop on physics of soft, active and living matter, 千葉大学, 2020年1月7日.
16. Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda: Chiral vortex formation in active matter as collective effect(招待講演), The 1st International Symposium on Molecular Engine, 千葉大学, 2020年1月8日.
17. Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda: Chirality of bacterial vortices and enhanced pairing order as collective effects, The 1st International Symposium on Molecular Engine, 千葉大学, 2020年1月8日.
18. Tatsuya Fukuyama, Hiroyuki Ebata, Kazuhiro Aoki, Yusuke T. Maeda: Continuum mechanical model of ERK wave-driven collective cell migration in wound healing, The 1st International Symposium on Molecular Engine, 千葉大学, 2020年1月8日.
19. Takaharu Shiraki, Ken-ichiro Kamei, Yusuke T. Maeda: Kinetics of length-selective and optimal DNA growth with crowding effects, The 1st International Symposium on Molecular Engine, 千葉大学, 2020年1月8日.
20. Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda: Chirality of bacterial vortices and enhanced pairing order as collective effects, 新学術領域「発動分子科学」第3回領域会議, 千葉大学, 2020年1月9日-10日.
21. 白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介: 分子混雑による選択的DNA成長と最適化反応の速度論, 日本物理学会第75回年会, 2020年3月16日-19日(現地開催中止)
22. 巖路燦, 福山達也, 島本勇太, 前多裕介: 紡錘体の自己組織化の力学モデルに向けた分裂期紡錘体の定量的解析, 日本物理学会第75回年会, 2020年3月16日-19日(現地開催中止)
23. 萩原宙, 前多裕介: 弾性バブルのねじれと振動現象, 日本物理学会第75回年会, 2020年3月16日-19日(現地開催中止)
24. 福山達也, 江端宏之, 木戸秋悟, 近藤洋平, 青木一洋, 前多裕介: 波に駆動される非平衡流れと細胞集団運動の力学への展開, 日本物理学会第75回年会, 2020年3月16日-19日(現地開催中止)

25. 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介: 遊泳バクテリアのキラリティーを介したキラルな渦形成とアクティブ乱流, 日本物理学会第75回年会, 2020年3月16日-19日 (現地開催中止)

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

1. 前多裕介、科学研究費補助金 新学術領域研究 (計画研究) 「発動分子の自律運動と機能設計のエネルギー論的研究」 (研究代表)

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

1. 前多裕介、理研九大科学技術ハブ共同研究プロジェクト「RNA ペプチド生命の誕生とケミカルソフトマターの学理創出」 (研究代表)
2. 前多裕介、NTT 九大基礎科学共同研究プロジェクト「ソフトマターが拓くメカノセンシング機構の物理」 (研究代表)
3. 福山達也、学術振興会特別研究員奨励費「非平衡輸送現象と流れの動的結合の解明：分子操作から分子整流へ」 (研究代表)
4. 坂本遼太、学術振興会特別研究員奨励費「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」 (研究代表)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

萩原 宙 (指導教員：前多) : Dynamics of a spinning elastic bubble
巖 路燦 (指導教員：前多) : Quantitative analysis of the metaphase spindle towards the mechanical model of self- organization

修士論文

白木 天晴（指導教員：前多）鋳型依存的な DNA 伸長モデルにおける分子共存効果に関する研究

博士論文

福山 達也（指導教員：前多）Non-equilibrium cross-effect of transport phenomena and fluid flow in wavelike external field（波動伝搬する外場に誘起される輸送現象と流動現象の非平衡クロス効果）

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

2019 年度 客員教授

University College of London, Assistant Professor 紅林 秀和

2019 年度の客員教授は、量子物性講座の固体電子物性研究室にて、紅林 秀和氏 (UCL, AP) に勤めて頂いた。紅林氏とは、本研究室で推進していた頭脳循環プロジェクト（後に、国際的な活躍が期待できる研究者の育成事業）の共同研究者として、共同研究を実施しており、以前より、メンバーの往来なども頻繁に実施していた。

期間中、紅林教授には、二週間程度の研究室滞在を二度実施頂き、固体電子物性研究室で展開している幅広い研究内容に関して、多くのご助言を頂くとともに、共同で実施する新奇な実験も実施した。加えて、固体電子物性研究室の大学院生やスタッフを、UCL での主催研究室にて、長期間にわたり受け入れて頂いた。

この双方のメンバーの交流により、いくつかの成果をあげることができ、更に、現在も継続中である。具体的には、微小磁性体における垂直磁場下の磁化の動的挙動を調べるための特殊なキャビティの開発、交換結合型強磁性共鳴による同期・非同期共鳴現象の検出、スピнкаロリトロニクスに立脚した新奇な磁気熱電効果の観測、強磁性/常伝導/超伝導複合構造を用いたトリプレットスピン流の探索、強磁性共鳴、及びギルバートダンピング効果の温度依存性、これ以外にも、短期間で、固体電子物性研究室で取り組んでいる殆どの研究内容に、関係して頂いた。

これらの研究の一部は、*Phys. Rev. B* や *J. Magn Magn Mater.* 誌などに、既に国際学会誌に発表しており、また、現在も、複数の論文をまとめている段階である。さらに、喜ばしいことに、UCL の紅林研究室で学位を取得したイギリス人研究者が、次年度より、固体電子物性研究室に博士研究員として滞在することも決まっており、より強固な信頼関係のもと、共同研究を発展していけると考えている。

文責:木村 崇

令和1年度教職員一覧

研究グループ	教授	准教授	講師	助教
素粒子理論	鈴木博	津村浩二		
理論核物理	肥山詠美子	池田陽一		松本琢磨
宇宙物理理論	山本一博			町田真美
粒子系理論物理	原田恒司+++	大河内豊+++ 小島健太郎+++		田尾周一郎+++
素粒子実験	川越清以	東城順治 吉岡瑞樹*		織田勸 末原大幹 音野瑛俊*
実験核物理	森田浩介 若狭智嗣	寺西高 坂口聡志		藤田訓裕 郷慎太郎 西畑洸希
物性理論	福田順一		松井淳	
統計物理学	中西秀	野村清英		藪中俊介
凝縮系理論		河合伸 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++
固体電子物性	木村崇			山田和正 大西紘平
複雑物性基礎	木村康之	水野大介 稲垣紫緒		植松祐樹
複雑流体		前多裕介		

+客員 ++准助教 +++基幹教育院 *RCAPP

技術職員	加速器・ビーム応用科学センター 岩村龍典
------	----------------------

令和1年度各種委員

(○は委員長)

部門長・学科長・専攻長：若狭

副部門長：福田 肥山

将来計画委員：○福田，山本、東城、野村、光田、前多

教育課程委員：○木村（崇）、鈴木、山本、河合、前多、坂口、松本

入試委員会委員長（全ての入試関連委員会の統括）：鈴木

助の会幹事：郷、藪中

社会連携委員：○渡部

奨学金資格検討委員：○中西、肥山、木村（崇）東城、前多

経理委員：○福田、木村(崇)

業績評価部会：○木村（崇）

就職：○木村(康)、前多

成績管理：○寺西、松井

図書：○成清，東城

情報委員会：○松井，寺西，野村，藪中

支線 LAN 管理者：○松井、藪中

広報委員：○水野，山本、吉岡、坂口、末原

エントランス展示：○河合、寺西、前多

大学院説明会：○光田，松井、郷

年次報告担当：○河合

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

体験入学・入学オリエンテーション実施委員：○前多，水野、光田、大西、荒井、郷、
町田、松本

未来の科学者：○渡部、坂口

理学部便り編集委員：末原

障害学生支援：坂口、河合

ハラスメント関連支援室：○中西，東城、松井，町田

なんでも相談窓口：松井、町田

留学生相談委員：織田

科研費採択率向上委員：渡部

令和元年度 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：ホイール状態と直鎖状態のはなし

講師： 木村 真明 氏（北海道大学大学院理学研究院・准教授）

日時： 6月11日（火）16：30～18：00

場所：物理会議室（W1-A-711室）

第2回物理学教室談話会

講演題目：宇宙 X 線精密分光観測の実現に向けた最後の挑戦

講師： 山田 真也 氏（首都大学東京・助教）

日時： 8月6日（火）16：30～17：30

場所：物理セミナー室1（W1-A-701）

第3回物理学教室談話会

講演題目：稀な K 中間子崩壊で新しい物理を探る J-PARC KOTO 実験

J-PARC KOTO Experiment — Search for new physics beyond the Standard Model with a rare K decay —

講師： 山中 卓 氏（大阪大学大学院理学研究科・教授）

日時： 11月7日（木）16：40～18：00

場所：物理講義室（W1-B-212室）

第4回物理学教室談話会

講演題目：位相モデルによる数理と実験：時差ボケ、ロコモーションなど

講師： 郡 宏 氏（東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授）

日時： 11月27日（水）17：00～18：00

場所：物理部門会議室（W1-A-711）

第5回物理学教室談話会

欠番

第6回 物理教室談話会

講演題目：フレーバーアノマリー

講師： 遠藤 基 氏（高エネルギー加速器研究機構・准教授）

日時： 12月26日（木）16：00～17：30

場所：物理講義室（W1-B-211 室）

第 7 回 物理教室談話会

講演題目：ミュオンを使ってなにがわかるのか？

講師： 下村 浩一郎 氏 （高エネルギー加速器研究機構・教授）

日時： 1 月 23 日（木） 16：30 ～ 17：30

場所：物理講義室（W1-B-212 室）

第 8 回物理学教室談話会

講演題目：上皮組織変形のための連続体モデル：細胞から組織へ

講師： 石原 秀至 氏 （東京大学大学院総合文化研究科・准教授）

日時： 月日（） 16：00 ～ 18：00

場所：物理部門会議室（W1-A-711）

令和1年度九大原子核セミナー開催一覧

第 953 回 2019 年 4 月 12 日

講師：Dong Bai (Nanjing University)

演題：Preliminary Results on Non-Localized Clustering in Alpha-Alpha Elastic Scattering

第 954 回 2019 年 5 月 17 日

講師：Benjamin F. Gibson (Los Alamos National Laboratory)

演題：Some Aspects of strangeness in few-body physics

第 955 回 2019 年 6 月 21 日

講師：富樫 甫 (九州大学)

演題：高密度物質の状態方程式とコンパクト天体現象

第 956 回 2019 年 6 月 28 日

講師：中村 哲 (東北大学)

演題：電子ビームを用いた原子番号ゼロのハイパー核探索実験

第 957 回 2019 年 6 月 28 日

講師：久保野 茂 (RIKE, IMP of CAS, CNS)

演題：中性子星周りでの爆発的重元素合成機構の解明に向けて(Experimental Challenge to Heavy Element Synthesis under Explosive Burning on Neutron Stars)

第 958 回 2019 年 10 月 23 日

講師：Ulugbek Yakhshiev (仁荷大学)

演題：Equations of State from the chiral soliton model

第 959 回 2019 年 10 月 25 日

講師：岡 眞 (日本原子力研究開発機構)

演題：ダイクォークとヘビーバリオンのスペクトル

第 960 回 2019 年 11 月 18 日

講師：Qi Meng (南京大学)

演題：Compact $sscc\bar{c}$ pentaquark states predicted by a quark mode

第 961 回 2019 年 11 月 22 日

講師：Philipp Gubler (日本原子力研究開発機構)

演題：Studying the phi meson in nuclear matter by simulating low energy pA reactions

第 962 回 2019 年 11 月 17 日

講師：Andrei Andreyev (York Univ., JAEA)

演題：Nuclear Fission in the 21st Century: A Review of Experimental Advances and Phenomenology

第 962 回 2019 年 11 月 17 日

講師：Andrei Andreyev (York Univ., JAEA)

演題：Nuclear Fission in the 21st Century: A Review of Experimental Advances and Phenomenology

第 963 回 2020 年 3 月 6 日 (開催中止)

講師：土岐 博 (大阪大学)

演題：原子核におけるパイ中間子の役割と私が描く核物理

第 964 回 2020 年 3 月 16 日

講師：山中 長閑 (University of Massachusetts Amherst)

演題：Nuclear electric dipole moment and new physics beyond the standard model

第 965 回 2020 年 3 月 9 日

講師：渡邊 慎 (岐阜工業高等専門学校)

演題：Extracting each component from discretized breakup cross sections in multi-breakup-channel reactions

令和1年度非常勤講師一覧

講師	所属	題目
木村真明	北海道大学大学院理学研究院	波束による、原子核の構造と散乱の記述
山田真也	首都大学東京	高エネルギー宇宙X線物理学集
山中卓	大阪大学理学研究科	K 中間子の物理
石原秀至	東京大学大学院総合文化研究科	生体組織の物理学:細胞から組織へ
郡宏	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	リズム現象の物理学
唐澤悟	昭和大学薬学部教授	外部刺激応答性分子の構造と電子状態変化
山下誠	名古屋大学工学研究科	有機典型元素化学
奥村久士	自然科学研究機構生命創成探究センター	拡張アンサンブル分子動力学法と生物化学への応用
井口佳哉	広島大学	分子クラスターの分光学
齊藤巧巳	東京大学	
正岡重行	分子科学研究所	錯体化学特論
下村浩一郎	高エネルギー加速器研究機構	21世紀の素粒子ミュオンー基礎から応用までー
遠藤基	高エネルギー加速器研究機構	フレーバーとCPの破れ

令和1年度外国人研究者等受入記録

所属・職・氏名	所在地	受入の目的	受入期間	受入者
Los Alamos National Laboratory・教授・Benjamin F.Gibson	アメリカ合衆国	外国人訪問研究員	1年5月14日～1年5月22日	肥山
Kyungpook National University・教授・Ho-Meoyng Choi	韓国	外国人訪問研究員	1年5月15日～1年5月16日	肥山
Kyungpook National University・教授・Wooyoung Kim	韓国	外国人訪問研究員	1年5月15日～1年5月16日	肥山
Kyungpook National University・教授・Yongseok Oh	韓国	外国人訪問研究員	1年5月15日～1年5月16日	肥山
Nanjing University・研究員・Dong Bai	中国	外国人訪問研究員	31年3月28日～31年4月26日	肥山
Nanjing University・大学院生・Qian Wu	中国	外国人訪問研究員	1年5月12日～1年5月22日	肥山
Nanjing University・大学院生・Qi Meng	中国	外国人訪問研究員	1年5月12日～1年5月22日	肥山
カタールニア大学（INFN）・研究員・Hans-Josef Schulze	イタリア	外国人訪問研究員	2年1月13日～2年1月18日	肥山
理化学研究所 仁科加速器科学研究センター・研究員・SCHMICKLER CHRISTIANE HEIKE	日本	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	1年10月5日～1年10月13日	肥山
仁荷大学校・教授・Ulugbek Yakhshiev	韓国	共同研究のため	1年10月18日～1年10月23日	肥山

所属・職・氏名	所在地	受入の目的	受入期間	受入者
Michigan State University・教授・LEE DEAN JUNYUEL	アメリカ合衆国	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	1年10月26日～1年11月2日	肥山
華東師範大学・教授・ZHOU XIANRONG	中国	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	2年1月12日～2年1月16日	肥山
フランス国立科学研究センター 国立原子核素粒子物理研究所・主幹研究員・CARBONELL JAUME	フランス	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	2年1月20日～2年2月1日	肥山
ヒューバート・キュリアン研究所 (IPHC)・研究員・LAZAUSKAS RIMANTAS	フランス	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	2年1月24日～2年2月1日	肥山
リヨン大学・名誉教授・RICHARD JEAN MARC	フランス	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	2年1月25日～2年2月1日	肥山
カーン大学・准教授・GIBELIN JULIEN DIDIER	フランス	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	2年1月25日～2年2月1日	肥山
The Hebrew University of Jerusalem・教授・BARNEANIR	イスラエル	国際ワークショップ参加し、共同研究を行う	2年1月25日～2年3月31日	肥山
南京大学・大学院生・Qian Wu	中国	共同研究のため	2年2月1日～2年3月31日	肥山
フランス国立科学研究センター・主幹研究員・Jaume Carbonell	フランス	共同研究のため	2年2月1日～2年3月7日	肥山
フランス国立科学研究センター・上級研究員・MARQUES MIGUEL	韓国	共同研究のため	2年2月3日～2年2月20日	肥山

所属・職・氏名	所在地	受入の目的	受入期間	受入者
広島大学大学院理学研究科・大学院生・AR ROHIM	日本	共同研究のため	1年5月26日～1年6月1日	山本
University College London・大学院生・DION TROY CALLUM	イギリス	実験を伴う共同研究	1年8月28日～1年6月1日	木村(崇)
Universite de Caen Normandie・大学院生・Cyril Lenain	フランス	欧米理学大学院生招聘プログラムのため	2年1月25日～2年2月1日	肥山
国立台湾師範大学・教授・TSAY JYH-SHEN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・CHIANG HSI-HSIEN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・GUO EN-JIAN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・CHANG NAI-YUN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・CHOW YU-TING	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・LIAO YU-TSO	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)

所属・職・氏名	所在地	受入の目的	受入期間	受入者
国立台湾師範大学・大学院生・LIU SHI-YU	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・CHEN PEI-YING	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・CHANG WEN-HAN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・LO PEI-HSUAN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
国立台湾師範大学・大学院生・CHANG PO-CHUN	台湾	日本・アジア青少年サイエンス交流事業(さくらサイエンス)参加のため	1年11月29日～1年12月5日	木村(崇)
Institute of Physics of the Czeck・研究員・JAKOUBEK TOMAS	チェコ	セミナー講演及び議論のため	1年11月21日～1年11月22日	川越
ヨーク大学、日本原子力開発研究機構・客員教授・ANDREI ANDREYEV	イギリス、日本	研究打合せ、セミナー参加のため	1年12月16日～1年12月18日	郷
日本原子力研究開発機構先端科学研究センター・卓越フェロー・PHILIPP GUBLER	日本	研究打ち合わせのため	2年3月16日～2年3月19日	肥山
広島大学大学院理学研究科・大学院生・AR ROHIM	日本	研究打ち合わせのため	1年7月19日～1年7月26日	山本

所属・職・氏名	所在地	受入の目的	受入期間	受入者
広島大学大学院理学研究科・大学院生・AR ROHIM	日本	研究打ち合わせのため	1年9月9日 ～1年9月13日	山本
京都大学福井健一記念研究センター・博士研究員・SCHNYDER SIMON KASPAR	日本	九州大学物理学教室での講演	2年2月2日 ～2年2月4日	藪中
University College London・大学院生・DION TROY CALLUM	イギリス	実験を伴う共同研究に参加するため	2年2月19日 ～2年3月8日	木村(崇)
Radbout University, Nijmegen・名誉教授・Thomas Rijken	オランダ	研究打ち合わせのため	2年1月7日 ～2年1月18日	肥山
Zhengzhou University・准教授・Ting Ting Sun	中国	研究打ち合わせのため	2年1月7日 ～2年1月22日	肥山
Nankai University・准教授・Jinniu Hu	中国	研究打ち合わせのため	2年1月14日 ～2年1月16日	肥山
LPTMC, Sorbonne University・研究員・Pricoupenko Ludovic	フランス	研究打ち合わせのため	2年1月26日 ～2年2月2日	肥山
理化学研究所・基礎科学特別研究員・Utku can	日本	研究打ち合わせのため	2年3月16日 ～2年3月19日	肥山
広島大学大学院理学研究科・大学院生・AR ROHIM	日本	研究打ち合わせのため	2年1月26日 ～2年2月1日	肥山
York Univ, JAEA・教授・Andrei Andreyev	カナダ	研究打ち合わせのため	1年11月17日 ～1年11月17日	肥山

2019 年度教育課程委員会活動報告

木村 崇

2019 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
副委員長	鈴木
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	河合、木村崇
過年度担当	松井、鵜田
学生実験	光田
特研配属	坂口
カリキュラム	若狭、木村崇
基幹教育科目	前多
アンケート	松本
授業参観	河合
文書確認	鈴木、木村

2019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：

- 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）の作成
- カリキュラムマップの作成
- 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
 - 3年次編入学生の単位認定制度の改訂
 - 新入生基礎学力調査の実施
 - 「大学の實力調査」への対応
 - 教職免許法改正に向けた担当教員の調整
 - 2019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
 - 2020年度入学者向けの専攻科目一覧案及び時間割案作成
 - 障がいのある学生の物理学生実験受講の対応
 - 九州大学ファカルティディベロプメント（FD）『日本学術会議分野別参照基準に基づく理学部物理学の3ポリシー』講師：国際基督教大学 北原 和夫 名誉教授 深堀 聰子 教授（教育改革推進本部）の主催
 - 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
 - 2018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
- 教育課程委員会が、上記の通常の業務以外に今後特に注意すべき課題としては、カリキュラムのスリム化・改革への対応、2022年度からの本格的に改変される基幹教育に合わせた、専攻教育のクォーター化への対応などがある。また、授業に関しては、以前、一教員のあ

たりの担当コマ数が多いのは事実である。また、助教の人数の減少に伴い、学生実験の運営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。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。

令和元年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

「3ポリシーに関する全学FD～日本学術会議分野別参照基準に基づ

く理学部物理学科の3ポリシー～」

開催日時：令和元年7月31日（水） 15：00～17：00

開催場所：伊都ウエスト1号館B棟2階 B-211 講義室

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、入試制度改革および認証評価の第3サイクルの受審に向けて、理学部物理学科では日本学術会議の分野別参照基準(物理学・天文学分野)に基づいた3ポリシー

- ・ ディプロマ・ポリシー（学位授与方針）
- ・ カリキュラム・ポリシー（教育課程編成・実施方針）
- ・ アドミッション・ポリシー（入学者受入方針）

を新たに作成した。本年度は、この3ポリシーに関する大学教育の分野別質保証の在り方検討委員会の委員長として、参照基準策定の取組を牽引して来られた北原和夫先生(国際基督教大学 名誉教授)をお招きし、「日本学術会議『大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準』について」と題してご講演頂いた。北原先生は大学教育の分野別質保証の在り方の検討委員会委員長もつとめられたことから、参照基準に基づいて教育課程を編成することの意味について貴重なご意見を伺うことができた。さらに、理学部物理学科の新3ポリシー案の作成を中心となってまとめられた木村崇先生より、新3ポリシーについて講演が行われた。基幹教育の物理学科目から物理学コースの専門教育までカリキュラム・マップが示され、その中で検討された事柄について知見の共有が行われた。

続いて、出席者との議論では、新3ポリシーについて参加者から質問が多数あがった。アドミッション・ポリシーでは、大学学部から大学院への進学と専門分野の変更など、流動性についての評価基準について議論が交わされた。さらにディプロマ・ポリシーでは、学位審査において全教員が教育に取り組む意識を共有することが重要であるという意見が木村崇先生からもあげられた。カリキュラム・ポリシーでは、カリキュラム・マップの先にある到達目標を周知し、実質化していく工夫について議論が交わされた。以上より、新3ポリシーに関する本学における教育改革の推進について議論する場となった。

令和1年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科	59	52 (物理学コース)
物理学科3年次編入	—	—
修士課程 (物理学専攻)	38	33
博士課程 (物理学専攻)	9	博士学位取得者4

2019年度の就職・進学状況

2019年度もここ数年同様、物理学科への求人が増える傾向にあり、学生もこれらの企業にこだわらずに就職先を選択している傾向がある。企業と学生の接触の解禁は3月1日、入社選考開始は6月1日で変更はなかった。しかし、実質的な選考は5月末を目指して行われるため、会社側の知名度と学生個人の資質差による2極化が強まっている。経団連縛りのない企業においてはこれまでと同様、3月以前から実質的な選考を開始し、早期の人材確保を進めている。

このような就職活動期間の短縮や企業の早期人材確保は負の効果を生み出している点も懸念される。すなわち、「九大ブランド」による学科推薦、大学推薦が学生にとって選考プロセスの短縮化や希望の部署への優先配属等の利益をもたらす一方で、自己研鑽を怠ってきた学生にとっては「期待外れ」の印象を会社側が抱くために、何社受けても決まらない状況がしばしば見受けられる。今後ますます学生の能力差が就職活動に与える影響が大きくなると考えられ、会話やプレゼンテーションなどの自己発信能力、エントリーシートなどにおける文章力などの基礎的な能力の涵養が学部・大学院教育でも必要になると思われる。また、学生が企業の早期人材確保を利用して、希望度の低い企業の内定を滑り止めとして複数確保するケースが見られる。企業側がよりよい人材確保を目的としていることは理解できるが、今後、行き過ぎた人材確保は従来の大学と企業の信頼関係に基づく推薦制度を不安定化する懸念がある。

就職先は例年通り多岐にわたっているが、求人に関しては情報関連企業（ベンチャーも含めて）が急増しており、名前が通っている企業より、カタカナ文字の新興企業や大企業が分社化した結果できた企業への就職が増加している。新しい分野においては数学と物理学の基礎をマスターしている人材への需要は高く、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

博士課程進学者が5名、民間企業30名、国家公務員2名、教員1名、未定2名であった。民間企業の就職先は、住友重機械工業、エーザイ、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング、東芝インフラシステムズ、ブリヂストン、トータル、三菱UFJインフォメーションテクノロジー、日鉄ソリューションズ、アジレントテクノロジー、マイクロンメモリジャパン、ニコン、東芝三菱電機産業システム、西日本技術開発、三井住友海上火災保険、中国電力、パナソニック、NECプラットフォームズ、ソニーLSIデザイン、JCB、シンプレクス、三菱重工業、富士通、凸版印刷、三菱スペース・ソフトウェア、パナソニック、RITAエレクトロニクス、MS&ADシステムズ、東海理化などである。公務員は、国家公務員（一般職）、気象庁、福岡県立高校教員である。

博士の進路・就職

博士課程修了者は3名であり、PD 2名、公立高校教諭 1名である。民間企業に行く学生がいなかったが、博士論文作成のための労力や時間を考えると就職活動に時間を割けないジレンマはあり、博士課程中に将来の進路を考える時間を設けることが重要と思われる。

学部学生の進路・就職

修士進学者が 40 名（九大物理 34 名、他学府 1 名、他大学 5 名）、民間企業就職 6 名、公務員 2 名、私立高校教員 1 名、未定 3 名であった。民間企業は、数理計画、ディップ、シリーズ・ソフトウェア、ワールドインテック、レシップホールディングス、富士ソフト、公務員では、陸上自衛隊、京都市上下水道局、教員では安田女子中高等学校である。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。

物理学科物理学コース学生の進路

進学 40 人

理学府物理学専攻への進学 34 人（内数）

理学府物理学専攻以外への進学 6 人（内数）

就職 9 人

大学院理学府物理学専攻修士課程学生の進路

進学 5 人

就職 33 人

大学院理学府物理学専攻博士課程学生の進路

就職 3 人

第23回 体験入学・公開講座報告

担当:前多 裕介

令和2年3月24日(火)に「第23回体験物理学」を開催するべく、令和2年1月14日～2月14日まで広く募集を行った。例年は2日間に渡って体験入学を実施してきたが、本年度からは1日にセミナーと体験実験を濃縮させ、午前には2件のセミナー講演、午後には4つの実験テーマ(身の回りの放射能、極低温、BZ 反応、光の回折と波の不思議)から1つを選び体験実験を行うという費用対効果の高いプログラムへと改訂した。定員を50名とし、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。その結果、62名の応募があった。1日のプログラムであっても、従来と同程度の関心を引きつけ、応募数も期待を上回るものであるものであった。また、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。例年高専生の参加が減少していたとはいえ、本年度の公開講座・研究室見学の参加希望者はなかった。この点は次回以降の開催で対応すべきところと思われる。

このように準備を進めて来た体験入学・公開講座であったが、九州大学の新型ウィルス感染防止の基本方針に基づき、3月以降の大規模な集会開催に大きな制限がかかることとなった。参加者の安全と感染防止対策を鑑み、2月27日に参加登録者に体験入学の中止を電子メールにて伝達した。実際のセミナー・実験の内容、スケジュール、担当者は下記のプログラムに示す。

残念ながら開催に至らなかった第23回体験入学であるが、参加登録者62名には、製本した体験入学テキストを記念に送付した。大学で学ぶ物理学について、その一端を触れてもらう機会となったことを祈念したい。そして、第24回体験入学・公開講座の開催に向けて、新型ウィルス感染防止対策をとりながら、現実的にどのような形式で開催できるかの検討が重要な課題となった。

[プログラム]

令和2年3月24日(火)

	午前の部		午後の部
10:00 ~	開校式	13:30 ~	実験の注意
10:40		13:35	
10:40 ~	「究極の物理法則を探る－素粒子理論の世界－」(鈴木教授)	13:35 ~	実験(A～D から1テーマ)
11:20		15:30	
11:20 ~	休憩	15:30 ~	集合

11:35		15:35	
11:35 ~ 12:15	「レーザー冷却とボーズアインシュタイン凝縮」(野村准教授)	15:35 ~ 15:45	閉校式
12:15 ~ 13:30	体験入学：昼休み	15:45	解散
12:20~	一般公開講座：閉校式 高専生向け講座：研究室訪問		

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。

1 先端科学普及事業（高校への出張講義等）

1) 熊本県立第二高等学校

2019年 7月6日（土） 2年生 60名程度（30名程度×2コマ）
東城 順治 准教授

2) 福岡県立宗像高等学校

9月14日（土） 1～2年生 30名程度
前多 裕介 准教授

3) 佐賀県立唐津東高等学校

9月20日（金） 1～2年生 60名程度（30名程度×2コマ）
河合 伸 准教授

4) 宮崎県立宮崎北高等学校 も予定したが、新型コロナウイルス拡大のため高校側から中止の連絡があり、取りやめ

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）

福岡県高等学校理科部会と合同で中高教育に携わる方々に対して、最先端の自然科学と科学技術の現状に関する講演会を開催した。

実施日：2019 年 8月 8日

物理学部門の講演は

町田 真美 助教
「ブラックホールと宇宙磁場」

松本 琢磨 助教
「ミクロの世界を視る -素粒子・原子核そして宇宙-」

取りまとめ 渡部 行男 教授

3) 先端科学体験事業 体験物理学

2020 年 3月24日(日)～25(月)

対象：高校1，2年生，高専生3，4年生

を予定したが、**新型コロナウイルス拡大のため、取りやめ**

研究室訪問

実施日：2019 年 7月 9日

福岡教育大学附属福岡中学校3年生 1名

川越 清以 教授

4) 公開講座 現代物理学入門

2020 年 3月 24 日(日)に予定したが、**新型コロナウイルス拡大のため、取りやめ**

5) 2019 年度オープンキャンパス

実施日：2019 年 8月4日 (日)

内容：研究紹介と、講義を行った