

# 物理教室年次報告書 令和2年度

2021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2年度の研究テーマと成果	
素粒子理論	2
理論核物理	18
宇宙物理理論	29
粒子系理論物理	44
実験核物理	51
素粒子実験	75
物性理論	104
統計物理学	111
凝縮系理論	115
磁性物理学	117
量子微小物性	123
固体電子物性	133
複雑物性基礎	139
複雑流体	147
複雑生命物性	155
客員教授	162
教職員一覧	163
各種委員一覧	164
物理学教室談話会	165
非常勤講師一覧	168
外国人研究者等受入記録	169
教育課程委員会活動報告	170
物理学部門ファカルティ・デベロップメント報告	172
入学者数と卒業者数	173
就職・進学情況	174
体験入学・公開講座報告	176
社会活動貢献報告	178

## 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2020年度の活動をまとめたものです。2019年度末から日本国内でも新型コロナウイルス感染の拡大が顕著になり、新年度の入学式やガイダンスが例年通りに開催できない状況で、新入生へのガイダンスや新学期の授業をオンラインで行う取り組みからのスタートとなりました。授業のオンライン実施や、大学院等入試も新型コロナウイルス感染拡大対策のため、実施方式の変更等大きな影響を受けました。この未曾有の状況下で、学生の皆さんには、大きな負担がかかったと思いますが、大きな混乱が発生することがなかったのは、教職員の皆さんのご尽力のおかげと感じし、感謝しています。新型コロナウイルス感染対策は継続が必要な状況であり、今後も研究教育活動の臨機応変な対応が必要と思われまます。

物理学部門の人事に関わることとしては、4月には実験核物理研究室に市川雄一准教授が、9月に宇宙物理理論研究室に菅野優美准教授が着任されました。他方、12月には肥山詠美子先生が、2月には織田勸先生が退職されました。また3月には、中西秀先生と河合伸先生が退職されました。皆様の今後の活躍を願っております。

次に表彰関連では、植松祐輝助教が第5回福井謙一奨励賞を受賞されました。また、菅野優美准教授が第8回湯浅年子賞「銀賞」を受賞されました。さらに、学生の森川億人さんが学術振興会育志賞を受賞、坂本遼太さんが第34回独創性を開く先端技術大賞学生部門特別賞を受賞、庭瀬暁隆さんが若手優秀発表賞の表彰を受けております。

関連では、9月に学士1名と修士1名、3月には、学士51(40)名（括弧内は物理学コース）、修士34名、博士8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が続いていますが、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・理学研究院長が引き続き理学研究院長を引き続き務められると共に、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ています。コロナ禍で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されています。

2021年度の物理学部門長は、昇任早々ですが水野大介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、水野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 山本一博

# 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 》

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准教授)

《 大学院 博士課程 》

森川億人

《 大学院 修士課程 》

芦江誠大      竹内健悟      宮川侑樹

《 学部 卒業研究生 》

塚本恭平      北川佑      阿部元一      西村皐

《 訪問研究者 》

井上研三

## 担当授業

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

## 研究・教育目標と成果

**2 + 1 フレーバー QCD における有限温度熱力学量の数値計算 (鈴木博)**

(この研究は WHOT-QCD Collaboration との共同研究です。)

WHOT-QCD Collaboration では、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、いわゆるグラディエントフローを用いた手法 (SFtX 法) を用いて行っている。ここでは、

この方法論の一つのテストとして、現実より少し重い  $ud$  クォークに対して生成されたゲージ場配位を用い、174 MeV から 697 MeV の温度に対して、エントロピー密度、トレースアノマリーといった熱力学量を測定した。(格子間隔は 0.07 fm と固定されており、連続極限は取られていない。) SFtX 法は物理量のマッチングの係数を必要とするが、ここでは、近年 Harlander らのグループにより計算された 2 ループの係数を用い、1 ループ係数での結果との比較を行った。結果として、エントロピー密度に対しては以前の 1 ループ係数での結果と consistent であり、2 ループ係数は系統誤差の低減に役立つことが見て取れた。一方、トレースアノマリーについては、運動方程式の使用から来る離散化誤差が大きいように見え、この点の理解は今後の課題となっている。

### $\mathbb{R}^3 \times S^1$ 上のゲージ理論におけるリノマロンの解析 (芦江誠大・森川億人・高浦大雅・鈴木博)

ゲージ理論や非線形シグマ模型を  $S^1$  コンパクト化した際、バイオンと呼ばれる半古典的配位が出現する。近年、Argyres–Ünsal、また、Dunne–Ünsal は、このバイオンが生み出す不定性が、リノマロンと呼ばれる場の理論の摂動論の不定性と相殺するという大胆な予想をした。この予想については多くの研究が成されたが、Anber–Sulejmanpasic は、QCD(adj.) という理論でゲージ群が  $SU(2)$  もしくは  $SU(3)$  の場合には、 $S^1$  コンパクト化の元ではリノマロンが消滅することを示し、上の予想に反証を与えた。ここでは、この Anber–Sulejmanpasic の解析を全く新しい方法で一般化し、ゲージ群が一般の  $SU(N)$  の場合でリノマロンが消滅することを示した。これにより、この予想はほぼ否定されたと考えている。また、ここでは  $S^1$  コンパクト化をほどいて  $R^1$  にする過程で、どのようにリノマロンが出現するかについても解析を行った。

### グラディエントフローを用いた $K$ 中間子バグパラメーターの評価法の研究 (鈴木博)

(これは筑波大学の鈴木遊、谷口祐介、金谷和至の各氏との共同研究である。)

$K_0 - \bar{K}_0$  振動実験から小林–益川行列を評価するためには、電弱相互作用から来る 4 フェルミ有効ハミルトニアン of ハドロン間行列要素を計算する必要がある。この行列要素は強い相互作用の非摂動論的補正を受けるため、格子 QCD による数値計算が唯一の計算方法である。しかし、一般にカイラル対称性を壊す格子 QCD の定式化では有効ハミルトニアン of のくりこみが極めて複雑となり、これがこの計算を極めて難しくしている。我々は、グラディエントフローが複合演算子のくりこみを単純化する性質に注目し、 $K_0 - \bar{K}_0$  混合に効くくりこまれた 4 フェルミ演算子をグラディエントフローされた場で表す公式を構成した。今後、この公式の格子 QCD シミュレーションでの応用が待たれる。

### **$SU(3)$ 純 Yang–Mills 理論の一次相転移点における潜熱と圧力差の測定 (鈴木博)**

(この研究は WHOT-QCD Collaboration との共同研究です。)

$SU(3)$  純 Yang–Mills 理論は、有限温度で一次相転移をおこすゲージ理論の典型例である。ここでは、この相転移点直上における、高温相と低温相間での潜熱と圧力差を格子ゲージ理論の数値シミュレーションにより測定した。ここではグラディエントフローによって構成したエネルギー運動量テンソルを用いた点が新しい。この新しい測定法により、従来よりはるかに高い精度で潜熱を決定すること成功した。(相共存なので圧力差はゼロであるべきで、これも誤差の範囲で確かめられた。)

### **グラディエントフロー厳密くりこみ群の構築 (鈴木博)**

(この研究は園田英徳氏 (神戸大) との共同研究です。)

いわゆるグラディエントフローとは、ゲージ場を仮想的な時間に沿ってゲージ不変な拡散方程式で拡散させるもので、この時拡散させた場が特異なくりこみの性質を持っている。我々は、場の拡散とウィルソン流の厳密くりこみ群にあらわれる疎視化との類似性を精密化することで、グラディエントフローに基づいた厳密くりこみ群を定式化した。この定式化は通常の厳密くりこみ群と異なり、ゲージ対称性を明白に保っている点が新しい。現在、この定式化の物質場を含んだ場合への拡張、また、摂動論的解析を行っている。今後、ゲージ理論における非自明なくりこみ群固定点の解析への応用を模索したい。

### **一般化ヒッグス有効理論の研究 (津村浩二)**

(この研究は長井遼 (パドバ大)、棚橋誠治氏 (名古屋大)、内田祥紀氏 (名古屋大) との共同研究です。)

LHC 実験で新物理の探索が行われていますが、なかなかその痕跡は見えてきません。このような現状では、有効理論による新物理解析が便利です。これまで、素粒子の標準模型の粒子場の表現にもとづく標準模型有効理論や、電弱対称性とその破れの構造にもとづくヒッグス有効理論がその主要な役割を果たしてきました。本研究では、ヒッグス有効理論にスカラーやフェルミオンが新粒子として加わっても使える一般化ヒッグス有効理論を定式化しました。また、その遷移振幅を幾何学量であらわす方法がありますが、その手法を初めてフェルミオンまで含めた一般の理論に拡張しました。今後はこの枠組を用いた現象論的解析が重要になります。

### **$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ にチャージした暗黒物質の研究 (津村浩二)**

(この研究は浅井健人 (東京大)、大川翔平氏 (ビクトリア大) との共同研究です。)

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$  ゲージ対称性は、実験が示唆するミュオンの異常磁気能率の標準模型からの

逸脱を軽いゲージボソンの寄与により解消する模型です。この模型に大きなチャージを持つディラック型のフェルミオンを導入すると、偶発的対称性によりフェルミオンは安定化し暗黒物質の良い候補となります。大きなチャージは暗黒物質の残存量の現在の値を再現することから決まります。このとき、暗黒物質は軽いゲージボソンを仲介して標準模型の粒子（特にニュートリノ）と相互作用します。そこで、稼働中のスーパーカミオカンデや建設中のハイパーカミオカンデでこの模型を検証する方法を検討しました。この模型に限らず軽いゲージボソンを仲介してニュートリノと相互作用する暗黒物質全般に対する検証方法となっており、このクラスの模型を探る新しい方法の提案となっています。

### Quiver Supersymmetric Standard Model の研究（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、長らくその現象論が研究されてきた。しかし LHC Run I, II の結果により、強い相互作用をする超対称性粒子の質量の下限は 1 - 2 TeV 程度に上昇した。これは典型的には最小超対称標準模型の電弱対称性の破れに 1 % 程度以下の微調整が要求されることを意味している。一方で最小超対称模型におけるヒッグス粒子の質量の予言は超対称性粒子のスペクトラムが重くなれば上昇するが、130 GeV 程度に上限が存在する事が知られている。測定された 125 GeV の質量は奇跡的に現在許される極めて狭い範囲に収まっている。階層性問題の解とされる他の様々な理論においてヒッグス粒子の質量の予言に大きな幅があった事を考えるとこれは著しい成功と言える。ヒッグス質量を実現するような重い超対称性粒子のスペクトラムが実現しているならば、その微調整の背後には最小超対称標準模型を超える何らかの新しい物理があると考えするのが自然と言える。本年度はそうした物理として最初に昨年度発見した超対称性の破れのモジュライ媒介の新しい性質を応用する研究を行っていたが、途中で別の方向としてクイバー超対称標準模型を用いて比較的容易に微調整を避けることができる事に気付いたため研究の方針を転換した。超対称性理論の微調整はヒッグスの質量パラメータとゲージノ質量、ストップ質量がゲージ相互作用や湯川相互作用を通じたくりこみ群などの量子効果により混合する事に原因がある。ゲージノ質量やストップ質量が巨大になれば、ヒッグス質量パラメータを小さくするためにパラメータの微調整が必要になる。こうした量子効果は超対称性粒子の質量下限の現状を考えると、くりこみスケールの不定性だけでも容易にヒッグス質量パラメータに数百 GeV の補正を与える。この問題を回避するためには何らかの非自明な相殺を仮定しない限り、ゲージ相互作用や湯川相互作用が直接超対称性の破れに触れないように隔離する必要がある。本年度はクイバー超対称標準模型を考える事によりこの隔離を行う可能性について研究を進めた。クイバー超対称標準模型においては標準模型のゲージ対称性を二重にし、双線型表現により対角に破

る事で標準模型を実現する。ゲージ結合定数の統一は中間スケールで実現し、超弦理論におけるモジュライ固定のシナリオの一つである Large Volume シナリオと相性が良い。このクイバー超対称標準模型においてクォークやレプトンと相互作用しているゲージノの質量をゼロとする事で容易にゲージ相互作用の隔離が実現する。これらのゲージノは双線型場によりゲージ対称性が破れた後にもう一方のゲージノと混合する事で質量を獲得する。このスケールがゲージノの質量程度であれば量子補正を最小化できる。一方でトップ湯川相互作用の隔離は次の様に行う。第三世代に対してベクターライクなコピーを模型に導入し、ヒッグス場はその物質場側と湯川相互作用させる。ベクターライク場は超対称性を破る質量を持たないとする。一方で第三世代は超対称性を破る質量を持ち、ゲージ一重項の場を通じてベクターライクなコピーの反物質場と湯川相互作用を持つ。一重項が真空期待値を持てばベクターライクな物質場と第三世代が混合し、質量固有状態に湯川相互作用と超対称性を破る質量が現れる。一重項の真空期待値が超対称性の破れのスケールにあれば、湯川相互作用によるヒッグス場への量子補正を最小化できる。現在この模型について具体的な模型で数値計算を行い、ここで述べた予想が正しい事を定量的に検証している。近く結果をまとめ論文を発表する予定である。

### ゲージ・ヒッグス統一理論の研究 (山津直樹)

(これは主に船津周一郎、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 (SM) 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 (GHU) の研究が行われている。近年 GHU 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 (GHGUT)” を提唱した。昨年度その GHGUT の有効理論と考えられる  $SU(3) \times SO(5) \times U(1)$  GHU (以下、GHU B-模型) を構成し、その模型における電弱対称性の破れの構造やヒッグス自己結合、湯川結合定数の標準理論からのズレなどの基本的な性質を調べた。

今年度は将来の加速器実験計画である国際線形加速器 (ILC) 実験での GHU B-模型についての検証可能性を議論した。具体的には、ILC 実験の初期段階の重心系エネルギー 250 GeV、積分ルミノシティ  $250 \text{ fb}^{-1}$ 、偏極度 80% と 30% の電子と陽電子の始状態からのフェルミオン対生成過程における観測可能量を SM と GHU B-模型について解析した。結果として SM と GHU B-模型のズレの効果からこの模型の典型的なスケールを与えるカルツァ-クライン質量で換算して 15 TeV 程度まで検証が可能であることが判明した。また、この種の模型では SM にないベクトルボソンの結合定数が比較的大きくかつ右巻きと左巻きのフェルミオンとの結合定数に大きな違いが現れるため、電子-陽電子の始状態の偏極に対する大きな依存性が生じ、初期無偏極の場合に比べて検

証可能なエネルギー領域を広げられることがわかった。

来年度は ILC 実験でのフェルミオン対生成過程において今年度の研究では完了しなかったバーバー散乱過程として知られる電子-陽電子から電子-陽電子への過程についての解析を完了させる予定である。

### 統一理論構築のためのリー代数とその表現論の研究 (山津直樹)

素粒子標準理論を越える統一模型構築には有限次元リー群とその表現についての基礎的な知識が必要とされる。歴史的に 1981 年の R.Slansky による有限次元リー群の文献 “Group Theory for Unified Model Building” が標準的な文献として使われ、最近では N.Yamatsu による有限次元リー群の文献 (arXiv:1511.08771) も徐々に使われ始めてきた。最近の研究により R.Slansky’81 や N.Y.’15 のリー群の部分群などに誤った記載が発見された。また、arXiv の第一版の公開以降も利便性向上のため必要に応じて加筆・修正を行っている。今年度は第二版として arXiv:1511.08771v2 を公開した。具体的には arXiv:1511.08771 の v1 から v2 では主に次の内容の加筆・修正を行った：(1) リー群のランクを 15 までから 20 までに拡張、(2) リー群の文献で間違いのある部分群の訂正、(3) リー群の表現の名前付けについて説明の追加、(4) 射影行列の導出に必要な表現分解を明示、(5) 部分群への表現分解の具体例の増加、(6) テンソル積の対称と反対称部分の明示。

### 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)

素粒子物理現象の背後にある物理法則を解明する手段として対称性と対称性の破れの機構の理解は重要である。素粒子現象を記述する基本言語である場の量子論における対称性の破れとして従来までよく議論されていた正則部分群への破れだけでなく特殊 (正則でない) 部分群への破れの構造も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南部-ヨナ=ラシニオ有効模型を用いた対称性の破れの一般的な構造を調べた。

今年度はこれまで議論していなかった四次元での南部-ヨナ=ラシニオ有効模型を用いたシンプレクティック群での実と擬実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。これまで得られたリー群の正則または特殊部分群への破れとユニタリ群と直行群での表現の性質との相関が残りの古典リー群であるシンプレクティック群についても成り立つかを確認した。シンプレクティック群においてもユニタリ群や直行群での実と擬実表現での対称性の破れと同様に対称性の正則部分群への破れが起り易いことが確認された。これまでの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、自己共役

表現 (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る。

今年度までの研究により南部-ヨナ=ラシニオ有効模型を用いたフェルミオン対凝縮によるリー群の対称性の破れの構造が明らかとなった。来年度からは高次元理論における内部・外部自己同型な境界条件での正則・特殊部分群への破れの下での対称性の破れの構造などについての解析を進めていく予定である。

### 超対称ランダウ・ギンツブルグ模型の赤外臨界点の数値的研究 (森川億人)

2次元  $\mathcal{N} = 2$  ウェス・ズミノ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ランダウ・ギンツブルグ模型と呼ぶ。ところが、ウェス・ズミノ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。本研究では、加堂・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た。また、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、スケール次元の精密測定を行った。これら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。

本研究成果に基づき博士論文の執筆を行った。また、上記の研究に加え、近年注目されているグラディエント・フロー法やリサージェンス理論に関する研究などの博士課程における業績が評価され、第11回(令和2(2020)年度)日本学術振興会育志賞を受賞した。

### 発表論文

《原著論文》

$N_f = 2 + 1$  QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients:

Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda,

Physical Review D **102** (2020), 014510 [erratum: *ibid.* **102** (2020), 059903]

[arXiv:2005.00251 [hep-lat]]

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

Masahiro Ashie, Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki, Hiromasa Takaura,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **2020** (2020), 093B02

[arXiv:2005.07407 [hep-th]]

Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow:

Asobu Suzuki, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya,

Physical Review D **102** (2020), 034508

[arXiv:2006.06999 [hep-lat]]

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

Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **2021** (2021), 013B08

[arXiv:2011.10292 [hep-lat]]

Gradient flow exact renormalization group:

Hidenori Sonoda and Hiroshi Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **2021** (2021), 023B05

[arXiv:2012.03568 [hep-th]]

Scalar and fermion on-shell amplitudes in generalized Higgs effective field theory:

Ryo Nagai, Masaharu Tanabashi, Koji Tsumura, Yoshiki Uchida,

Physical Review D **104** (2021), 015001

[arXiv:2102.08519 [hep-ph]]

Search for  $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$  charged Dark Matter with neutrino telescope:

Kento Asai, Shohei Okawa, Koji Tsumura,

Journal of High Energy Physics 03 (2021) 047

[arXiv:2011.03165 [hep-ph]]

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

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

Physical Review D **102** (2020), 015029

[arXiv:2006.02157 [hep-ph]]

Effective Potential and Universality in GUT-Inspired Gauge-Higgs Unification:  
Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,  
Physical Review D **102** (2020), 015005  
[arXiv:2002.09262 [hep-ph]]

《Proceedings》

Linear Collider Signals of  $Z'$  Bosons in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification:  
Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Naoki Yamatsu,  
SLAC eConf C21-03-15.1 (LCWS2021 proceeding)  
[arXiv:2103.16320 [hep-ph]]

《その他の論文》

超対称性粒子の質量がもつ新しい性質:

奥村健一,

日本物理学会誌 2020年12月 第75巻12号 751-755

USp(32) Special Grand Unification:

Naoki Yamatsu,

[arXiv:2007.08067 [hep-ph]]

Finite-Dimensional Lie Algebras and Their Representations for Unified Model Building:

Naoki Yamatsu,

[arXiv:1511.08771v2 [hep-ph]]

**著書**

なし

**講演**

《海外での講演》

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

Hiroshi Suzuki,

invited talk at the Institute for Theoretical Particle Physics and Cosmology, RWTH Aachen University, 2021年2月4日、RWTH Aachen University, Aachen, Germany、オンライン

Resurgence structure on compactified spacetime with twisted boundary condition:  
Okuto Morikawa,  
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020)、2020年8月7日、オンライン

Perturbative ambiguities in compactified spacetime and resurgence structure:  
Okuto Morikawa,  
Potential Toolkit to Attack Nonperturbative Aspects of QFT -Resurgence and related topics-、2020年9月24日、オンライン

Is Symmetry Breaking into Special Subgroup Special?:  
Naoki Yamatsu,  
invited talk at HEP-Cosmo Webinar Series、2020年8月7日、India、オンライン

Linear Collider Signals of  $Z'$  bosons in GUT inspired Gauge-Higgs Unification:  
Naoki Yamatsu,  
International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2021)、2021年3月18日、オンライン

《国内での講演》

有限温度量子色力学のダイナミクス

鈴木博

ポスター発表、JHPCN 第12回拠点シンポジウム、2020年7月9日、オンライン

The vacuum angle is a marginal parameter

鈴木博

日本物理学会 2020年秋季大会、2020年9月14日、オンライン

Small Flow time eXpansion (SFtX) 法による  $2+1$  フレーバー QCD の熱力学

鈴木博

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 15 日、オンライン

Vacuum angle is a marginal parameter

Hiroshi Suzuki,

セミナー講演、2020 年 10 月 3 日、理化学研究所計算科学研究センター（オンライン）

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

鈴木博

ポスター発表、第 7 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会、2020 年 10 月 30 日、オンライン

Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow

invited talk at the 10th International Conference on Exact Renormalization Group 2020 (ERG2020), 2020 年 11 月 3 日、京都大学基礎物理学研究所（オンライン）

Vacuum angle is a marginal parameter

鈴木博

第 126 回日本物理学会九州支部例会、2020 年 12 月 5 日、オンライン

Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow

鈴木博

セミナー講演、2020 年 12 月 9 日、京都大学理学部（オンライン）

Quiver supersymmetric standard model and modulus mediation

奥村健一

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 16 日、オンライン

超対称性の破れのモジュライ媒介と非摂動効果による質量

奥村健一

第 3 回九大 - 理研ジョイントワークショップ、2020 年 12 月 22 日、オンライン

Little SUSY hierarchy in quiver supersymmetric standard model

奥村健一

日本物理学会第 76 回年次大会、2020 年 3 月 12 日、オンライン

Second 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、2021 年 3 月 12 日、オンライン

Bhabha Scattering in Gauge-Higgs Unification

幡中久樹、細谷裕、船津周一郎、折笠雄太、山津直樹

日本物理学会第 75 回年次大会、2021 年 3 月 12 日、オンライン

Left-right Phase Transition in Gauge-Higgs Unification

細谷裕、船津周一郎、幡中久樹、折笠雄太、山津直樹

日本物理学会第 75 回年次大会、2021 年 3 月 12 日、オンライン

Electroweak Phase Transition in Gauge-Higgs Unification

船津周一郎、幡中久樹、細谷裕、折笠雄太、山津直樹

日本物理学会第 75 回年次大会、2021 年 3 月 12 日、オンライン

Dynamical Breaking to Special or Regular Subgroups in Nambu-Jona-Lasinio Models

山津直樹

理研 iTHEMS-九大ジョイントワークショップ、2020 年 12 月 22 日、オンライン

Baryon, Lepton, and Fermion Number Symmetries as parts of  $SU(16)$  GUT Gauge Symmetry

Naoki Yamatsu

ポスター発表、「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2020、2020 年 12 月 21 日、オンライン

Is Symmetry Breaking into Special Subgroup Special?

山津直樹

素粒子現象論研究会 2020、2020 年 11 月 28 日、大阪市立大学, 大阪

$USp(32)$  Special Grand Unification

山津直樹

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 16 日、オンライン

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

幡中久樹、細谷裕、船津周一郎、折笠雄太、山津直樹

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 16 日、オンライン

The Effective Potential and Universality in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification

細谷裕、船津周一郎、幡中久樹、折笠雄太、山津直樹

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 16 日、オンライン

Computer simulation of the  $N = 2$  Landau-Ginzburg model

Okuto Morikawa,

セミナー講演、2020 年 6 月 9 日、大阪大学（オンライン）

コンパクト化された時空における摂動論の不定性とリサージェンス構造

森川億人

ポスター発表、熱場の量子論とその応用、2020 年 8 月 25 日、オンライン

$S^1$  コンパクト化された時空でのリサージェンス構造

森川億人

素粒子若手オンライン研究会、2020 年 8 月 28 日、オンライン

Identification of perturbative ambiguity canceled against bion

森川億人

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14 日、オンライン

Renormalon in  $SU(N)$  QCD(adj.) on compactified spacetime

森川億人

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 16 日、オンライン

Perturbative ambiguities and resurgence in circle-compactified theories

Okuto Morikawa,

セミナー講演、2021 年 1 月 20 日、東京工業大学（オンライン）

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 B（一般）

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、基盤 B（一般）

有限温度 QCD における物理量の決定へ向けて

研究代表者：鈴木博

科学研究費補助金、新学術領域研究（計画研究）

標準理論を超えた新現象とニュートリノで探る新しい素粒子像

研究代表者：津村浩二

科学研究費補助金 新学術領域研究（総括班）

ニュートリノで拓く素粒子と宇宙

研究分担者：津村浩二（研究代表者：中家剛）

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

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

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

## 学部4年生卒業研究

塚本恭平：(指導教員、津村浩二)：

北川佑：(指導教員、津村浩二)：

阿部元一：(指導教員、津村浩二)：

西村皐：(指導教員、津村浩二)：

## 修士論文

芦江誠大：(指導教員、鈴木博)： $S^1$  コンパクト化された時空における赤外リノーマロンの考察

竹内健悟：(指導教員、津村浩二)：標準模型の偶発的対称性と PQ 対称性

## 博士論文

森川億人：(指導教員、鈴木博)：Numerical study of infrared criticality of the supersymmetric Landau–Ginzburg model (超対称ランダウ・ギンツブルグ模型の赤外臨界点の数値的研究)

## 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

日本物理学会九州支部支部長

筑波大学計算科学研究センター運営協議会委員

京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員

素粒子論グループ素粒子メダル奨励賞選考委員長

第14回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞選考委員

平成30(2018)年度科学研究費助成事業審査第一部会第15小委員会II委員

Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

津村浩二：

東京大学素粒子物理国際研究センター 客員准教授

日本物理学会九州支部支部委員

素粒子論グループ 事務局連絡責任者

東京大学 宇宙線研究所 特任研究員人事選考委員会 委員

奥村健一：

日本物理学会第76回年次大会 Jr セッション審査委員

### その他の活動と成果

鈴木博：

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

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

森川億人：

「場の理論と超弦理論に対する非摂動的アプローチ」に対して、「第11回（令和2（2020）年度）日本学術振興会 育志賞」を受賞

# 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》  
小川 翔也  
《大学院 修士課程》  
金 龍熙 宮本 亮祐 山本 拓実 李 東ウク  
戴 健為 北川 祐  
《学部 卒業研究生》  
嶋崎 敬 城 久喜 安井 理貴 吉田 匠吾

## 担当授業

量子力学 I・同演習 (肥山詠美子・池田陽一・松本琢磨)、物理学特別講義 1 (肥山詠美子)、物理学入門 I (肥山詠美子)、物理数学演習 (松本琢磨)、最先端物理学 (池田陽一) 理論核物理学 (池田陽一) 物理学特別研究 I (池田陽一)、物理学特別研究 II (池田陽一)、

## 研究・教育目標と成果

### 機械学習によるハドロン量子状態の分類

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

量子色力学の非自明な量子性・非可換性により、様々なハドロン間相互作用が現れることが知られている。これに起因し、ハドロンの量子状態も束縛・共鳴・仮想状態と様々である。本年度は、量子散乱理論から許される最も一般的な  $S$  行列の形を用いて教師データを作成し、深層ニューラルネットワークによりハドロン量子状態を分類することができる人工知能の構築を行った。学習させた人工知能を、2核子系の量子状態の分類に適用し、 $^1S_0$  と  $^3S_1$  の状態分離に成功した。また、ハドロン散乱チャンネル結

合系への応用を、カリキュラム・ラーニング法を用いて行った。

### 格子量子色力学によるハドロン間相互作用

(池田陽一、HAL QCD Collaboration)

ハドロン間の相互作用について、クォークの動力学をフルに取り入れた、第一原理計算である格子量子色力学により導出を行った。スーパーコンピュータ「富岳」を用いて、クォーク多体系の相対論的散乱方程式の解である「同時刻南部-Bethe-Salpeter 波動関数」を計算し、そこから相互作用を導出する。今年度は、COSY-WASA で報告があった  $d^*$  共鳴の構造の計算・論文執筆と、LHC run-3 で測定可能なチャームハドロン相関関数の計算に向けた準備を行った。

### 新型コロナウイルス感染症の感染者数拡大への数理的アプローチ

(池田陽一、中野貴志 [阪大 RCNP])

世界各国の 2020 年 2-4 月の COVID-19 の感染者数推移について調べ、それらが全ての国において、二重指数関数 (ゴンペルツ曲線) に従うことを発見した。これにより、一定減衰仮説を唱えるにいたり、感染症数理モデルとして「リンク切れ模型」を構築した。新聞の取材協力、自治体への情報提供などを行った。

### 弱束縛核分解反応における様々な高次効果の系統的研究

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

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

本研究では CDCC を用いて、 $^{11}\text{Be}$ 、 $^{17}\text{F}$  と  $^{208}\text{Pb}$  標的の反応を解析した。結果として、多段階結合の効果は核力分解において重要であること、クーロン分解では  $^{11}\text{Be}$  に関してはその効果が小さく、 $^{17}\text{F}$  ではクーロンと核力分解の効果として現れることが示された。その他の効果についても調査し、その結果を Progress of Theoretical and Experimental Physics に投稿中である。本研究は Jagjit 氏を中心に推進された。

### 多チャンネル分解断面積の近似的記述

(渡邊慎 [岐阜高等専門学校 講師]、松本琢磨、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター])

准教授])

中性子過剰領域では価中性子がコアとなる原子核に弱く束縛され、薄く広がった密度分布をもつハロー構造を持つ。より中性子過剰になるとコアとなる核も不安定で変形などの効果を考える必要がある。このような変形ハロー核の分解反応は通常の CDCC にコアの変形効果を取り入れた計算を行なう必要があり、現在の最先端の研究の一つである。

コア核の変形を考慮すると、分解後に放出される終状態としてコアが基底、または励起した状態の多チャンネル分解を考える必要がある。これは例えば変形コア核と中性子の2体系とした場合は、それぞれコア核の状態に対し放出チャンネルの波動関数を正確に記述できるが、より多体系になると複数の崩壊チャンネルへの分離が難しくなる。そこで本研究では、近似的に各崩壊チャンネルの断面積を記述する方法を提案し、その近似の正当性を2体系の場合に確認した。本研究は渡邊氏を中心に推進され、成果は Physical Review C に掲載された。

### **${}^6\text{He}$ のハロー構造と3体分解**

(Y.L. Sun [香港大学]、中村隆司 [東京工業大学]、松本琢磨、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授]、菊地右馬 [徳山工業高等専門学校 准教授])

${}^6\text{He}$  核は2中性子ハロー核として知られ、 ${}^4\text{He}$  と2つの中性子の3体系として記述される。本研究では  ${}^6\text{He}$  のクーロン分解反応を通して、 $E1$  遷移、共鳴状態を探索した。本研究は実験との共同研究で、実験で得られた断面積を CDCC 法により解析を行ない、 ${}^6\text{He}$  の構造の情報を引き出した。結果として、 ${}^6\text{He}$  のハロー構造を確認し、さらに2中性子相関の情報についても議論した。本研究は、実験部分は Y.L. Sun を中心とした理化学研究所の実験グループが中心となって推進され、成果は Physics Letters B に掲載された。

### **${}^6\text{He}$ のハロー構造と3体分解**

(Y.L. Sun [香港大学]、中村隆司 [東京工業大学]、松本琢磨、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授]、菊地右馬 [徳山工業高等専門学校 准教授])

${}^6\text{He}$  核は2中性子ハロー核として知られ、 ${}^4\text{He}$  と2つの中性子の3体系として記述される。本研究では  ${}^6\text{He}$  のクーロン分解反応を通して、 $E1$  遷移、共鳴状態を探索した。本研究は実験との共同研究で、実験で得られた断面積を CDCC 法により解析を行ない、 ${}^6\text{He}$  の構造の情報を引き出した。結果として、 ${}^6\text{He}$  のハロー構造を確認し、さらに2中性子相関の情報についても議論した。本研究は、実験部分は Y.L. Sun を中心とした理化学研究所の実験グループが中心となって推進され、成果は Physics Letters B に掲載された。

## 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)

生のバリオン間相互作用に基づく量子多体変分計算によって高密度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する研究を行った。特に2020度は、これまでに作成した状態方程式テーブルを用いて、様々な親星モデルの重力崩壊シミュレーションを行うとともに、昨年度から引き続き、結合チャンネル相互作用を直接考慮したハイペロン混合中性子星の研究に取り組んだ。

## ${}^6\text{He}(p,p')$ 反応解析による共鳴状態 $2_2^+$ の解析

(小川翔也 (D2)、松本琢磨)

${}^6\text{He}$  の共鳴状態  $2_2^+$  は崩壊幅が広く、顕著なピークとして断面積に現れないため、その存在については未だ議論されていた。断面積のような実験データには共鳴状態・非共鳴な連続状態の寄与が混在しているため、 $2_2^+$  のような崩壊幅の広い共鳴状態はこれらの影響を考慮して解析する必要がある。

そこで、本研究では共鳴状態・非共鳴な連続状態の寄与を精密に扱うために、連続状態離散化チャンネル結合法と複素スケールリング法を用いて  ${}^6\text{He}(p, p')$  反応を解析した。この解析により、 $2_2^+$  は shoulder peak として断面積に現れることを初めて明らかにした。また、Breit-Wigner 型関数による実験データのフィッティングは非共鳴な連続状態の寄与を無視してしまうため、共鳴状態本来の共鳴エネルギーや崩壊幅を見誤る可能性があることを指摘した。

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

## ダイクォークのカイラル有効理論によるヘビーバリオンのスペクトル

(金龍熙 (M2)、池田陽一、肥山詠美子 (東北大学)、Yan-Rui Liu [山東大学]、岡真 [JAEA, RIKEN]、鈴木溪 [JAEA])

クォーク3体で構成されるバリオンのうち、チャームやボトムなどのような重い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、ダイクォークのクラスター構造を仮定することで、ダイクォーク・ヘビークォークの2体系と見なして解析できる。

本研究では、「ダイクォークのカイラル有効理論」をダイクォーク模型として用いた。ここではスカラー・擬スカラーダイクォークについて、線型  $\Sigma$  模型を用いたカイラル有効模型の観点から語られている。そして、カイラル対称性を満たすラグランジ

アの質量項に注目すると、そこからダイクォークの質量についての関係式が得られる。また、このカイラル有効理論を参考に、ベクトル・軸性ベクトルダイクォークについてのカイラル有効模型を構築し、同様にして質量公式を得た。

カイラル有効模型から与えられた質量公式と2体系計算より、シングルヘビーバリオンのエネルギースペクトルについて解析した。主に、 $\rho$ モード・ $\lambda$ モードという2種類のP波励起状態について、 $\Lambda_Q, \Xi_Q$ ヘビーバリオンは $\rho$ モードの方が $\lambda$ モードより重いこと、パリティ正の励起状態のダイクォーク模型を用いた描写はRoper Resonance状態を除いて可能であることが分かった。

この研究成果は論文にまとめられ、Physical Review Dへ投稿中である。また、修士論文としてもまとめられている。

### $\alpha\Xi N$ の3体構造と $\Xi N$ 総合作用

(李東ウク (M1)、肥山詠美子 (東北大学))

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

$\Xi N$  相互作用は現実的核力、つまり、Nijmegen hard-core model(ND)、Extended soft-core model(ESC08C)、HALQCDのポテンシャルを用いる。 $\alpha\Xi$ 相互作用は、前述の $\Xi N$  相互作用をG行列理論により有効相互作用にし、それを $\alpha$ の波動関数でfoldしたものを使う。 $\alpha N$  相互作用は、 $\alpha N$  の散乱実験を再現したものを使う。ガウス関数展開法を用いて、束縛状態の有無と束縛エネルギーを調べる。ESC08Cの場合、 $I=1, J^\pi=1^-, 2^-$ で、束縛核がグザイハイパー核が現れ、HALQCDのポテンシャルの場合 $I=0, J^\pi=1^-$ で束縛核が現れた。以降の ${}^6\text{Li}$ をターゲットにする $K^-$ 反応実験から今回計算した核の生成が期待でき、どのポテンシャルを取り入れるかに対する議論が可能になる。

## 発表論文

### 《原著論文》

Stable double-heavy tetraquarks: Spectrum and structure:

Q. Meng, E. Hiyama, A. Hosaka, M. Oka, P. Gubler, K. U. Can, T. T. Takahashi, H. S. Zong

Physics Letters, Section B **814**, 136095 (2021).

Weinberg operator contribution to the nucleon electric dipole moment in the quark model:

Nodoka Yamanaka, Emiko Hiyama

Phys. Rev. D **103**, 035023 (2021).

Near-threshold production of antihydrogen positive ion in positronium-antihydrogen collision:

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich

NEW JOURNAL OF PHYSICS **23**, 012001 (2021).

$^{19}\text{B}$  isotope as a  $^{17}\text{B}$ -n-n three-body cluster close to unitary limit:

J. Carbonell, E. Hiyama, R. Lazauskas, F. M. Marqués

Journal of Physics: Conference Series **1643**, 012120 (2020).

Resonant states of  $^9_\Lambda\text{Be}$  with alpha plus alpha plus Lambda three-body cluster model:

Qian Wu, Yasuro Funaki, Emiko Hiyama, Hongshi Zong

PHYSICAL REVIEW C **102**, 054303 (2020).

Quadruply charmed dibaryons as heavy quark symmetry partners of the *DDK* bound state:

Wu, T.-W., Liu, M.-Z., Geng, L.-S., Hiyama, E., Valderrama, M.P., Wang, W.-L.

European Physical Journal C **80**, 901 (2020).

Novel Indicator to Ascertain the Status and Trend of COVID-19 Spread: Modeling Study:

Takashi Nakano and Yoichi Ikeda

J Med Internet Res 2020; 22(11): e20144 (2020).

$d^*(2380)$  dibaryon from lattice QCD:

Shinya Gongyo, Kenji Sasaki, Takaya Miyamoto, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue and Noriyoshi Ishii  
Phys. Lett. B **811**, 135935 (2020).

Classifying the pole of an amplitude using a deep neural network:

Denny Lane B. Sombillo, Yoichi Ikeda, Toru Sato, Atsushi Hosaka  
Phys. Rev. D **102**, no. 1, 016024 (2020).

Three-body breakup of  ${}^6\text{He}$  and its halo structure:

Y.L. Sun, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Satou, J. Lee, T. Matsumoto, K. Ogata, Y. Kikuchi, N. Aoi, Y. Ichikawa, K. Ieki, M. Ishihara, T. Kobayashi, T. Motobayashi, H. Otsu, H. Sakurai, T. Shimamura, S. Shimoura, T. Shinohara, T. Sugimoto, S. Takeuchi, Y. Togano, K. Yoneda  
Physics Letters B **814**, (2021) pp.136072-1-8.

Practical method for decomposing discretized breakup cross sections into components of each channel:

Shin Watanabe, Kazuyuki Ogata, and Takuma Matsumoto  
Physical Review C **103**, (2021) pp.L03601-1-6.

Systematic study on the quark-hadron mixed phase in compact stars:

C.-J. Xia, T. Maruyama, N. Yasutake, T. Tatsumi, H. Shen, and H. Togashi  
Phys. Rev. D **102**, (2020) 023031.

Investigation of contributions of the  $2_2^+$  resonance in  ${}^6\text{He}$  via analysis of the  ${}^6\text{He}(p, p')$  reaction:

S. Ogawa, T. Matsumoto  
Phys. Rev. C **102**, 021602(R) (2020).

Spectrum of singly heavy baryons from a chiral effective theory of diquarks:

Yonghee Kim, Emiko Hiyama, Makoto Oka, and Kei Suzuki  
Phys. Rev. D **102**, 014004 (2020).

《その他の論文》

## 講演

《海外での講演》

《国内での講演》

ニューラルネットワークによる S 行列の極の分類 (I):

池田陽一, D. L. B. Sombillo, 佐藤透, 保坂淳

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

${}^6\text{He}(p, p')$  反応を用いた  ${}^6\text{He}$  における共鳴状態の解析:

小川翔也, 松本琢磨

京都大学核多体系ゼミオンラインセミナー, 2020 年 7 月 9 日, online

${}^6\text{He}(p, p')$  反応解析を通じた  ${}^6\text{He}$  の共鳴状態  $2^+$  に関する研究:

小川翔也, 松本琢磨

物理学会秋季大会 (2020 年), 2020 年 9 月 14 日, online

分解反応を用いた  ${}^6\text{He}$  共鳴状態の構造解析:

小川翔也, 松本琢磨

第 3 回九大一理研ジョイントワークショップ ～数理で繋ぐミクロとマクロ：素粒子・原子核・宇宙～, 2020 年 12 月 21 日, online

${}^6\text{He}(p, p')$  反応を通じた共鳴状態の解析:

小川翔也, 松本琢磨

RCNP 研究会「原子核における多様な共鳴現象とそれを探る反応機構」, 2021 年 1 月 18 日, online

分解反応による  ${}^6\text{He}$  共鳴状態の構造解析:

小川翔也, 松本琢磨

日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 13 日, online

Study on the  $2_2^+$  resonance in  ${}^6\text{He}$  via analysis of  ${}^6\text{He}(p, p')$  reactions:

S. Ogawa, T. Matsumoto

The 8th Asia-Pacific conference on Few-Body problems in Physics, 3 March 2021,  
Kanazawa, Japan

Microscopic equation of state for hyperon matter with  $\Lambda N - \Sigma N$  coupling:

H. Togashi

Workshop on Electro- and Photoproduction of Hypernuclei and Related Topics, December 17, 2020, online

結合チャンネル相互作用のテンソル力成分を考慮したクラスター変分法による中性子星物質状態方程式:

富樫甫、鷹野正利

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

ベクトルダイクォークのカイラル有効理論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、Yan-Rui Liu

日本物理学会秋季大会、2020 年 9 月 16 日、オンライン

ベクトルダイクォークのカイラル有効理論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、Yan-Rui Liu

SNP School 2020、2020 年 12 月 3 日、オンライン

ベクトルダイクォークのカイラル有効理論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、Yan-Rui Liu

九大-理研ジョイントワークショップ、2020 年 12 月 21 日、オンライン

ダイクォークのカイラル有効理論とバリオンのスペクトル:

金 龍熙、肥山 詠美子、岡 真、鈴木 溪、Yan-Rui Liu

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12 日、オンライン

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金, 基盤研究 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, 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 B  
格子 QCD ハドロン間相互作用によるエキゾチック・ハドロンの構造と生成の研究  
研究代表者：池田陽一

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 C  
第一原理計算と深層学習によるハドロン間相互作用の研究  
研究代表者：池田陽一

文科科学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

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)  
金 龍熙 (M2): 日本学術振興会特別研究員 DC1 採用 (2021 年 4 月 - 2024 年 3 月)

学部 4 年生卒業研究

安井 理貴、城 久喜、嶋崎 敬、吉田 匠吾 (池田陽一、富樫甫) :  
「原子核の安定性・状態方程式と中性子星の構造」

## 修士論文

金龍熙: (指導教員 池田陽一): ダイクォークのカイラル有効理論によるヘビーバリオンのスペクトル

宮本亮祐: (指導教員 池田陽一):  $nn\Lambda$  三体系における共鳴状態の研究

山本拓実: (指導教員 池田陽一):  $\Omega NN$  の三体構造の研究

## 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

中野貴志、池田陽一:

取材協力：西日本新聞

”感染終息時期予測へ新指標 物理学者が考案、出口戦略へ自治体導入も (2020年5月12日)”

<https://www.nishinippon.co.jp/item/n/607479/>

一般向け解説記事 (ネット公開)

”K 値で読み解く COVID-19 の感染状況と今後の推移”

<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/%7Enakano/note2.pdf>

# 宇宙物理理論

## 研究室構成員

山本一博 教授

菅野優美 准教授

助教

《 博士研究員 》

松村央 松井宏樹

《 大学院 博士課程 》

大村匠 酒見はる香 土肥明（理研 JRA 研究員委託） 上田和茂

《 大学院 修士課程 》

大前陸人 田嶋裕太 三木大輔 山下晃毅

《 学部 卒業研究生 》

七條友哉

《 研究生 》

多良淳一

《 訪問研究者 》

南岳 Ar Rohim 杉山祐紀（委託学生、広島大学理学研究科修士2年）

## 担当授業

一般相対性理論 (山本一博), 宇宙物理学 (山本一博), 基幹物理学 IB(山本一博), 物理学ゼミナール (山本一博), 物理学基礎演習 (菅野優美), 物理学特別研究 I (山本一博, 菅野優美), 物理学特別研究 II(山本一博, 菅野優美)

## 研究・教育目標と成果

**曲がった時空中の量子論と重力の量子性の研究 (山本一博)**

重力は量子力学に従うのか、それを確かめる方法は何か、という問題は、重力の量子論の出発点となる基本的問題であるが、これまであまり考えてこられなかった問題である。近年量子情報理論や量子科学技術の進展によって、この基本的問題に関する研究が注目されている。特に、重力が量子もつれを作れるかどうか、重力が非局所的な量子相互作用かどうかの検証となることが指摘され、重力が作る量子もつれに着目し

た研究を推進している。当研究室においてもこれまでに、学術研究員の松村氏、修士学生の三木氏と、空間的に局在した粒子間の重力相互作用による量子もつれの生成やデコヒーレンスの振る舞い、重力相互作用する光学機械振動子系に発生する量子もつれの振る舞いに関する研究を推進した。これまでの研究では、散逸などの効果を見捨てた理想的な系を想定しており、今後散逸を考慮した光学機械振動子系の現実的な理論モデルの解析を行う必要がある。また、量子もつれ以外に重力の量子性を特徴づける物理量や性質に着目した研究を推進している。また、曲がった時空（重力）がその上の量子場や量子力学系にどのような影響を与えるか研究を推進している。広島大学院生 Ar Rohim との共同研究では、一様重力場中に束縛された中性子の量子力学的問題に対して、ディラック方程式に基づいた解析を行なった。通常非相対論的量子力学に基づいた解析と比較した場合のエネルギー固有状態の変化や、境界条件の影響、バウンスによるスピン状態への変化などを理論モデルに基づいて明らかにした。また、大学院生の上田氏、杉山氏との共同研究では、加速度系を特徴づけるリンドラー領域で構成したディラック場やグラビトン場の状態とそれらのミンコフスキー真空状態との関係を、量子もつれ状態を用いた記述を与えて明らかにしてウンルー効果との関係を示した。

#### **グラビトンに関する研究 (菅野優美)**

グラビトンによるノイズとデコヒーレンスに関する研究を推進した。原子の存在がブラウン運動によって間接的に発見されたように、菅野は、早田次郎（神戸大）、徳田順生（神戸大）と共同で、重力波干渉計の鏡に対するノイズを通して、グラビトンを間接的に発見できることを示した。またグラビトンによるノイズが、実験室で作られる粒子の重ね合わせ状態を壊すことを示し、そのデコヒーレンス時間を測ることによってグラビトンを間接的に発見できることも示した。この論文は Physical Review D 誌の Editors' Suggestion に選ばれた。来年度は、このアイデアを使った具体的な実験デザインを考案し、グラビトンの間接的発見につながるモデル構築を目指す。

**光学機械振動子系における重力による量子もつれ (松村央)** 光学機械振動子系における重力による量子もつれ(量子力学特有の相関)についての研究を行った。いくつかの先行研究とは異なり、本研究では非摂動・非線形に系を取り扱うことで、厳密に光学機械振動子系の量子状態の発展を求めた。その解析を通して、重力による量子もつれ生成機構の物理的起源を解明し、その生成時間について厳密な表式を求めた。また、キャビティからの光子漏れによって生じる量子デコヒーレンス(量子性の喪失現象)を想定した解析も行い、量子もつれが十分に生成されるためのキャビティの散逸係数に対する条件を導いた。将来の展望としては、より実験的なセットアップに基づく理論的

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

#### 物質波干渉計を用いた量子もつれの検出 (松村央)

物質波干渉計を用いて、場の量子もつれを検出する問題を研究した。二つの干渉計を想定し、干渉計内の各粒子が量子場と局所的に結合するモデルを考えた。粒子間の量子もつれ生成を調べた結果、因果的に離れた粒子間に量子もつれは生成しないことがわかった。先行研究として、Unruh-DeWitt 検出器を用いた同様な問題が考察されているが、そこでは因果的に離れた検出器間に量子もつれが生成することが示されている。本研究結果は、物質波干渉計を用いたアプローチでは検証できない量子性があることを明らかにした。今後の展望としては、物質波干渉計によって検出できる電磁場や重力場の量子性について明らかにしていく。

#### 場の量子論非摂動定式化に基づく量子宇宙論 (松井宏樹)

量子論的な宇宙創生の可能性は 1980 年代後半から Hartle-Hawking, Vilenkin らによって長く研究されてきた。取り分け、Hartle-Hawking により提唱された、量子重力のユークリッド経路積分で定義される無境界波動関数と呼ばれる宇宙の波動関数の定式化は長らく量子宇宙論のパラダイムであった。近年、Picard-Lefschetz 理論を始めとする新たな場の量子論非摂動定式化に基づいた量子重力の経路積分や Hartle-Hawking の無境界仮設の研究が進展しており、幾つか新たな観点からこのテーマを研究した。一連の研究の進捗状況と成果として、Lefschetz-thimbles に沿った無境界経路積分は量子重力のシュレーディンガー方程式である Wheeler-De Wit 方程式に境界条件を課した波動関数と同一であることが示唆されていたが、この推定をより明確に証明した。さらに、この内容を一般化すると量子論的なトンネル波動関数は Picard-Lefschetz 理論を応用した新しい経路積分法で解析可能であることが分かった。この対応関係をより進めてこれまで研究されてきた場の量子論の真空トンネル遷移過程である Coleman-de Luccia (CdL) インスタントン Lefschetz-thimbles 法によって一般化しローレンツ時空におけるダイナミクスまで議論できることを証明した。今後は、現象論的に重要なヒッグス安定性問題やユークリッドワームホールなどを検討していきたいと考えている。

#### 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, 大村匠)

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。2020 年度はジェット終端領域の移動速度と加速可能な宇宙線の最高エネルギー推定に関して、W50 周辺に分布する分子雲の素となる中性水素ガスと W50 の相互作用に関する論文を投稿し受理された。また、昨年度に引き続き W50 周辺の分子雲を観測し、電波連続波観測により確認されている W50 の Chimney 構造周辺の分子雲が W50 と相関している可能性が高いことを明らかにした。今後は分子雲に関する論文の出版、また 2.0-8.0 GHz 帯の電波連続波と電離水素ガス分布との比較を行い、W50 と周辺のガスとの関係性をより詳細にしていく。

#### 系外ジェット伝搬の 2 温度磁気流体シミュレーション (町田真美, 大村匠)

系外ジェットは、銀河中心に位置する巨大ブラックホールの重力エネルギー源を駆動源に噴出する細く絞られたプラズマの噴流であり、銀河中心部から銀河間領域に渡って伝播している。ブラックホール近傍の高エネルギー粒子や強磁場を広大な銀河間空間へと輸送するジェットは、周辺環境に多大な影響を与える。そのため、ジェットは宇宙論的磁場進化や宇宙の構造形成史を考える上で欠かせない存在である。ジェット伝播問題は、これまで磁気流体 (MHD) シミュレーションを用いた研究が数多く行われてきた (e.g., Norman et al. 1982)。しかし、これまでの先行研究では、相対論的プラズマにおいて重要となり得るプラズマの 2 温度性が無視されている。そこで、本研究では MHD 方程式に加え電子と陽子それぞれのエネルギー方程式を解く 2 温度 MHD シミュレーションを世界に先駆けてジェット伝播問題に適用した。その結果、直接導出した電子温度は、1 温度近似からの単純な比例関係では求められないことを示した。しかしながら、これまでの自身の研究では、観測及び理論的に示されている衝撃波や乱流に起因する電子の非可逆的加熱現象を取り扱っていなかった。また、軸対称を仮定したため、非軸対称な不安定モードの発展を扱うことができていなかった。本年度は、ジャイロ運動論から示唆される乱流中での電子の非可逆的加熱モデル (Kawazura et al. 2018) を導入した 3 次元シミュレーションを試みた。その結果、3 次元に拡張したことによってジェット内部は乱流で満たされ、電子と陽子の温度比は乱流散逸による平衡状態に達していることがわかった。特に、乱流による電子と陽子の加熱比は磁気エネルギーに相関していることから、電子と陽子及び磁場のエネルギーはそれぞれ乱流加熱モデルを介して結びついていることを示した。本研究結果によって、陽子は放射電

子の十倍以上の熱エネルギーを持つが示され、観測される低圧状態を説明することができた。

**Unruh 効果の検証に向けた Dirac 場のリンドラー空間上の記述** (上田和茂, 山本一博)  
ホーキング放射の類似としてウンルー効果の検証は、重力と相互作用する量子系が持つ性質を解明する上で重要である。ウンルー効果は、量子場の真空の量子もつれに起因しているため、スカラー場のみならず、現実的なスピノル場の量子場の真空の量子もつれによる記述は、ウンルー効果に関わる理論予言の際に役立つ成果である。Unruh 効果の検証を議論する際には、加速度運動する物体からのシグナル(放射)を未来の領域(Kasner 座標で表される)において観測するモデルが考えられるため、異なる複数の領域における量子状態の関連を議論する場合があるが、Dirac 場のモードの対応関係についてはモード関数や演算子、量子状態の対応関係が明らかになっていなかった。Minkowski 時空上の Dirac 場の解析により、Minkowski 時空を覆う Rindler 時空と Kasner 時空のそれぞれの領域(右、左、未来、過去)におけるモード関数や演算子、量子状態の対応を明らかにし、Minkowski 真空と Rindler 状態との関係を明らかにした。準備段階で実施していた Minkowski 時空上の Dirac 場の解析の一部に修正が必要な点があり、当初の計画よりも時間を要したが、この成果について報告する論文の原稿を共著者らとともにまとめた。

#### **リンドラー空間における重力波** (杉山祐紀, 山本一博)

カスナー時空とリンドラー領域と呼ばれる非等方、非一様に曲がった時空中における重力波の古典解の導出およびその解の量子的な性質に関する研究を行った。重力波はアインシュタインにより示された時空の歪みが光速で伝播する現象であり、2015年の直接観測によってその存在が証明された。重力波は、背景時空の構造に依存しており、従来は、非等方、非一様な時空中の重力波の解は近似解や数値解析でしか得られていなかった。そこで、重力波の自由度のゲージ固定を行う際に Regge-Wheeler ゲージと呼ばれるゲージを用いることで重力波の自由度が質量 0 のスカラー場の運動方程式に従う事が分かり、カスナー時空とリンドラー領域での重力波の厳密解を導出することに成功した。さらにこの研究では、重力波を量子化する事で、重力波の量子的な性質として観測者の加速度に比例した熱分布を示す Unruh 効果という曲がった時空の場の量子論に固有の現象を重力波でも得られる事も分かった。

#### **量子もつれを用いた重力の量子性の検証** (三木大輔, 松村央, 山本一博)

重力は量子力学の枠組みで説明できていない唯一の基本相互作用である。重力と量子力学を統一した量子重力理論は提案されているが、実験的な検証が行えていないこと

が要因となり、確立には至っていない。しかし、近年の量子技術の発展を契機に、重力が量子力学に従っているかどうかを量子もつれを用いて検証するモデルが提案された。量子もつれは量子情報理論で知られる古典的には生成できない量子力学特有の相関である。提案モデルでは、2つの粒子を空間的な位置の重ね合わせ状態に用意し、重ね合わせの原理に従い重力相互作用する時、量子もつれが生成されることが示された。よって、このモデルに従い重力による量子もつれを測定することができれば、重力は量子力学に従っていることが示される。私はこのモデルを多粒子系へと一般化し、着目粒子が周囲の粒子と重力相互作用することにより、量子もつれに与える影響の評価を行った。一般に、着目系が周囲の環境と相互作用すると、デコヒーレンスと呼ばれる着目系の量子もつれが喪失していく現象が起こる。重力多体系においても、着目粒子以外の粒子が増加する時、重力相互作用によりデコヒーレンスが起こっていることを確認した。また、N粒子系において、デコヒーレンスが起こるまでの時間スケールの評価を行った。さらに、2つの系間の量子もつれが強まると他の系との量子もつれが小さくなるモノガミー性はこのモデルでも現れることを確認した。しかし、提案されているメゾスケール粒子間の重力相互作用による量子もつれは小さいため、量子もつれを実験で測定可能な検証モデルが必要である。今後は、巨視的な重ね合わせ状態の実現が期待される光学振動子系について解析を進め、実験に適した検証モデルの理論的な構築を行う。

### 大スケール非一様性を持つ宇宙での構造形成について (山下晃毅, 山本一博)

現在、Ia型超新星や宇宙マイクロ波(CMB)の観測によって、私達は加速膨張する宇宙に住んでいることが確認されている。現在の宇宙を説明するため、一般相対性理論を修正するモデルが考えられており、宇宙膨張はダークエネルギーと呼ばれる何らかのエキゾチックなエネルギーによって駆動されていることが分かっている。膨張加速を説明する最も一般的なモデルである宇宙定数モデルは、広範な観測の結果と矛盾しておらず、現在でも有力なものと考えられているが、未解決問題も含んでいる。標準的な宇宙論的モデルは大規模な等方性と均質性を前提としているが、WMAPデータの解析によると、宇宙には少量の異方性が存在する可能性があることがわかっている。CMB実験やLSS観測でも、同様に大域的・統計的等方性の破れを支持するものがあるため、近年は加速する宇宙の様々な側面を研究するために、多数の異方性を持つ宇宙論モデルが構築されている。今回はそのような異方性を持つ宇宙論モデルの中でも、Supercurvature mode dark energy modelという大規模非一様性を持つダークエネルギーのモデルを単純化したもの考えた。このモデルは、現在のホライズンスケールより十分大きなスケール(supercurvature scale)で $O(1)$ の揺らぎを持つスカラー場のポテンシャルエネルギーが加速膨張を説明するモデルであり、大スケールでの非一様性を持つので宇宙原理を破るモデルである。この計算では簡単のため、このモデルでの空間曲率を0としたSuperhorizon

mode dark energy model を考え、宇宙論的摂動論の枠組みを応用して理論計算をした後にオーダー評価を行った。その結果、Superhorizon mode が及ぼす影響は、一様な宇宙での密度揺らぎである Adiabatic mode に対して  $O(1)$  程度の大きさを持つ可能性があることが分かった。今後は数値計算を用いて厳密解を求め、解析解との差を確かめると共になぜ  $O(1)$  程度の大きな影響が表れるのか物理的な理解を得なければならない。

### 銀河円盤の電波帯擬似観測 (町田真美、田嶋裕太)

我々の銀河である天の川銀河を含む渦状銀河は、数  $\mu\text{G}$  の磁場を持つことが知られている。磁場は銀河の運動や構造進化、星形成などに影響する重要な物理量であるが、銀河における磁場の起源や維持・増幅機構はおろか、銀河磁場の大局的構造ですら未だ明らかとなっていない。銀河磁場の情報は電波連続波の偏波解析によって得られる。特に近年では電波干渉計の発達により、弱い磁場の情報を得られるメートル波帯での高解像度観測が行われており、今後さらに増加することが予想される。しかし、観測値は視線方向の積分量であるため直接 3 次元の磁場構造を得ることは難しい。そこで、今後の高解像度低周波観測に備え、偏波解消効果を取り入れた擬似観測を行うことで観測量と物理量の関係を明らかにし、銀河の磁場構造解明を目指す。本研究では、Machida et al. (2013) の銀河ガス円盤の磁気流体 (MHD) 数値実験結果を用いて、偏波の輻射輸送方程式を解き観測量を導出した。その際、磁場の分散から解像度以下の乱流磁場を仮定し偏波解消モデルを用いて乱流磁場による偏波解消を取り入れた。その結果、擬似観測を行った結果、メートル波帯では偏波解消効果により大幅に偏波率が低下し、偏波強度の強い位置の変化も見られた。また、高い周波数帯では渦状に磁場の向きが揃っているのが見られたが、メートル波では強いファラデー回転効果により偏波角の向きがランダムになっているのが見られた。さらに、擬似観測結果と MHD 数値実験結果の 3 次元磁場分布の比較によって、高い周波数で見られた渦状に揃った磁場は実際にはつながっておらず、異なる磁力線が重なって渦状に見えていることが分かった。またメートル波帯での偏波放射は高周波と異なる位置の磁場構造を反映していることを示した。メートル波帯では銀河円盤内部から放射は完全に偏波解消してしまい、円盤部より手前側の磁場構造を反映している。これらの結果は、今後の観測結果を解釈し、より現実的な銀河磁場モデル作成に役立つ。

### 介在銀河による遠方電波源の偏波特性への寄与 (町田真美、大前陸人)

電波銀河やクェーサーの多くの視線上には暗い銀河が重なっていることが可視光の吸収線観測で知られており、これを介在銀河と呼ぶ。背景の天体が放つ偏波は、介在銀河のファラデー回転量度 (RM) によってファラデー回転し、またビーム内の RM 構造によって一部が解消されていることが報告されている。介在銀河による偏波解消の効果

は、電波シンクロトロン放射の観測では難しい銀河磁場の宇宙論的進化を探る将来の有力な方法として期待される。そこで、将来の観測データと比較して銀河磁場の宇宙論的進化を明らかにすることを考え、銀河のモデルを構築し、系外偏波源の疑似観測シミュレーションを行った。本研究では、特に大局磁場の効果を理解するために、まず簡単なリング磁場だけを持つ銀河のモデルを用いて、介在銀河の赤方偏移ごとに見込み角や通過領域などをパラメータとしたモンテカルロシミュレーションを行い、統計的性質を探った。その結果、空間分解能以下のRM構造をファラデーモグラフィという手法によって分解しうることを明らかにした。また、観測されるRMの標準偏差に赤方偏移依存性が見られた。これは介在銀河の赤方偏移によるファラデー回転の程度の違いと背景放射の通過領域による変化だと考えられる。

## 発表論文

《 原著論文 》

S. Kanno, J. Soda, J. Tokuda, Noise and decoherence induced by gravitons, Phys. Rev. D 103 044017 (2021)

A. Matsumura, K. Yamamoto, Gravity-induced entanglement in optomechanical systems, Phys. Rev. D 102, 106021 (2020)

H. Matsui, T. Terada, Swampland Constraints on No-Boundary Quantum Cosmology, Journal of High Energy Physics 2020, Article number: 162 (2020)

H. Matsui, Lorentzian path integral for quantum tunneling and WKB approximation for wave-function, arXiv:2102.09767

Sakemi H., Omae R., Ohmura T., Machida M., 2021, Energy estimation of high energy particles associated with the SS433/W50 system through radio observation at 1.4 GHz, arXiv:2103.05578

T. Ohmura, K. Ono, H. Sakemi, Y. Tashima, R. Omae, and M. Machida, Evidence of an interaction between jets and intra-cluster magnetic layer, DOI:10.21203/rs.3.rs-81320/v1, Accepted for publication in Nature

E. Greco, M. Miceli, S. Orlando, B. Olmi, F. Bocchino, S. Nagataki, M. Ono, A. Dohi, G. Peres, Indication of a Pulsar Wind Nebula in the hard X-ray emission from SN 1987, *Astrophysical Journal Letter* 948 (2021) 45

H. Liu, A. Dohi, M. Hashimoto, Y. Matsuo, G. Lu, T. Noda, Quiescent luminosities of accreting neutron stars with different equation of states, *Physical Review D* 103 (2021) 063009

A. Dohi, R. Kase, R. Kimura, K. Yamamoto, M. Hashimoto, Neutron star cooling in modified gravity theories, arXiv: 2003.12571

N. Oshita, K. Ueda, M. Yamaguchi, Vacuum decays around spinning black holes, *Journal of High Energy Physics* volume 2020, Article number: 15 (2020)

Y. Sugiyama, K. Yamamoto, T. Kobayashi Gravitational waves in Kasner spacetimes and Rindler wedges in Regge-Wheeler gauge: Formulation of Unruh effect, *Phys. Rev. D* 103, 083503 (2021)

D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto, Entanglement and decoherence of massive particles due to gravity, *Phys. Rev. D* 103, 026017 (2021)

A. Matsumura, Field-induced entanglement in spatially superposed objects, arXiv:2102.10792

#### 《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 》

Gravity-induced entanglement in optomechanical systems, 松村央央, Relativistic Quantum Information (RQI) Online, 5th Feb. 2021

Entanglement and decoherence of massive particles due to gravity, D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto, Relativistic Quantum Information (RQI) Online, 4th Feb. 2021

Numerical Modeling of a Clocked Burster GS1826-24 considering the Interior Physics of Accreting Neutron Stars, A. Dohi, Seminar, Xinjiang University, Urumqi, China, July 8, 2020 (Online, invited by Dr. Helei Liu)

### 《 国内での講演 》

ブラウン運動とグラビトン, 菅野優美, 第3回九大一理研ワークショップ, 数理で繋ぐミクロとマクロ: 素粒子-原子核-宇宙, オンライン, 2020年12月21日

Noise and decoherence induced by gravitons (INVITED), S. Kanno, J. Soda, J. Tokuda, Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory, YITP, Kyoto, JAPAN (ONLINE) Mar. 1-5, 2021

Gravity-induced entanglement in optomechanical systems, 松村央, The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, オンライン, 2020年11月15日

Gravity-induced entanglement in optomechanical system, 松村央, 第3回九大一理研ワークショップ, 数理で繋ぐミクロとマクロ: 素粒子-原子核-宇宙, オンライン, 2020年12月22日

光学振動子系における重力による量子もつれ, 松村央, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2020年9月16日

Quantum Tunneling with Lorentzian Path Integral and Wave-function, 松井宏樹, 第3回九大一理研ワークショップ, 数理で繋ぐミクロとマクロ: 素粒子-原子核-宇宙, オンライン, 2020年12月22日

電波連続波観測に基づく星雲 W50 の経年変化解析, 酒見はる香, 町田真美, 大前陸人, 大村匠, 宇宙電波懇談会シンポジウム 2020 年度:「極限性能で切り開く電波天文学」, オンライン開催, 2020 年 12 月 21 日 - 12 月 22 日, 口頭発表

電波観測に基づく SS433 ジェットによる加速宇宙線のエネルギー推定, 酒見はる香, 大前陸人, 大村匠, 町田真美, ブラックホール降着流ミニ研究報告会, オンライン開催, 2021 年 3 月 1 日 - 3 月 2 日

SS433 ジェット先端領域における宇宙線粒子加速の可能性, 酒見はる香, 大前陸人, 大村匠, 町田真美, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 日 - 3 月 19 日

W50/SS433 の構造形成に関する磁気流体計算 IV, 大村匠, 酒見はる香, 田嶋裕太, 大前陸人, 町田真美, オンライン開催, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16 日

CANS+による AGN ジェット伝播の高空間分解能 MHD 数値実験, 大村匠, 町田真美, オンライン開催, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16 日

Simulations of two-temperature jets in galaxy cluster, 大村匠, 町田真美, 輻射磁気流体計算に基づく活動銀河中心核状態遷移過程の解明, オンライン開催, 2021 年 3 月 2 日

Two-temperature MHD simulations of extragalactic Jets, Takumi Ohmura, Mami Machida, Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era, オンライン開催

AGN ジェットの 3 次元二温度磁気流体シミュレーション, 大村匠, 町田真美, 第 33 回理論懇談会シンポジウム, 2020 年 12 月 23 日

磁気流体数値実験による AGN ジェットの電子加熱領域の調査, 大村匠, 町田真美, 日本天文学会 2021 年秋季年会, オンライン開催, 2020 年 9 月 5 日

The role of the nuclear equation of state on Type-I X-ray burst models, 土肥明, 西村信哉, 橋本正章, 野田常雄, 日本天文学会 2021 年春季大会, 東京工業大学, 2021 年 3 月 (オンライン)

パイオン凝縮を考慮した中性子星の冷却とその状態方程式依存性, 土肥明、Helei Liu、野田常雄、橋本正章, 日本物理学会第 76 回年次大会、東京大学、2021 年 3 月 (オンライン)

EOS dependence of Light Curves in X-ray Burst, 土肥明、西村信哉、橋本正章、野田常雄, 第 33 回理論懇シンポジウム、2020 年 12 月 (オンライン)

パイオンを含む EOS における中性子星の熱的進化, 土肥明、Helei Liu、野田常雄、橋本正章, 第 126 回物理学会九州支部例会、2020 年 12 月 (オンライン)

EOS dependence of Final Products in H/He mixed X-ray burst, 土肥明、西村信哉、橋本正章, r プロセス 2020 「星の錬金術から銀河考古学へ」、国立天文台、2020 年 10 月 (オンライン)

4次元リンドラー時空とカスナー時空におけるディラック場の真空の量子もつれ, 上田和茂、山本一博、樋口淳、南岳、Ar Rohim, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 14 日

カスナー時空とリンドラー領域における重力波による Unruh 効果, 杉山祐紀, 山本一博, 小林努, 日本物理学会春期大会, オンライン, 2021 年 3 月 15 日

Gravitational waves in Kasner spacetimes and Rindler wedges in Regge-Wheeler gauge: Unruh effect, 杉山祐紀, 山本一博, 小林努, 第 3 回九大一理研ワークショップ, 数理で繋ぐミクロとマクロ: 素粒子-原子核-宇宙, オンライン, 2020 年 12 月 21 日

リンドラー時空とカスナー時空の重力波の Unruh 効果, 杉山祐紀, 山本一博, 小林努, 日本物理学会九州支部例会, オンライン, 2020 年 12 月 5 日

リンドラー時空とカスナー時空の重力波の Unruh 効果, 杉山祐紀, 山本一博, 小林努, Setouchi Summer Institute2020, オンライン, 2020 年 9 月 10 日

介在銀河による偏波解消の数値シミュレーション: 大前陸人、赤堀卓也、町田真美, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン, 2020 年 3 月 17 日

重力による量子もつれの生成, 三木大輔、第 50 回天文・天体物理若手夏の学校、オンライン、2020 年 8 月 25 日

Entanglement and decoherence of massive particles due to gravity, D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto, online JGRG workshop, 2020 年 11 月 25 日

重力による粒子間の量子もつれとデコヒーレンス：三木大輔、松村央、山本一博、第 126 回日本物理学会九州支部例会、オンライン、2020 年 12 月 5 日

Entanglement and decoherence in quantum gravitating system：三木大輔、松村央、山本一博、第 3 回九大一理研ワークショップ、数理で繋ぐミクロとマクロ：素粒子-原子核-宇宙、オンライン、2020 年 12 月 21 日

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金, 基盤研究 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, 基盤研究 C (一般)

原始重力波の量子性で探る宇宙の起源

研究代表者：菅野優美

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

## 他大学での研究と教育

菅野優美：名古屋大学 QG seminar において、Brownian motion and gravitons と題す

るオンラインセミナーを行った。

菅野優美：第3回 女性科学者サミット@阪大豊中において、世界を巡って考えた宇宙（招待講演）をオンライン講演を行った。

松村央：光学機械振動子系における重力による量子もつれの研究について、東京大学安東研究室においてセミナーを行った。

松村央：光学機械振動子系における重力による量子もつれの研究について、東京大学駒場素粒子論研究室でのセミナーを行った。

#### 学部4年生卒業研究

七條友哉：(指導教員、山本一博) メゾスコピックスケールにおける重力の量子性への理解

#### 修士論文

大前陸人：(指導教員、町田真美、山本一博) 遠方電波源の偏波特性解析と介在銀河の寄与

田嶋裕太：(指導教員、町田真美、山本一博) 偏波解消効果を取り入れた渦状銀河の電波帯疑似観測

#### 博士論文

酒見はる香：(指導教員、町田真美、山本一博) Energy estimation of cosmic-ray particles at the jet terminal region of microquasar SS433 by radio observation (電波観測による SS433 ジェット先端領域の宇宙線粒子エネルギー推定)

大村匠：(指導教員、町田真美、山本一博) Two-Temperature Magnetohydrodynamics Simulations of Extra-Galactic Jets (系外ジェット伝搬の2温度磁気流体シミュレーション)

#### 学外での学会活動

## その他の活動と成果

菅野優美：「量子と重力」に関する研究会開催、9月29、30日、西新プラザ（福岡）

菅野優美：「量子と重力」に関する研究会開催、10月31日、西新プラザ（福岡）

(観測提案)

GBT 2021A 観測 (ID: GBT21A-188) 32.75時間 Continuum Observation of Radio Nebula W50

(その他執筆)

(受賞)

菅野優美：第8回湯浅年子賞（銀賞）、宇宙論研究の新領域の開拓

# 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 博士課程 》

古賀一成

《 大学院 修士課程 》

谷脇俊介      大久保勇利      尹強      塚原壮平

《 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)、課題協学科目(原田恒司、大河内豊)、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)、大学院基幹教育 テクニカルプレゼンテーション(大河内豊)、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)、共創プロジェクト(田尾周一郎)

## 研究・教育目標と成果

くりこみ群によって改善された有効ポテンシャルの計算における有効場理論の応用(原田恒司、尹強)

Manohar と Nardoni によって提案された、複数個のスケールが存在する理論におけるくりこみ群によって改善された有効ポテンシャルの計算において有効場を用いる方法について検討し、この方法を有限温度系に応用することを考えた。

超弦理論における触媒効果を用いた 4次元時空の構成(大河内豊、古賀一成、塚原壮平)  
近年、超弦理論における真空構造に対する見方が大きく変わってきている。これまで

の試みから4次元ドジッター時空の構成が非常にこんなであることが経験的にわかっている。その経験からある種の仮説がたてられ、それに基づいた宇宙像の構築が行われている。我々はその流れにより提案された5次元時空中に生じるバブル宇宙に着目した。特に5次元時空の周りに何か物質が広がっているような時空を考え、その物質場による触媒効果により、生じるバブル宇宙について性質を調べた。特に5次元宇宙にクインテッセンス場があると、それ寄与がバブル時空上では4次元のクインテッセンスと解釈できることを示し、それらに基づく4次元宇宙のシナリオを構築した。

#### CP 対称性を用いたカイラルゲージ理論の真空構造の研究 (大河内豊、谷脇俊輔)

自然界を記述する標準模型や大統一理論のいくつかの候補は、カイラルなゲージ理論であることが知られている。カイラルなゲージ理論の相構造を詳しく知ることは、こうした理論に新たな知見を与えると期待されている。一方で、ゲージ理論の非摂動的振る舞いには、閉じ込めを代表として非常に興味深いものが知られている。こうした非摂動的な振る舞いに関する知見をカイラルな理論で調べていくことも大変興味深い。我々は先行研究で調べられたフェルミオンを  $N_f$  個含む  $SU(6)$  カイラルゲージ理論に摂動を加え、主に  $CP$  対称性の観点から低エネルギーダイナミクスを調べた。その結果、 $\theta$  変数がちょうど  $\pi$  のときに、 $CP$  対称性を自発的に破るような低エネルギー物理学が望ましいことがわかった。また、QCD のカイラルラグランジアンのような有効理論も導くことができた。

#### 余剰次元ゲージ場の与える真空エネルギーによるハッブル定数の不一致問題の解決 (小島健太郎、大久保勇利)

近年の天文学的・宇宙論的観測の進展により、宇宙膨張の速度を記述するハッブル定数について、複数の観測結果から得られる値の間に、深刻な不一致が生じることが明らかになった。この不一致は、宇宙初期から現在までの宇宙の進化を記述する標準的な宇宙モデルである  $\Lambda$ CDM モデルを超える物理の存在を示唆している。我々は、コンパクトな余剰次元空間に伴うゲージ場が与える真空エネルギーへの寄与を考慮すると、ハッブル定数の不一致が解消される可能性を指摘した。また、 $U(1)$  ゲージ対称性を持つダークセクターによってハッブル定数の不一致の解消が実現する場合に、余剰次元のサイズやダークセクターの物質場の質量などの理論のパラメータにどのような制限が与えられるかを明らかにした。

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

コンパクトな余剰次元として  $T^2/Z_3$  オービフォールドを持つ、高次元時空上の大統一理

論の性質を調べた。このモデルでは、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、6次元およびオービフォールド固定点上に局在するアノマリーの詳細を検討し、アノマリー相殺条件を満たす物質場の組みが、SU(5) から標準理論のゲージ群への対称性の自発的な破れを生じさせることを確認した。また、論文の作成を進めた。

## 発表論文

### 《原著論文》

電磁気学における起電力, 原田恒司,  
基幹教育紀要 第7巻, (2021,03) pp.19-29

“Catalytic Creation of Bubble Universe Induced by Quintessence in Five Dimensions ,  
Issei Koga(Kyushu U.), Yutaka Ookouchi(Kyushu U.),  
e-Print: arXiv:2011.07437 [hep-th]

### 《Proceedings》

### 《その他の論文》

学士課程における研究体験の教育的意義を再考する  
田中 岳, 田尾 周一郎, 宮浦 崇, 新谷 恭明,  
大学教育学会誌, 42, 2, 98-102, 2020.12.

## 著書

原田恒司, 小島健太郎

「ライブラリ新物理学基礎テキスト レクチャー 物理学の学び方 -高校物理から大学の物理学へ-」サイエンス社 (2020,11)

## 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》

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

大河内豊、古賀一成

KEK theory group online seminar, KEK, 2020年6月9日

「ストリングクラウドによるヒッグス真空の不安定性」

古賀一成、黒柳幸子、大河内豊

2020年日本物理学会秋季大会、口頭発表、2020年9月15日

「Phases of SU(6) chiral gauge theories via CP and generalized global symmetries」

谷脇俊輔、大河内豊

YITP Workshop Strings and Fields 2020, 京都大学基礎物理学研究所 2020年11月16日

「クインテッセンスの触媒効果による5次元真空崩壊でのバブル宇宙の実現」

古賀一成、大河内豊

素粒子現象論研究会 大阪市立大学、口頭発表、2020年11月28日

「CP対称性と一般化された大域的対称性を用いたSU(6)カイラルゲージ理論の相構造の解析」

谷脇俊輔、大河内豊

日本物理学会 九州支部例会、2020年12月5日

「クインテッセンス時空における真空崩壊とBHの触媒効果」

古賀一成、大河内豊

日本物理学会 九州支部例会、2020年12月5日

「Catalytic Creation of Bubble Universe Induced by Quintessence in Five Dimensions」

古賀一成、大河内豊

KEK Theory workshop 2020、口頭発表 KEK、2020年12月16日

「クインテッセンスの触媒効果による5次元真空崩壊でのバブル宇宙の実現」

古賀一成、大河内豊

日本物理学会 第76年次大会、口頭発表、2020年3月15日

「CP対称性と一般化された大域的対称性を用いたSU(6)カイラルゲージ理論の相構造の解析」

谷脇俊輔、大河内豊

日本物理学会 第76年次大会、口頭発表、2020年3月14日

「余剰次元ゲージ場の力学によるハッブル定数不一致問題の解決」

大久保勇利、小島健太郎

日本物理学会第76回年次大会、口頭発表、2021年3月

「高次元ゲージ理論に基づくクインテッセンスと宇宙初期のダークエネルギー」

大久保勇利、小島健太郎

日本物理学会2020年秋季大会、2020年9月

「入門レベルの物理学のグループ学習における説明役と聞き役の分担から見る学習者間の相互作用」

小島健太郎、原田恒司

日本物理学会2020年秋季大会、2020年9月

「位相に注目した定式化を用いた音響ドップラー効果の統一的な説明法」

小島健太郎、原田恒司

日本物理学会第76回年次大会、2021年3月

「学士課程における研究体験の教育的意義を再考する」

田中岳、田尾周一郎、宮浦崇、新谷恭明

大学教育学会 第42回大会、口頭発表、2020年6月7日

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 C(一般)

反転・相互作用型授業における熟達者型問題解決教材の開発と効果の検証

研究代表者：原田恒司

科学研究費補助金、基盤 C(一般)

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 C(一般)

真空間遷移における触媒効果による宇宙項問題の解決

研究代表者：大河内豊

科学研究費補助金、基盤 C(一般)

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

研究代表者：小島健太郎

科学研究費補助金、基盤 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

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

修士論文

谷脇俊介 (指導教員：大河内豊)：CP 対称性と一般化された大域的対称性を用いた SU(6) カイラルゲージ理論の相構造の研究

大久保勇利 (指導教員: 小島健太郎):  $\Lambda$ CDM モデルにおけるハッブル定数の不一致問題と 5 次元ゲージ理論による Early Dark Energy の実現

## 学外での学会活動

大河内豊:

2020 年度 日本物理学九州支部委員

2020 年日本物理学会 九州支部例会 12 月 5 日 世話人

2020 年九州地区大学教育研究会委員

小島健太郎:

日本物理教育学会九州支部, 理事

日本物理教育学会九州支部研究大会, 実行委員

## 受託研究・民間との共同研究

## その他の活動と成果

小島健太郎, 田尾周一郎:

令和 2 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:

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を中心としたオンライン反転授業」の講師担当 (2021.03)

学習支援システム (M2B) 講習会 (オンライン開催) ◇初級編・中・上級編◇の講師担当 (2021.03)

M2B 学習支援システム講習会中級編の講師担当 (2020.09)

オンライン授業講習会 第 2 弾「Moodle 入門編コース」の講師担当 (2020.04)

# 実験核物理

## 研究室構成員

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

### 《 博士研究員 》

鷺山広平 (特任助教, RCSHE)      田中聖臣 (日本学術振興会特別研究員 (PD))

### 《 大学院 博士課程 》

庭瀬暁隆

### 《 大学院 修士課程 》

長田茉莉      久保大志      坂木重仁      内藤夏樹  
浜野友哉      東聖人      村上郁斗      足立智輝  
甲斐民人      河本彩帆      後藤滉一      富松太郎  
中島優人      永田優斗      松尾仁      武藤大河  
米村千恵子

### 《 学部 卒業研究生 》

安藤蒼太      石橋優一      井元悠介      岸本侃己  
小谷基樹      篠原悠介      杉山晃一      松永壮太郎  
山下涉      横田望海

## 担当授業

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

## 研究・教育目標と成果

**新元素の合成研究**（森田浩介、坂口聡志、郷慎太郎、田中聖臣、長江大輔、浅井雅人、庭瀬暁隆、内藤夏樹）

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

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

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

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

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

### 低エネルギー重イオンに対するシリコン検出器の波高欠損およびエネルギー分解能の研究（長田茉莉、坂口聡志、浅井雅人、森田浩介）

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を使って、12 MeV から 66 MeV に加速した  $^{12}\text{C}$ 、 $^{28}\text{Si}$  の軽イオンおよび  $^{74}\text{Ge}$ 、 $^{127}\text{I}$  の重イオンをシリコン検出器に照射し、シリコン検出器のエネルギー分解能と波高欠損を測定した。九州大学ではこれまで重イオンを加速・実験した前例がほとんどなかったため、本研究では重イオンビームの開発から行った。重イオンビームをイオン源から引き出し、タンデム加速器で加速後、実験室まで輸送できることを実証した。また、本研究では、エネルギーを精度よく測定する必要があるため、線源の表面保護膜やシリコン検出器の不感層の厚さを精度良く測定することで、シリコン検出器の高精度なエネルギー較正法を確立した。上記の実験から、波高欠損量はイオンの原子番号およびエネルギーに伴って単調増加するという結果が得られた。さらに、波高欠損量の経験則である Kaufman の式に不十分な点を見出し、式の補正を行った。得られたエネルギー分解能  $\Delta E$  は波高欠損量 PHD と  $\Delta E \propto \text{PHD}^{0.7}$  という相関を持つことが分かった。これは、重イオンに対するシリコン検出器のエネルギー分解能の低下が波高欠損によるものであることを意味している。これらの結果を用いて、JAEA にて測定した  $^{258}\text{Fm}$  の核分裂片の質量分布を解析し、核分裂片の真の質量分布を導出し、 $^{258}\text{Fm}$  の核分裂メカニズムに関する物理的考察を行なった。

### 中性子過剰フェルミウム領域核の核分裂機構の研究（東聖人、長田茉莉、浅井雅人）

超重核の安定性や核反応生成率は、核分裂と極めて密接に関係する。核分裂は、1つの原子核が2つに分裂する極めてダイナミックな現象であるが、その分裂過程では原子核の微視的構造の影響を強く受ける、極めて複雑な物理現象である。ウランなどのアクチノイド核の核分裂は、2つの核分裂片の質量が非対称な非対称核分裂を示す。ところが中性子過剰フェルミウム（Fm）領域核では、 $^{256}\text{Fm}$  までは典型的な非対称核分裂を示すが、 $^{258}\text{Fm}$  で突然極めて分布幅の狭い対称核分裂に変化する。1980年代にこの現象が発見されて以降、多くの理論的研究が行われ、質量分布を再現する試みがなされてきたが、これらの原子核を合成することが極めて困難なことから今日まで追加の実験はまったく行われておらず、最新の理論計算と比較できるより詳細な実験データの取得が望まれていた。本研究では、中性子過剰 Fm 領域核を  $^{248}\text{Cm}$  標的あるいは半減期 276 日の  $^{254}\text{Es}$  標的を用いた多核子移行反応により合成し、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 ISOL を用いて質量分離し、自発核分裂片の運動エネルギーと質量分布を測定した。 $^{256}\text{Fm}$ 、 $^{258}\text{Fm}$ 、 $^{259}\text{Lr}$  の3核種について、質量分布と全運動エネルギー（TKE）分布の相関を精度良く測定することに成功し、過去の実験では明らかにできなかった対称核分裂と非対称核分裂の共存や新しいタイプ

の対称核分裂の存在を示す結果を得ることができた。また、質量-TKEの2次元分布の解析に機械学習的手法を適用し、2次元分布の可視化や多成分解析に有用であることを示した。今後は、対称-非対称核分裂の共存・競合が観測される他の核種についても精度の良い測定を進め、またそれらの励起エネルギー依存性も測定することで、この領域の核分裂機構の詳細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原子番号  $Z$  と質量数  $A$  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  $\alpha$ -TOF 検出器である。 $\alpha$ -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、昨年度末に取得した  $^{257}\text{Db}$  の直接質量測定実験の結果の解析を行った。 $\alpha$ -TOF を搭載した MRTOF によって測定した確度の高い質量測定実験により、105 番元素  $^{257}\text{Db}$  の質量を 1 ppm の精度で決定した。将来の更に重い元素の直接質量測定や、MRTOF と  $\alpha$ -TOF による超重核の異性体の分離を目指し、装置の改良を進めている。

#### **重アクチノイド核の核分光研究（郷慎太郎、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、陽子魔法数 114、中性子魔法数 184 の二重閉殻構造による強い安定性のために、これまで発見されているごく短寿命（秒・分単位）の超重核と比べて、圧倒的に長い寿命（年単位）をもつ超重核が存在できる領域が予言されている。この人類未踏の原子核領域を「安定の島」と呼ぶ。しかし、従来の原子核反応ではこれらの原子核は合成することはできず、合成に至る道筋も明らかになっていない。「安定の島」の原子核に期待される安定性を定量化するための原子核の基礎データが必要とされている。重アクチノイド核の励起状態に「安定の島」の閉殻構造を成す軌道が大きく関与するため、本研究室では重アクチノイド核のアイソマー核分光実験研究を推進している。本年度は実験セットアップの検討と準備を行なった。次年度に加速器実験を実施予定である。

#### **中性子過剰 Ni 同位体の質量測定（永田優斗、長江大輔）**

金やウランのような重元素の合成過程を説明する仮説の一つとして、速い中性子捕獲

反応がある。この仮説では非常に中性子が過剰な領域を経由して、重元素が合成されたと考えられている。この重元素合成過程の解明を目的として、中性子過剰 Ni 同位体の質量測定プロジェクトが進行中である。質量測定には重イオン蓄積リング「稀少 RI リング」を用いる。稀少 RI リングは短寿命かつ生成確率が非常に小さい原子核でも精密な測定が可能という特徴を持つ。本年度は稀少 RI リングの電磁石、検出器の整備を進めた。次年度初旬に、 $^{74,76}\text{Ni}$  の質量測定を実施する予定である。

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

一般的に寿命が極めて短く不安定である超重元素核の中で、陽子数 114~120 付近、中性子数 184 付近の中性子過剰な領域に位置する超重元素核は、長い寿命をもって安定に存在すると予言されており、この領域は「安定の島」と呼ばれている。我々はこの「安定の島」領域の原子核をどのように合成するかを探るために、低エネルギー中性子過剰核二次ビームを用いた融合反応研究を計画している。低エネルギー二次ビームの像は大きく広がっているため、大口径かつ低物質量の検出器が必要であり、我々は薄膜と有感領域  $\phi 75$  mm 大口径 MCP（マイクロチャンネルプレート）を用いた二次ビームの速度測定用の ToF（飛行時間）検出器の開発を行っている。開発の前段階として、令和元年度に開発した有感領域  $\phi 14.5$  mm の小型 MCP-ToF 検出器を改良し、それを用いて九州大学タンデム加速器施設にて  $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$ 、 $^{28}\text{Si}$ 、p ビームを照射して性能評価を行った。得られた時間分解能は 40 ps 程度、検出効率は  $^{28}\text{Si}$  の時には 95%以上であった。また、本検出器の検出効率、時間分解能の核種及び印加電圧に対する依存性を系統的に分析した。

#### **位置敏感型 MCP-ToF 検出器の開発**（長江大輔）

飛行する粒子の位置と時間情報を準非破壊的に取得できる、薄膜と MCP を用いた位置敏感型飛行時間（MCP-ToF）検出器の開発を進めている。放射線医学研究所の加速器施設 HIMAC において性能試験を行い、位置分解能、時間分解能を評価した。得られた位置分解能は 2 mm 程度であり、目標の 1 mm 以下へ向けての改善の必要性が分かった。時間分解能は 150 ps 程度で、同様に改善が必要と判明した。

#### **原子核密度汎関数法による自発核分裂反応の微視的記述**（鷲山広平）

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、その観点から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盛んである。先行研究による自発核分裂の記述では、微視的手法による集団慣性質量の評価が数値計算上困難なために、その模型の不十分さは認識されながらも簡略化された模型によ

る評価手法が広く用いられてきた。本研究では、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 (QRPA) を用いて正しく行なった。数値計算上の困難さを最近開発された有限振幅法を用いて回避し、簡略化された模型で無視され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た。 $^{240}\text{Pu}$  及び  $^{256}\text{Fm}$  の自発核分裂経路上に沿って得られた集団慣性質量は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~数倍程度の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。

### 大強度不安定核ビーム実験のためのシステム開発 (田中聖臣)

不安定原子核では自然界に存在する安定原子核に比べて多種多様な核構造が表れ、それらが核反応ダイナミクスに大きく寄与しうる。この観点から、これまで安定原子核を用いて行われてきた融合反応を不安定核ビームを用いて適用すべく測定システムの開発を行なった。測定システムに求められる点は、 $10^5\sim 10^6$  個/秒のレートで供給される速度の揃っていない低速不安定核ビームに対して1粒子ごとに高精度で速度識別を行い、かつ、データを高効率で取得することである。まず低速ビーム用の速度識別検出器として静電ミラー型マイクロチャンネルプレート検出器を試作し、九州大学加速器・ビーム応用科学センターで供給される様々な重イオンビームを用いて性能評価テストを行なった。検出器の構造・運用パラメーターを最適化することで、要求性能を上回る時間分解能 (50 ps 以下) を達成した。また、高レートデータを高効率で処理するデータ取得系を導入した。従来では測定モジュール10台程度を直列読み出し処理を行っていたが、モジュール単位で並列読み出し処理を行うシステム (MPV-VME) を用いることで1イベントあたりの処理時間の改善を図った。本システムを放射線医学総合研究所 HIMAC 施設で行われた実験に導入して従来型のデータ処理系と比較を行った結果、読み出しデータの健全性を確認するとともに、1イベントあたりの処理時間を150  $\mu\text{s}$  から15  $\mu\text{s}$  まで向上することに成功した。また、実際に $10^5$  個/秒レートの不安定核ビームのデータを40%の効率で取得できることができた (従来型では6%)。

### 反跳陽子検出器・偏極度計の開発・較正 (坂木重仁、若狭智嗣)

$(p, 2p)$  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) に向けて陽子検出器・偏極度計 (2nd-FPP) の開発を行なっている。2nd-FPPは複数のプラスチックシンチレータ群で構成されており、各シンチレータは入射陽子の偏極分析の散乱体としての役割と、散乱陽子のエネルギーを検出し飛跡を再構成する役割を併せ持っている。入射陽子の偏極度は、シンチレータ内の炭素との弾性散乱イベントの左右非対称度か

ら導出可能である。実験で測定できる非対称度から偏極度を導出する為には、有効偏極分析能  $A_{y,\text{eff}}$  を較正しておく必要がある。そこで、東北大学 CYRIC にて 80 MeV 陽子-炭素弾性散乱から得られる偏極陽子を 2nd-FPP に入射し、シンチレータ中の炭素との弾性散乱イベントが分離出来ることを確認すると共に、非対称度を測定した。結果、 $A_{y,\text{eff}} = 0.63 \pm 0.15$  と較正され、シミュレーションと無矛盾である事が確認された。

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

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るなど、特異な構造が実験的に示唆され注目を集めている。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、原子核のスピン向きが揃った（スピン偏極した）Mg のベータ崩壊の空間的異方性を用いることで、その娘核の Al 原子核の励起状態のスピンを実験的に決定できる独自の手法を用いることにより、その構造解明を目指す。本年度は、2019 年 11 月にカナダの TRIUMF 研究所にて実施したスピン偏極した  $^{31}\text{Mg}$  を用いた  $^{31}\text{Al}$  の励起状態の構造解明実験の解析を進めた。8 台の高純度ゲルマニウム検出器の同時測定データの解析により、 $^{31}\text{Al}$  における 36 の新たなガンマ遷移および 8 つの新たな励起状態を発見することができた。加えて、得られた準位構造をもとに、各準位へのベータ遷移で放出されるベータ線の放出角度分布を調べ、7 つの励起状態についてスピンを実験的に初めて決定することができた。今後、詳細に得られた準位構造と理論計算などの比較を行い、 $^{31}\text{Al}$  の原子核構造の解析を進める。また、実験では中性子検出器も配置しているため、ベータ遅延中性子測定による  $^{31}\text{Al}$  の中性子非束縛状態についても解析を進める予定である。

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

安定線から遠く離れた不安定核では多くのエキゾチックな構造が報告されている。エキゾチック核構造を発現させる原動力になっていると考えられるのが、原子核における殻進化および変形の競合である。これらの競合を微視的視点から明らかにする上で有用な観測量が核モーメントである。新たに開発したスピン配向 RI ビーム生成技術を駆使して、エキゾチック核の核モーメント測定を行う計画を進めている。本研究に関しては、突然の変形発現が注目を集めている中性子過剰核  $^{99}\text{Zr}$  の励起状態の電気四重極モーメント測定が、理化学研究所 RIBF の課題採択委員会にて採択されている。

### 核スピン歳差周波数精密測定による基本対称性の研究（市川雄一）

現在の物質優勢な宇宙の姿は、宇宙初期における CP 対称性の破れを伴った物質創成に由来すると考えられている。そして、素粒子の標準理論を超えた CP 対称性の破れを反映する観測量として電気双極子モーメント（EDM）が注目を集めている。本研究では独自の核スピンメーザーという手法を用いて、核スピンの歳差運動を精密に制御・観測することで、EDM の観測を目指している。2021 年度に理化学研究所より測定装置を九州大学に移設する予定である。

### $^{12}\text{C}$ 第 2 励起状態の対崩壊分岐比決定のための実験手法開発（久保大志、寺西高）

$^{12}\text{C}$  第 2 励起状態の基底状態への対崩壊分岐比の実験値の精度は、重要な天体核反応の 1 つであるトリプルアルファ反応の反応率決定精度を支配しており、その向上が長年の懸案になっている。本学タンデム加速器施設では逆運動学条件の非弾性散乱  $\alpha(^{12}\text{C}, \alpha_2)$  により  $^{12}\text{C}$  第 2 励起状態を生成し、対崩壊分岐比を決定する計画を進めている。本年度は、まず、上記非弾性散乱の励起関数を測定し実験に最適なエネルギーを決定した。次に、ガス標的、プラスチックシンチレータ、およびシリコン半導体検出器からなる予備的な実験セットアップを構築し、 $\alpha(^{16}\text{O}, \alpha_1)$  反応により、対崩壊分岐比が 100% の  $^{16}\text{O}$  第 1 励起状態を生成し、対崩壊を観測することに成功した。

### 発表論文

#### 《原著論文》

Mapping of fragmented  $\nu f_{5/2} \rightarrow \pi f_{7/2}$  transitions in the  $^{73}\text{Co} \rightarrow ^{73}\text{Ni}$  decay:

S. Go, R. Grzywacz, C. Mazzocchi, S.N. Liddick, M. Alshudifat, J.C. Batchelder, T. Baumann, A.A. Ciemny, T.N. Ginter, C.J. Gross, K. Kolos, A. Korgul, S.V. Paulauskas, C.J. Prokop, M.M. Rajabali, K.P. Rykaczewski, S. Taylor, Y. Xiao  
Phys. Rev. C **102**, 044331 (2020).

First online operation of TRIGA-TRAP:

J. Grund, M. Asai, K. Blaum, M. Block, S. Chenmarev, Ch.E. Düllmann, K. Eberhardt, S. Lohse, Y. Nagame, Sz. Nagy, P. Naubereit, J.J.W. van de Laar, F. Schneider, T.K. Sato, N. Sato, D. Simonovski, K. Tsukada, and K. Wendt  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **972**, 164013 (2020).

Study of charged particle activation analysis (II): Determination of boron concentration in human blood samples:

Y. Ikebe, M. Oshima, S. Bamba, M. Asai, K. Tsukada, T.K. Sato, A. Toyoshima, C. Bi, H. Seto, H. Amano, H. Kumada, and T. Morimoto  
Applied Radiation and Isotopes **164**, 109106 (2020).

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

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. Tokieda, T. Wakasa, T. Wakui, K. Yako, Y. Yanagisawa, J. Yasuda, R. Yokoyama, K. Yoshida, K. Yoshida, and J. Zenihiro  
Phys. Rev. Lett. **124**, 212502 (2020).

Surface Localization of the Dineutron in  $^{11}\text{Li}$ :

Y. Kubota, A. Corsi, G. Authelet, H. Baba, C. Caesar, D. Calvet, A. Delbart, M. Dozono, J. Feng, F. Flavigny, J.-M. Gheller, J. Gibelin, A. Giganon, A. Gillibert, K. Hasegawa, T. Isobe, Y. Kanaya, S. Kawakami, D. Kim, Y. Kikuchi, Y. Kiyokawa, M. Kobayashi, N. Kobayashi, T. Kobayashi, Y. Kondo, Z. Korkulu, S. Koyama, V. Lapoux, Y. Maeda, F.M. Marqués, T. Motobayashi, T. Miyazaki, T. Nakamura, N. Nakatsuka, Y. Nishio, A. Obertelli, K. Ogata, A. Ohkura, N.A. Orr, S. Ota, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Paschalis, E.C. Pollacco, S. Reichert, J.-Y. Roussé, 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. Sun, M. Tabata, Y. Togano, J. Tsubota, Z.H. Yang, J. Yasuda, K. Yoneda, J. Zenihiro and T. Uesaka  
Phys. Rev. Lett. **125**, 252501 (2020).

Energy dependence of total reaction cross sections for  $^{17}\text{Ne}$  on a proton target:

T. Moriguchi, M. Amano, A. Ozawa, W. Horiuchi, Y. Abe, T. Fujii, R. Kagesawa, D. Kamioka, A. Kitagawa, M. Mukai, D. Nagae, M. Sakaue, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Yamaguchi, K. Yokota  
Nucl. Phys. A **994**, 121663 (2020).

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:

S. Suzuki, A. Ozawa, D. Kamioka, Y. Abe, M. Amano, H. Arakawa, Z. Ge, K. Hiraiishi, Y. Ichikawa, K. Inomata, A. Kitagawa, T. Kobayashi, H.F. Li, T. Matsumoto, T. Moriguchi, M. Mukai, D. Nagae, S. Naimi, S. Omika, S. Sato, Y. Tajiri, K. Wakayama, T. Yamaguchi

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **965** 163807 (2020).

Properties of  $^{187}\text{Ta}$  Revealed through Isomeric Decay:

P. M. Walker, Y. Hirayama, G. J. Lane, H. Watanabe, G.D. Dracoulis, M. Ahmed, M. Brunet, T. Hashimoto, S. Ishizawa, F.G. Kondev, Yu. A. Litvinov, H. Miyatake, J. Y. Moon, M. Mukai, T. Niwase, J.H. Park, Zs. Podolyák, M. Rosenbusch, P. Schury, M. Wada, X.Y. Watanabe, W.Y. Liang, and F.R. Xu

Phys. Rev. Lett. **125**, 192505 (2020).

In-gas-cell laser ionization spectroscopy of  $^{194,196}\text{Os}$  isotopes by using a multireflection time-of-flight mass spectrograph:

H. Choi, Y. Hirayama, S. Choi, T. Hashimoto, S. C. Jeong, H. Miyatake, J. Y. Moon, M. Mukai, T. Niwase, M. Oyaizu, M. Rosenbusch, P. Schury, A. Taniguchi, Y.X. Watanabe, M. Wada

Phys. Rev. C **102**, 034309 (2020).

Extending the Southern Shore of the Island of Inversion to  $^{28}\text{F}$ :

A. Revel, O. Sorlin, F.M. Marqués, Y. Kondo, J. Kahlbow, T. Nakamura, N.A. Orr, F. Nowacki, J.A. Tostevin, C.X. Yuan, N.L. Achouri, H. Al Falou, L. Atar, T. Aumann, H. Baba, K. Boretzky, C. Caesar, D. Calvet, H. Chae, N. Chiga, A. Corsi, H.L. Crawford, F. Delaunay, A. Delbart, Q. Deshayes, Z. Dombrádi, C.A. Douma, Z. Elekes, P. Fallon, I. Gašparić, J.-M. Gheller, J. Gibelin, A. Gillibert, M.N. Harakeh, W. He, A. Hirayama, C.R. Hoffman, M. Holl, A. Horvat, Á. Horvák, J.W. Hwang, T. Isobe, N. Kalantar-Nayestanaki, S. Kawase, S. Kim, K. Kisamori, T. Kobayashi, D. Körper, S. Koyama, I. Kuti, V. Lapoux, S. Lindberg, S. Masuoka, J. Mayer, K. Miki, T. Murakami, M. Najafi, K. Nakano, N. Nakatsuka, T. Nilsson, A. Obertelli, F. de Oliveira Santos, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Paschalis, D. Rossi, A. T. Saito, T. Saito, M. Sasano, H. Sato, Y. Satou, H. Scheit, F. Schindler, P. Schrock, M. Shikata,

Y. Shimizu, H. Simon, D. Sohler, L. Stuhl, S. Takeuchi, M. Tanaka, M. Thoennessen, H. Törnqvist, Y. Togano, T. Tomai, J. Tscheuschner, J. Tsubota, T. Uesaka, Z. Yang, M. Yasuda, and K. Yoneda

Phys. Rev. Lett. **124**, 152502 (2020).

Thick target neutron yields from LiF, C, Si, Ni, Mo, and Ta bombarded by 6.7 MeV/u neutrons:

H. Takeshita, Y. Watanabe, K. Nakano, S. Manabe, K. Aoki, N. Araki, K. Yoshinami, T. Kin, N. Shigyo, J. Koga, S. Makise, T. Yoshioka, M. Tanaka, and T. Teranishi

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **983**, 164582 (2020).

Study of spin-isospin response of  $^{11}\text{Li}$  neutron-drip-line nucleus with 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. Halász, 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, Y. Togano, T. Tomai, L. Trache, D. Tudor, T. Uesaka, H. Yamada, Z. Yang, M. Yasuda, K. Yoneda, K. Yoshida, J. Zenihiro, N. Zhang

J. Phys. **1643**, 012107 (2020).

Experimental study of  $(p, 2p)$  reactions at 392 MeV on  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ , and  $^{208}\text{Pb}$  nuclei leading to low-lying states of residual nuclei:

T. Noro, T. Wakasa, T. Ishida, H.P. Yoshida, M. Dozono, H. Fujimura, K. Fujita, K. Hatanaka, T. Ishikawa, M. Itoh, J. Kamiya, T. Kawabata, Y. Maeda, H. Matsubara, M. Nakamura, H. Sakaguchi, Y. Sakemi, Y. Shimizu, H. Takeda, Y. Tameshige, A. Tamii, K. Tamura, S. Terashima, M. Uchida, Y. Yasuda, M. Yosoi

Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 093D02 (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. Halász,

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

Structure of the neutron-rich nucleus  $^{30}\text{Mg}$ :

H. Nishibata, K. Tajiri, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Kanaya, A. Yagi, H. Kanaoka, M.R. Pearson, C.D.P. Levy, M. Kimura, N. Tsunoda, T. Otsuka  
Phys. Rev. C **102**, 054327 (2020).

$\beta$ -decay half-lives of 55 neutron-rich isotopes beyond the  $N = 82$  shell gap:

J. Wu, S. Nishimura, P. M'oller, M.R. Mumpower, R. Lozeva, C.B. Moon, A. Odahara, H. Baba, F. Browne, R. Daido, P. Doornenbal, Y.F. Fang, M. Haroon, T. Isobe, H.S. Jung, G. Lorusso, B. Moon, Z. Patel, S. Rice, H. Sakurai, Y. Shimizu, L. Sinclair, P.-A. Söderström, T. Sumikama, H. Watanabe, Z. Y. Xu, A. Yagi, R. Yokoyama, D. S. Ahn, F. L. Bello Garrote, J. M. Daugas, F. Didierjean, N. Fukuda, N. Inabe, T. Ishigaki, D. Kameda, I. Kojouharov, T. Komatsubara, T. Kubo, N. Kurz, K. Y. Kwon, S. Morimoto, D. Murai, H. Nishibata, H. Schaffner, T.M. Sprouse, H. Suzuki, H. Takeda, M. Tanaka, K. Tshoo, Y. Wakabayashi  
Phys. Rev. C **101**, 042801 (2020).

Evolution of proton single-particle states in neutron-rich Sb isotopes beyond  $N = 82$ :

A. Jungclaus, J.M. Keatings, G.S. Simpson, H. Naidja, A. Gargano, S. Nishimura, P. Doornenbal, G. Gey, G. Lorusso, P.-A. Söderström, T. Sumikama, J. Taprogge, Z.Y. Xu, H. Baba, F. Browne, N. Fukuda, N. Inabe, T. Isobe, H.S. Jung, D. Kameda, G. D. Kim, Y.-K. Kim, I. Kojouharov, T. Kubo, N. Kurz, Y.K. Kwon, Z. Li, H. Sakurai, H. Schaffner, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, Z. Vajta, H. Watanabe, J. Wu, A. Yagi, K. Yoshinaga, S. Bonig, J.-M. Daugas, R. Gernhauser, S. Ilieva, T. Kroll, A. Montaner-Piza, K. Moschner, D. Mucher, H. Nishibata, A. Odahara, R. Orlandi, M. Scheck, K. Steiger, A. Wendt  
Phys. Rev. C **102**, 034324 (2020).

Shape evolution of neutron-rich  $^{106,108,110}\text{Mo}$  isotopes in the triaxial degree of freedom:  
J. Ha, T. Sumikama, F. Browne, N. Hinohara, A.M. Bruce, S. Choi, I. Nishizuka, S. Nishimura, P. Doornenbal, G. Lorusso, P. -A. Söderström, H. Watanabe, R. Daido, Z. Patel, S. Rice, L. Sinclair, J. Wu, Z.Y. Xu, A. Yagi, H. Baba, N. Chiga, R. Carroll, F. Didierjean, Y. Fang, N. Fukuda, G. Gey, E. Ideguchi, N. Inabe, T. Isobe, D. Kameda, I. Kojouharov, N. Kurz, T. Kubo, S. Lalkovski, Z. Li, R. Lozeva, H. Nishibata, A. Odahara, Zs. Podolyak, P.H. Regan, O.J. Roberts, H. Sakurai, H. Schaffner, G.S. Simpson, H. Suzuki, H. Takeda, M. Tanaka, J. Taprogge, V. Werner, O. Wieland  
Phys. Rev. C **101**, 044311 (2020).

$\beta$ -decay of  $^{75}\text{Ni}$  and the systematics of the low-lying level structure of neutron-rich odd- $A$  Cu isotopes:

F.L. Bello Garrote, E. Sahin, Y. Tsunoda, T. Otsuka, A. Gorgen, M. Niikura, S. Nishimura, G. de Angelis, G. Benzoni, A.I. Morales, V. Modamio, Z.Y. Xu, H. Baba, F. Browne, A.M. Bruce, S. Ceruti, F.C.L. Crespi, R. Daido, M.-C. Delattre, P. Doornenbal, Zs. Dombradi, Y. Fang, S. Franchoo, G. Gey, A. Gottardo, K. Hadynska-Klek, T. Isobe, P.R. John, H.S. Jung, I. Kojouharov, T. Kubo, N. Kurz, I. Kuti, Z. Li, G. Lorusso, I. Matea, K. Matsui, D. Mengoni, T. Miyazaki, S. Momiyama, P. Morfouace, D.R. Napoli, F. Naqvi, H. Nishibata, A. Odahara, R. Orlandi, Z. Patel, S. Rice, H. Sakurai, H. Schaffner, L. Sinclair, P.-A. Söderström, D. Sohler, I.G. Stefan, T. Sumikama, D. Suzuki, R. Taniuchi, J. Taprogge, Zs. Vajta, J.J. Valiente-Dobon, H. Watanabe, V. Werner, J. Wu, A. Yagi, M. Yalcinkaya, R. Yokoyama, K. Yoshinaga  
Phys. Rev. C **102**, 034314 (2020).

Development and operation of an electrostatic time-of-flight detector for the Rare RI storage Ring:

D. Nagae, Y. Abe, S. Okada, S. Omika, K. Wakayama, S. Hosoi, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, Z. Ge, S. Naimi, F. Suzuki, N. Tadano, R. Igosawa, K. Inomata, H. Arakawa, K. Nishimuro, T. Fujii, T. Mitsui, Y. Yanagisawa, H. Baba, S. Michimasa, S. Ota, G. Lorusso, Yu. A. Litvinov, A. Ozawa, T. Uesaka, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, M. Wakasugi  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **986**, 164713 (2021).

High-spin states in  $^{35}\text{S}$ :

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

Finite-amplitude method for collective inertia in spontaneous fission:  
K. Washiyama, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa,  
Phys. Rev. C **103**, 014306 (2021).

Measurement of double-differential thick-target neutron yields of the  $C(d, n)$  reaction at 12, 20, and 30 MeV:  
Md K.A. Patwary, T. Kin, K. Aoki, K. Yoshinami, M. Yamaguchi, Y. Watanabe, K. Tsukada, N. Sato, M. Asai, T.K. Sato, Y. Hatsukawa, and S. Nakayama  
J. Nucl. Sci. Technol. **58**, 252 (2021).

Quasifree Neutron Knockout Reaction Reveals a Small  $s$ -Orbital Component in the Borromean Nucleus  $^{17}\text{B}$ :  
Z.H. Yang, Y. Kubota, A. Corsi, K. Yoshida, X.-X. Sun, J.G.Li, M. Kimura, N. Michel, K. Ogata, C.X.Yuan, Q. Yuan, G. Authelet, H. Baba, C. Caesar, D. Calvet, A. Delbart, M. Dozono, 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. Marqués, T. Motobayashi, T. Miyazaki, T. Nakamura, N. Nakatsuka, Y. Nishio, A. Obertelli, A. Ohkura, N.A. Orr, S. Ota, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Paschalis, E.C. Pollacco, S. Reichert, J.-Y. Roussé, 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. Sun, M. Tabata, Y. Togano, J. Tsubota, F.R. Xu, J. Yasuda, K. Yoneda, J. Zenihiro, S.-G. Zhou, W. Zuo, and T. Uesaka  
Phys. Rev. Lett. **126**, 082501 (2021).

$\beta$  decay of the very neutron-deficient  $^{60}\text{Ge}$  and  $^{62}\text{Ge}$  nuclei:  
S.E.A. Orrigo, B. Rubio, W. Gelletly, P. Aguilera, A. Algora, A. I. Morales, J. Agramunt, D.S. Ahn, P. Ascher, B. Blank, C. Borcea, A. Boso, R.B. Cakirli, J. Chiba, G. de

Angelis, G. de France, F. Diel, P. Doornenbal, Y. Fujita, N. Fukuda, E. Ganioglu, M. Gerbaux, J. Giovinazzo, S. Go, T. Goigoux, S. Grévy, V. Guadilla, N. Inabe, G.G. Kiss, T. Kubo, S. Kubono, T. Kurtukian-Nieto, D. Lubos, C. Magron, F. Molina, A. Montaner-Pizá, D. Napoli, D. Nishimura, S. Nishimura, H. Oikawa, V.H. Phong, H. Sakurai, Y. Shimizu, C. Sidong, P.-A. Söderström, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, Y. Takei, M. Tanaka, J. Wu, S. Yagi  
Phys. Rev. C **103**, 014324 (2021).

Beta decay of the axially asymmetric ground state of  $^{192}\text{Re}$ :

H. Watanabe, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, A. N. Andreyev, T. Hashimoto, F.G. Kondev, G.J. Lane, Yu.A. Litvinov, J.J. Liu, H. Miyatake, J.Y. Moon, A.I. Morales, M. Mukai, S. Nishimura, T. Niwase, M. Rosenbusch, P. Schury, Y. Shi, M. Wada, P.M. Walker  
Phys. Lett. B **814**, 136088 (2021).

Pulse shape analysis of signals from SiPM-based CsI(Tl) detectors for low-energy protons: Saturation correction and particle identification:

T. Teranishi, Y. Ueno, M. Osada, S. Oka, K. Iribe, H. Yoshida, H. Sakai, T. Kubo  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **989**, 164967 (2021).

Three-body breakup of  $^6\text{He}$  and its halo structure:

Y.L. Sun, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Satou, J. Lee, T. Matsumoto, K. Ogata, K. Kikuchi, N. Aoi, Y. Ichikawa, K. Ieki, M. Ishihara, T. Kobayashi, T. Motobayashi, H. Otsu, H. Sakurai, T. Shimamura, S. Shimoura, T. Shinohara, T. Sugimoto, S. Takeuchi, Y. Togano, K. Yoneda  
Phys. Lett. B **814**, 136072 (2021).

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

R. Yokoyama, E. Ideguchi, G.S. Simpson, M. Tanaka, Y. Sun, C.-J. Lv, Y.-X. Liu, L.-J. Wang, S. Nishimura, P. Doornenbal, G. Lorusso, P.-A. Söderström, T. Sumikama, J. Wu, Z.Y. Xu, N. Aoi, H. Baba, F.L. Bello Garrote, G. Benzoni, F. Browne, R. Daido, Y. Fang, N. Fukuda, A. Gottardo, G. Gey, S. Go, S. Inabe, T. Isobe, D. Kameda, K. Kobayashi, M. Kobayashi, I. Kojouharov, T. Komatsubara, T. Kubo, N. Kurz, I. Kuti, Z. Li, M. Matsushita, S. Michimasa, C.B. Moon, H. Nishibata, I. Nishizuka,

A. Odahara, Z. Patel, S. Rice, E. Sahin, H. Sakurai, H. Schaffner, L. Sinclair, H. Suzuki, H. Takeda, J. Taprogge, Zs. Vajta, H. Watanabe, A. Yagi  
Phys. Rev. C **104**, L021303 (2021).

Observation of new neutron-rich isotopes in the vicinity of  $^{110}\text{Zr}$ :

T. Sumikama, N. Fukuda, N. Inabe, D. Kameda, T. Kubo, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, K. Yoshida, H. Baba, F. Browne, A.M. Bruce, R. Carroll, N. Chiga, R. Daido, F. Didierjean, P. Doornenbal, Y. Fang, G. Gey, E. Ideguchi, T. Isobe, S. Lalkovski, Z. Li, G. Lorusso, R. Lozeva, H. Nishibata, S. Nishimura, I. Nishizuka, A. Odahara, Z. Patel, Zs. Podolyak, P.H. Regan, S. Rice, O.J. Roberts, H. Sakurai, G.S. Simpson, L. Sinclair, P.-A. Söderström, M. Tanaka, J. Taprogge, H. Watanabe, V. Werner, O. Wieland, J. Wu, Z.Y. Xu, A. Yagi  
Phys. Rev. C **103**, 014614 (2021).

Nuclear structure of Te isotopes beyond neutron magic number  $N = 82$ :

B. Moon, A. Jungclaus, H. Naidja, A. Gargano, R. Lozeva, C.-B. Moon, A. Odahara, G.S. Simpson, S. Nishimura, F. Browne, P. Doornenbal, G. Gey, J. Keatings, G. Lorusso, Z. Patel, S. Rice, M. Si, L. Sinclair, P.-A. Söderström, T. Sumikama, J. Taprogge, H. Watanabe, J. Wu, Z.Y. Xu, A. Yagi, D.S. Ahn, H. Baba, F.L. Bello Garrrote, S. Bonig, R. Daido, J.M. Daugas, F. Didierjean, F. Drouet, Y. Fang, N. Fukuda, R. Gernhauser, B. Hong, E. Ideguchi, S. Ilieva, N. Inabe, T. Ishigaki, T. Isobe, H.S. Jung, D. Kameda, I. Kojouharov, T. Komatsubara, T. Kroll, T. Kubo, N. Kurz, Y.K. Kwon, C.S. Lee, P. Lee, Z. Li, A. Montaner-Piza, S. Morimoto, K. Moschner, D. Mucher, D. Murai, M. Niikura, H. Nishibata, I. Nishizuka, R. Orlandi, H. Sakurai, H. Schaffner, Y. Shimizu, K. Steiger, H. Suzuki, H. Takeda, K. Tshoo, Zs. Vajta, A. Wendt, R. Yokoyama, K. Yoshinaga  
Phys. Rev. C **103**, 034320 (2021).

《その他の論文》

Nuclear structure and reaction with quantum shape fluctuation:

T. Nakatsukasa, Y. Kashiwaba, F. Ni, K. Washiyama, K. Wen, N. Hinohara,  
JPS Conf. Proc. **32**, 010024 (2020).

Magnetic moment of the isomeric state of  $^{75}\text{Cu}$  measured with a highly spin-aligned

beam:

Y. Ichikawa, H. Nishibata, Y. Tsunoda, A. Takamine, K. Imamura, T. Fujita, T. Sato, S. Momiyama, Y. Shimizu, D.S. Ahn, K. Asahi, H. Baba, D.L. Balabanski, F. Boulay, J.M. Daugas, T. Egami, N. Fukuda, C. Funayama, T. Furukawa, G. Georgiev, A. Gladkov, N. Inabe, Y. Ishibashi, T. Kawaguchi, T. Kawamura, Y. Kobayashi, S. Kojima, A. Kusoglu, I. Mukul, M. Niikura, T. Nishizaka, A. Odahara, Y. Ohtomo, T. Otsuka, D. Ralet, G.S. Simpson, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, L.C. Tao, Y. Togano, D. Tominaga, H. Ueno, H. Yamazaki, and X.F. Yang  
JPS Conf. Proc. **32**, 010047 (2020).

Nuclear-moment measurements of exotic nuclei using spin-oriented RI beams at RIBF:

Y. Ichikawa

AIP Conf. Proc. **2319**, 080021 (2021).

MRTOF+ $\alpha$ -TOF による  $^{257}\text{Db}$  の直接質量測定:

庭瀬暁隆、P. Schury、和田道治、P. Brionnet、S. Chen、橋本尚志、羽場宏光、平山賀一、D.S. Hou、飯村俊、石山博恒、石澤倫、伊藤由太、加治大哉、木村創大、小浦 寛之、J. Liu、宮武宇也、J.Y. Moon、森田浩介、森本幸司、長江大輔、M. Rosenbusch、高峰愛子、渡辺裕、W. Xian、S.X. Yan、H. Wollnik  
日本放射化学会誌 第41号 2021年3月.

## 講演

《 海外での講演 》

Mapping of fragmented  $\nu f_{5/2} \rightarrow \pi f_{7/2}$  transitions in neutron-rich Co isotopes:

S. Go

Nuclear Physics Seminar (on-line), December 2020, Warsaw University, Poland.

《 国内での講演 》

$^{234}\text{Np}$  新核異性体の発見とその崩壊特性:

浅井雅人、末川慶英、東 聖人、鎌田裕生、戸部晃久、A.N. Andreyev、廣瀬健太郎、伊藤由太、牧井宏之、西尾勝久、庭瀬暁隆、R. Orlandi、阪間 稔、佐藤哲也、柴田理尋、洲崎ふみ、鈴木颯人、床井健運、富塚知博、塚田和明

日本放射化学会第 64 回討論会 (2020)、2020 年 9 月 9 日、オンライン

MRTOF+ $\alpha$ -TOF による  $^{257}\text{Db}$  の直接質量測定:

庭瀬暁隆、P.Schury、和田道治、P.Brionnet、S. Chen、橋本尚志、羽場宏光、平山賀一、D.S. Hou、飯村俊、石山博恒、石澤倫、伊藤由太、加治大哉、木村創大、小浦 寛之、J. Liu、宮武宇也、J.Y. MOON、森田浩介、森本幸司、長江大輔、M. Rosenbusch、高峰愛子、渡辺裕、W. Xian、S.X. Yan、H. Wollnik.

日本放射化学会第 64 回討論会 (2020)、2020 年 9 月 9 日、オンライン

$^{234}\text{Np}$  核異性体の崩壊と核構造:

浅井雅人、末川慶英、東 聖人、鎌田裕生、戸部晃久、A.N. Andreyev、廣瀬健太郎、伊藤由太、牧井宏之、西尾勝久、庭瀬暁隆、R. Orlandi、阪間 稔、佐藤哲也、柴田理尋、洲崎ふみ、鈴木颯人、床井健運、富塚知博、塚田和明

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 15 日、オンライン

荷電変化断面積における荷電粒子蒸発効果:

田中聖臣、武智麻耶、本間彰、福田光順、西村太樹、鈴木健、森口哲朗、安得順、A.S. Aimagambetov、天野将道、荒川裕樹、S. Bagchi、K.-H. Behr、N. Burtebayev、親跡和弥、杜航、藤井朋也、福田直樹、H. Geissel、堀太地、星野寿春、伊五澤涼、池田彩夏、稲辺尚人、猪股玖美、板橋健太、泉川卓司、上岡大起、神田直人、加藤郁磨、I. Kenzhina、G. Z. Korkulu、Y. Kuk、日下健祐、松多健策、三原基嗣、宮田恵理、長江大輔、中村翔健、M. Nassurlla、西室国光、西塚賢治、大甕舜一郎、大西康介、大竹政雄、大坪隆、王恵仁、小沢顕、A. Prochazka、櫻井博儀、C. Scheidenberger、清水陽平、杉原貴信、炭竈聡之、鈴木伸司、鈴木宏、竹田浩之、田中悠太郎、田中良樹、和田太郎、若山清志、八木翔一、山口貴之、柳原陸斗、柳澤善行、吉田光一、T.K. Zholdybayev

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 15 日、オンライン

変形核整列による融合反応機構研究の可能性:

坂口聡志

研究会「時間階層進化として捉える原子核反応」、2020 年 10 月 8 日、オンライン

MRTOF+ $\alpha$ -TOF による (超) 重核の精密質量と  $\alpha$  崩壊の相関測定:

庭瀬暁隆

2020 重元素核化学ワークショップ ELPH 研究会 C027

Study of in-medium  $NN$  interactions by using  $(p, pN)$  reactions:

若狭智嗣

第5回クラスター階層領域研究会、2020年9月24–25日、オンライン

$^{51}\text{V}+^{208}\text{Pb}$  反応系における融合障壁分布の測定:

内藤夏樹、田中聖臣、坂口聡志、森田浩介、加治大哉、田中泰貴、庭瀬暁隆、羽場宏光、Brionnet Pierre、森本幸司 for the nSHE Collaboration

第126回日本物理学会九州支部例会、2020年12月5日、オンライン

$^{252}\text{Cf}$ ,  $^{256}\text{Fm}$ ,  $^{258}\text{Fm}$ ,  $^{259}\text{Lr}$  の自発核分裂における核分裂片質量分布解析:

東聖人、浅井雅人、森田浩介、坂口聡志、郷慎太郎

第126回日本物理学会九州支部例会、2020年12月5日、オンライン

低エネルギー重イオンに対するシリコン検出器の波高欠損およびエネルギー分解能の研究:

長田茉莉子、坂口聡志、浅井雅人、甲斐民人、郷慎太郎、田中聖臣、富松太郎、内藤夏樹、永田優斗、東聖人、松尾仁、武藤大河、村上郁人、鷲山広平、森田浩介

第126回日本物理学会九州支部例会、2020年12月5日、オンライン

超重核領域における  $\alpha$  線および自発核分裂片測定のための Si 検出器用プリアンプの性能評価 1:

浅井雅人、甲斐民人、富松太郎、永田優斗、武藤大河

第126回日本物理学会九州支部例会、2020年12月5日、オンライン

超重核領域における  $\alpha$  線および自発核分裂片測定のための Si 検出器用プリアンプの性能評価 2:

甲斐民人、浅井雅人、永田優斗、富松太郎、武藤大河

第126回日本物理学会九州支部例会、2020年12月5日、オンライン

逆運動学  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_2)$  散乱によるホイル状態の生成:

久保大志、寺西高、中島優人、後藤滉一、松尾仁、久保野茂

第126回日本物理学会九州支部例会、2020年12月5日、オンライン

低エネルギースピ物理:

市川雄一

日本のスピン物理学の展望、2021年2月23-24日、松江&オンライン

$^{240}\text{Pu}$ ,  $^{256}\text{Fm}$  の自発核分裂経路上の集団慣性質量と動的効果:

鷺山広平、日野原伸生、中務孝

日本物理学会第76回年次大会、2021年3月15日、オンライン

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

トリプルアルファ反応率の精密決定

研究代表者：寺西高

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

核分裂片同時計数検出器による中性子過剰核の融合反応機構研究

研究代表者：坂口聡志

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

スピン整列ビームを用いたエキゾチック核構造研究の展開

研究代表者：市川雄一

文部科学省科学研究費補助金、挑戦的研究 (開拓)

112~116番元素のイオン化エネルギー測定による新たな周期律の構築

研究代表者：浅井雅人

文部科学省科学研究費補助金、挑戦的研究 (萌芽)

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

研究代表者：市川雄一

文部科学省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

融合障壁分布測定による不安定核の高次核変形度導出手法の開発

研究代表者：田中聖臣

文部科学省科学研究費補助金、新学術領域研究

エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造

研究分担者：若狭智嗣 (研究代表者 東京工業大学大学院理学研究科 中村隆司)

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (S)

三核子系散乱による核子間三体力の完成

研究分担者：坂口聡志 (研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子)

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

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

研究分担者：若狭智嗣 (研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子)

**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)**

田中 聖臣 (日本学術振興会特別研究員 (PD)) : 融合障壁分布測定による不安定核の高次核変形度導出手法の開発

## 他大学での研究と教育

浅井雅人：近畿大学理工学部電気電子工学科、原子エネルギー工学特別講義、2020 年 11 月 18 日

## 学部 4 年生卒業研究

安藤蒼太：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)：プラスチックシンチレータからのシンチレーション光集光の高効率化

石橋優一：(指導教員、浅井雅人)：波形解析が可能なプリアンプの開発

井元悠介：(指導教員、寺西高)： $^{12}\text{C}+\text{Ti}$  および  $^{12}\text{C}+\text{Ni}$  反応測定

岸本侃己：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洗希)：マルチアノードイオンチェンバーのガス組成比に対する  $^{241}\text{Am}$  線源からの  $\alpha$  線の飛程変化

小谷基樹：(指導教員、寺西高)：プラスチックシンチレータの宇宙線に対する応答の測定およびシミュレーション

篠原悠介：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洸希)： $^{60}\text{Co}$ 線源より放出される $\gamma$ 線の角度相関の測定

杉山晃一：(指導教員、郷慎太郎)：アクチノイド領域のアイソマー探索にむけたタングステンシールドの性能評価

松永壮一郎：(指導教員、坂口聡志)：低エネルギービームを用いた MCP-ToF 検出器の検出効率及び時間分解能の評価

山下渉：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洸希)：プラスチックシンチレータ二台を用いた宇宙線の角度分布測定

横田望海：(指導教員、若狭智嗣・市川雄一・西畑洸希)：同時測定によるクライン-仁科の公式の検証

## 修士論文

長田茉莉：(指導教員、坂口聡志・浅井雅人・森田浩介)：低エネルギー重イオンに対するシリコン検出器の波高欠損およびエネルギー分解能の研究

久保大志：(指導教員、寺西高)：炭素 12 の逆運動学  $\alpha$  非弾性散乱を用いたホイル状態の対崩壊分岐比測定手法の開発

坂木重仁：(指導教員、若狭智嗣)：核内陽子ロックアウト反応のスピンの完全測定に向けた反跳陽子偏極度計の較正

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

浜野友哉：(指導教員、西畑洸希・若狭智嗣)：スピン偏極 Mg ビームを用いた中性子過剰 Al の構造研究

東聖人：(指導教員、浅井雅人・森田浩介)：機械学習的手法を用いた中性子過剰フェルミウム領域核の自発核分裂片質量分布解析

## 博士論文

庭瀬暁隆：(指導教員、森田浩介)：

First direct mass measurement of superheavy nuclide via MRTOF mass spectrograph equipped with an  $\alpha$ -TOF detector

## 学外での学会活動

森田浩介： nSHE Research Group Management Board Member

若狭智嗣： 大阪大学核物理研究センター運営委員会委員

浅井雅人： 日本放射化学会理事

坂口聡志： 日本物理学会実験核物理領域運営委員

nSHE Research Group Management Board Member

RIBF Users Executive Committee 委員

大阪大学核物理研究センター研究計画検討専門委員会委員 (P-PAC)

大阪大学核物理研究センター実験課題採択専門委員会委員 (B-PAC)

日本の核物理の将来レポート編集委員

FUSION2020 Program Committee

研究会「時間階層進化として捉える原子核反応」世話人

市川雄一： 研究会「日本のスピン物理学の展望」世話人

停止・低速 RI ビームを用いた核分光同好会 (SSRI) 幹事

Fundamental Physics Using Atoms (FPUA) Board Member

## その他の活動と成果

日本放射化学会 第 64 回討論会における発表 “MRTOF+ $\alpha$ -TOF による  $^{257}\text{Db}$  の直接質量測定” に対して、若手優秀発表賞を受賞 (庭瀬暁隆)

理化学研究所 Accel. Prog. Rep. に投稿した所内報 “Offline measurement of mass and correlated decay properties using radioactive  $^{224}\text{Ra}$  source via MRTOF+ $\alpha$ -TOF detector” に対して、理研桜舞賞 (研究奨励賞) を受賞 (庭瀬暁隆)

科研費採択率向上のための実践説明会における講師の担当。講演題目:「科研費取得についての私の経験と留意点」、九州大学、2020年9月29日(坂口聡志)

原著論文”Finite-amplitude method for collective inertia in spontaneous fission”がPhysical Review C 誌のEditor’s suggestionに選出(鷺山広平)

FD講演会「九州大学オンライン授業のグッドプラクティス～リアルタイム型授業編～」における講師およびパネリストの担当。講演題目:「オンライン授業で学生との信頼関係を構築する取り組み」、九州大学(オンライン)、2021年3月16日(坂口聡志)

九州大学体験入学における講義の担当。講義題目:「宇宙の謎を紐解くミクロな粒子」、九州大学(オンライン)、2021年3月25日(市川雄一)

# 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 勸 助教      音野 瑛俊 (RCAPP) 助教      末原 大幹 助教

《 博士研究員 》

小林 大 (特任助教)      倉田 正和 (RCAPP)

《 大学院 博士課程 》

高田 秀佐      古賀 淳      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      佐田 智也      来見田 将大      後藤 輝一

荘司 大志      松本 岳      矢野 浩大      姚 舜禹

岩下 侑太郎      久原 真美      嶋津 省吾      松崎 俊

《 学部 卒業研究生 》

川上 実言      津村 周作      樋口 義清      松原 俊太

## 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)、素粒子実験 (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)、素粒子実験 (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、山口 尚輝、宮崎 祐太、荘司 大志、姚 舜禹、岩下 侑太郎)

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、Run3 に向けた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、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。2015 年から 2018 年の実験第二期において、LHC は設計の 2 倍を超える瞬間輝度 (単位時間あたりの陽子同士の同時衝突数) を達成し、検出器にとっては厳しい環境となったが、ハードウェアおよびソフトウェアに様々な改善を施すことで安定したデータ取得を実現した。2020 年は、実験第三期に向けた検出器較正アルゴリズムの改善に着手している。実験第一期の開始以前から大きな見直しをすることなく使用してきたが、放射線損傷による性能変化を踏まえ、実験第三期の最後まで適用可能な検出器較正アルゴリズムの確立を目標としている。その他、SCT 検出器の一部が運転不可能となった際の物理解析に与える影響の評価、検出器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、検出器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。

- **新粒子の探索** (織田 勸、音野 瑛俊、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確実視されているが、候補となる粒子は素粒子標準模型に無い。LHC 加速器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、2014 年から我々のグループでは、ビーム衝突点で生成後に即座には崩壊しない長寿命をもった新粒子の探索に取り組んでいる。このような新粒子探索には、SCT 検出器の高い性能が特に重要となる。これまで新粒子の発見には至っていないが、超対称性粒子や右巻きニュートリノなど様々な物理シナリオに強い制限を与えることに成功してきた。音野は 2020 年からは、近年ダークマターの候補として注目が集まっているヒグシーノ (ヒッグス粒子の超対称性パートナー) の探索を開始した。特にヒグシーノに伴って 1 MeV 程度の低い運動量の荷電粒子がビーム衝突点から離れて生成することに着目し、これまで全く感度がなかった質量領域の開拓を目指している。山口はウィーノ ( $W$  粒子の超対称性パートナー) の探索を進めている。ウィーノも長寿命となる性質を持つと期待されるが、従来の探索では SCT 検出器には到達しない程度の飛程を仮定してきた。解析手法の開発に取り組むことで、SCT 検出器にも到達するようなウィーノに対する感度向上に挑戦している。

- **検出器アップグレード計画** (東城 順治、小林 大、宮崎 祐太、荘司 大志、姚舜禹、岩下 侑太郎)

現行の LHC 加速器は、2024 年まで運転して積分ルミノシティ  $350 \text{ fb}^{-1}$  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 年から高輝度 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) をバンプボンディング接合したセンサーモジュール、ASIC 制御用フレキシブル基板、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レ

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、特に接着剤の選定でほぼ最終的な段階に至った。組立における接着では、パターン形成したステンレスシートを用いるステンシル法を採用し、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、高精度機械加工により治具を製作し、改良を重ねつつ、繰り返し位置精度の要求値である 30  $\mu\text{m}$  以内を達成することに成功した。ワイヤー保護は、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、候補が見つかっていない。そのため、低物質量材料による保護機構とパリレンコーティングによる保護性能の研究を進めている。検出器の最終仕様に向けた各開発は完了する見通しであり、今後は量産体制を構築していく予定である。

**国際リニアコライダー計画** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、後藤 輝一、久原真美)  
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。物理においては、深層学習を用いた崩壊点検出アルゴリズムの改善およびカロリメータにおけるタイミング再構成の研究に取り組んだ。測定器の開発においては、ILC 電磁カロリメータのための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。

- **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 フレームワークを用いて、任意のトラック数を取り扱うためリカレントニューラルネットワークを用いた崩壊点の組み合わせ再構成手法を開発した。独自にセル構造を改良した LSTM(Long Short-term Memory) アルゴリズムと Attention 機構を組み合わせた手法と、飛跡ペアに対する全結合型ネットワークを組み合わせた手法の開発に成功し、C++のフレームワークで動作するようアダプタの設計も行った。性能においては従来の LCFIPlus と比べ、偽の崩壊点を構成する確率はやや上がるが真の崩壊点をより効率良く再構成できるアルゴ

リズムを開発できた。今後、フレーバー識別と組み合わせてさらなる性能向上を目指す。

- **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、久原 真美)

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。2019年度に東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)にてビーム試験を行い、100 fC以上(増幅後)の信号に対して385ピコ秒という時間分解能を得たが、目標とする数10ピコ秒の時間分解能を得るためには、読み出しノイズの低減が必要であった。本年度はセットアップを改良し、シールドボックスを用いてノイズを軽減するとともに、マルチセルのセンサーも用いて粒子の通過位置に対する依存性の取得も試みた。2021年2月にELPHにて行ったビーム試験により、時間分解能に関しては、30 fCの信号に対して約200ピコ秒の分解能を得た。この時間分解能は未だに読み出し回路のノイズに起因する成分が大きく、今後さらに改善を目指す。

- **ILCカロリメータにおけるタイミング再構成アルゴリズムの開発** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、久原 真美)

上述の高時間分解能センサーによるカロリメータが実現した場合、ハドロンや光子の反応により生じる多数の測定点から効率的に時間情報を取り出すアルゴリズムが必要である。従来のアルゴリズムはらせん状に並んだ中央の測定点のみを平均していたが、周辺の多数の測定点を利用しないことで情報ロスが生じている。本年度は、シミュレーションデータを用いて測定点の利用基準を見直し、多数の測定点の分布からタイミングの再構成を行う手法を開発した。時間情報からハドロンの粒子識別を行う方法について、センサーの想定される時間分解能に応じて柔軟に基準を変更することで、50ピコ秒の時間分解能で5 GeV程度、20ピコ秒の時間分解能で10 GeV程度までパイ中間子とK中間子の分離が可能であることを示した。今後、深層学習を用いた測定点の識別・再構成手法の開発を行い、さらなる性能向上を目指す。

- **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、野口 恭平、松本 岳、嶋津 省吾)

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。実験開始に向けて、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  $\mathcal{O}(10^{-15})$ 、第二段階 (Phase-II) では  $\mathcal{O}(10^{-17})$  の一事象発見感度 (SES) を目指している。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放射体として用いる。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、新しいチェレンコフ放射体の研究、検出器構造体の設計に重点を置いた。前置増幅回路の開発では、これまでに開発してきた試作機と信号の読み出しにも用いるトリガー回路 COTTRI を合わせたシステムを動作させる試験を行った。特に、複数の前置増幅回路と COTTRI の接続と運用、COTTRI に要求される TDC の実装が進展した。新しいチェレンコフ放射体としてエアロジェルを提案し、宇宙線を用いた光量測定を行った。光量が比較的少ない暫定的な結果を得たが、継続して研究を進めることとした。実験初期にはチェレンコフ放射体を用いず、プラスチックシンチレータと SiPM 光検出器を用いる設計もある。その両方を満たす検出器構造体の設計を進めた。

- **電磁カロリメータの開発** (東城 順治、吉岡 瑞樹、嶋津 省吾)

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、ビーム試験を完了させた。ビーム試験では、ストローチューブ飛跡検出器の試作機を組み合わせ

て性能評価を行い、良好な結果を得ている。今年度は Phase-I に用いる実機の建設に向けて、検出器構造体の設計と製作を行った。ECAL 検出器を検出器ソレノイド電磁石の内部に設置することを提案し、また、Phase-I で導入できる LYSO 結晶の数量に限りがあるため、それらを考慮した設計を完了させた。その設計に基づいて検出器構造体を製作し、J-PARC 施設内に設置した。

- **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  $\mu\text{sec}$  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も得て、その研究を行なってきた。広いダイナミックレンジが要求される extinction を測定する検出器を開発・製作し、J-PARC 加速器で extinction を測定する準備を行った。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 検出器を用いた。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完成度を向上させ、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、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  $3.3\sigma$  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、低エミッタンスの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。なお、今年度から基幹教育院へ異動した山中隆志氏とも共同研究を継続している。

- **読み出しチップの開発**（東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹）

シリコンストリップ検出器は、ミューオンを蓄積する磁場内に設置し、ミュー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。我々が要求する仕様に対して、SliT128C はほぼ満たすことを示した。残る課題として、複数チャンネルに信号が入射する際に波形が歪むことが見つかった。そこで、主にチップ内のバイアス回路をマイナー修正した SliT128D を設計し、実機用として量産を完了させた。今後性能評価を進めるとともに、プローブステーションを用いたチップ毎の品質保証のためのセットアップ・環境を整備し、検出器の実機建設に移行する予定である。

- **検出器試作機の開発**（東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、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を完了し、量産を継続的に行っている。読み出し ASIC は SliT128C の開発は完了し、SliT128D の量産を完了した。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を用いる。基板試作機を開発・製作し、今後はその性能評価を行う。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・ライン数の FPC で技術な難易度が高いが、その開発と量産を完了した。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・試作機の開発を進めるとともに、シミュレーションによる性能評価は継続的に進めている。ベーンの製作におけるセンサーの接着では、1  $\mu\text{m}$  の位置精度を要求しており、難易度が高い。今年度は開発中の治具や接手法を用いて、3  $\mu\text{m}$  の位置精度を達成した。今後、さらに改良を加える予定である。また、電気的な性能を試験するため、センサー・FPC・チップから構成する試作機を製作し、その評価を行った。ノイズ性能で改善が必要であることが分かり、ベーンの実機開

発に向けて今後検討する必要がある。熱的・機械的な試作機も並行して製作し性能評価を行っており、今後も継続する予定である。

- **ミューオン線形加速器の開発** (東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、竹内 佑甫)  
冷却ミュー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。開発中の冷却ミューオン源から供給される低エミッタンスのミューオンビームを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 加速器の開発を行っている。製作した低電力モデルの固有状態の周波数と電場分布の測定を完了し、ビーム輸送をシミュレーションも用いた 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ップラーの設計を平行して進めきた。基礎設計を完了させ、実機製作に向けた詳細な設計を継続して行う予定である。

#### 中性子を用いた基礎物理 (吉岡 瑞樹、高田 秀佐、古賀 淳、矢野 浩大、松崎 俊)

- **高精度中性子崩壊寿命測定実験** (吉岡 瑞樹、矢野 浩大、松崎 俊)  
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  $\beta$  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  $\beta$  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。昨年度までに、作製した検出器実機とソレノイド磁石との統合試験を高エネルギー加速器研究機構にて行い、良好な結果が得られている。本年度は、別の背景事象である宇宙線ミュー粒子を排除するため、プラスチックシンチレータと半導体光検出器 MPCC を組み合わせた宇宙線カウンターの作製を行った。九州大学にて宇宙線カウンターを計 32 本作製し、性能評価

を行った。その後、作製した宇宙線カウンターを J-PARC に輸送して、検出器群に組み込んだ。宇宙線ミュー粒子を用いた性能評価を行い、所期の性能を達成していることを確認した。

- **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）

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、インジウムのデータ取得およびデータ解析を行った。特に、スズに関しては解析が完了し、実験感度推定のために必須である未知パラメータを世界で初めて決定することに成功した。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。九州大学にて動的核偏極装置の整備を行っており、主要装置であるレーザー、電磁石、核磁気共鳴装置の整備はすでに完了している。本年度は、ペンタセン分子を導入したパラ・ターフェニル結晶をブリッジマン法およびゾーンメルト法によって製成する結晶作製装置の整備を行った。

- **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の散乱分布を精密に測ることによって、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。これまでは中性子とキセノン原子の散乱データの解析により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。探索感度向上のため中性子とナノ粒子との散乱による新規実験の検討をしており、今年度はナノ粒子作製の検討を行った。核散乱による背景事象を著しく抑制するため、バナジウムとニッケルおよびアルミニウムの合金を用いることを検討しており、ナノ粒子の試作および評価を行っている。

## 発表論文

《 原著論文 》

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with an energetic photon in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **02**, 226 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collision data with the ATLAS detector,” JHEP **02**, 143 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson production in association with a high-energy photon via vector-boson fusion with decay into bottom quark pairs at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 268 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Dark Matter Produced in Association with a Dark Higgs Boson Decaying into  $W^{\pm}W^{\mp}$  or  $ZZ$  in Fully Hadronic Final States from  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  Collisions Recorded with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **126**, no.12, 121802 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for phenomena beyond the Standard Model in events with large  $b$ -jet multiplicity using the ATLAS detector at the LHC,” Eur. Phys. J. C **81**, no.1, 11 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Medium-Induced Modification of  $Z$ -Tagged Charged Particle Yields in  $Pb + Pb$  Collisions at 5.02 TeV with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **126**, no.7, 072301 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for type-III seesaw heavy leptons in dilepton final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, no.3, 218 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of light-by-light scattering and search for axion-like particles with  $2.2 \text{ nb}^{-1}$  of Pb+Pb data with the ATLAS detector,” JHEP **03**, 243 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of hadronic event shapes in high- $p_T$  multijet final states at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **01**, 188

(2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **812**, 135980 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $WH$  and  $ZH$  production in the  $H \rightarrow b\bar{b}$  decay channel in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, no.2, 178 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in association with a  $W$  boson in the single-lepton channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, no.8, 720 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-section measurements for the electroweak production of dijets in association with a  $Z$  boson in proton–proton collisions at ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **81**, no.2, 163 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair single- and double-differential cross-sections in the all-hadronic channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 033 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Longitudinal Flow Decorrelations in Xe+Xe Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$  TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, no.12, 122301 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the jet mass in high transverse momentum  $Z(\rightarrow b\bar{b})\gamma$  production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **812**, 135991 (2021).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation and Measurement of Forward Proton Scattering in Association with Lepton Pairs Produced via the Photon Fusion Mechanism at ATLAS,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, no.26, 261801 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a photon and a hadronically decaying Higgs boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with

the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **125**, 251802 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collisions recorded by ATLAS in Run 2 of the LHC,” JHEP **10**, 062 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with one lepton, missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into two  $b$ -jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 691 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for  $t\bar{t}\bar{t}$  production in the multilepton final state in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.11, 1085 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction and identification of boosted di- $\tau$  systems in a search for Higgs boson pairs using 13 TeV proton-proton collision data in ATLAS,” JHEP **11**, 163 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation of the ATLAS trigger system in Run 2,” JINST **15**, no.10, P10004 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances decaying into a weak vector boson and a Higgs boson in the fully hadronic final state produced in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **102**, no.11, 112008 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Alignment of the ATLAS Inner Detector in Run-2,” Eur. Phys. J. C **80**, no.12, 1194 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential cross-sections of combined  $t\bar{t}\gamma$  and  $tW\gamma$  production in the  $e\mu$  channel at 13 TeV with the ATLAS detector,” JHEP **09**, 049 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section

in the lepton+jets channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **810**, 135797 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new non-resonant phenomena in high-mass dilepton final states with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 005 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pairs of scalar leptoquarks decaying into quarks and electrons or muons in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 112 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in events with a Higgs or  $Z$  boson using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.11, 1080 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into two new low-mass spin-0 particles in the  $4b$  channel with the ATLAS detector using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Phys. Rev. D **102**, no.11, 112006 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the missing transverse momentum triggers for the ATLAS detector during Run-2 data taking,” JHEP **08**, 080 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for  $t\bar{t}$  resonances in fully hadronic final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 061 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the  $Z\gamma$  decay mode of the Higgs boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **809**, 135754 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the upgraded PreProcessor of the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger,” JINST **15**, no.11, P11016 (2020).

G. Aad *et al.* [CMS and ATLAS Collaborations], “Combination of the  $W$  boson polarization measurements in top quark decays using ATLAS and CMS data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” JHEP **08**, no.08, 051 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet resonance search with weak supervision using  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions in the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, no.13, 131801 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, no.12, 1165 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the all-hadronic  $t\bar{t}$  plus missing transverse momentum final state at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, no.8, 737 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2,” *JINST* **15**, no.09, P09015 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into photons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 005 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ $CP$  Properties of Higgs Boson Interactions with Top Quarks in the  $t\bar{t}H$  and  $tH$  Processes Using  $H \rightarrow \gamma\gamma$  with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, no.6, 061802 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson inclusive and differential fiducial cross sections in the  $4\ell$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *Eur. Phys. J. C* **80**, no.10, 942 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Higgs boson production cross-section measurements and their EFT interpretation in the  $4\ell$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, no.10, 957 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Lund Jet Plane Using Charged Particles in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,”

Phys. Rev. Lett. **124**, no.22, 222002 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs Boson Decays into a  $Z$  Boson and a Light Hadronically Decaying Resonance Using 13 TeV  $pp$  Collision Data from the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.22, 221802 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with a displaced vertex and a muon with large impact parameter in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **102**, no.3, 032006 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross-section for a  $Z$  boson in association with  $b$ -jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 044 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **807**, 135595 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Higgs bosons decaying into two tau leptons with the ATLAS detector using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Phys. Rev. Lett. **125**, no.5, 051801 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dijet resonances in events with an isolated charged lepton using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collision data collected by the ATLAS detector,” JHEP **06**, 151 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of the associated production of a top quark and a  $Z$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 124 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson in the  $H \rightarrow \tau\tau$  channel in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **805**, 135426 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the  $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$  process via vector-

boson fusion production using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 108 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in  $\sqrt{s}=13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **101**, no.7, 072001 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the transverse momentum distribution of Drell–Yan lepton pairs in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.7, 616 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS data quality operations and performance for 2015–2018 data-taking,” JINST **15**, no.04, P04003 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for electroweak production of two jets in association with a  $Z\gamma$  pair in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **803**, 135341 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section and lepton differential distributions in  $e\mu$  dilepton events from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.6, 528 (2020).

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

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of jet calibration and energy resolution in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.12, 1104 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of data collected with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 046 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles

produced in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV and decaying into collimated leptons or light hadrons with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.5, 450 (2020).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral Higgs bosons produced in association with  $b$ -quarks and decaying into  $b$ -quarks at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **102**, no.3, 032004 (2020).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair spin correlations in the  $e\mu$  channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using  $pp$  collisions in the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 754 (2020).

K. Goto, T. Suehara, T. Yoshioka, M. Kurata, H. Nagahara, Y. Nakashima, N. Takemura, M. Iwasaki, “Development of a Vertex Finding Algorithm using Recurrent Neural Network”, arXiv:2101.11906.

T. Suehara, Y. Deguchi, Y. Uesugi, Y. Kato, R. Yonamine, “Development of novel silicon sensors with high time and spatial resolution”, 2019 annual report of Research Center for ELectron PHoton Science (ELPH), Tohoku University, arXiv:2101.01996.

LCC Physics Working Group, K. Fujii *et al.*, “ILC Study Questions for Snowmass 2021”, DESY 20-112, KEK Preprint 2020-8, IFIC/20-34, LCTP-20-14, SLAC-PUB-17543, arXiv:2007.03650.

The CALICE Collaboration, D. Boumediene *et al.*, “Particle identification using Boosted Decision Trees in the Semi-Digital Hadronic Calorimeter prototype”, 2020 JINST **15** P10009.

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. Ueno, E. Hamada, M. Ikeno, S. Mihara, H. Nishiguchi, M. Shoji, T. Uchida, Y. Fujii,

R. Kawashima and K. Oishi, *et al.* “Design of Radiation Tolerant Electronics for StrECal System in COMET Experiment,” PoS **EPS-HEP2019**, 175 (2020).

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

T. Yoshioka *et al.* [J-PARC muon  $g-2$ /EDM Collaboration], “Positron Tracking Detector for Muon  $g - 2$ /EDM Experiment at J-PARC,” JPS Conf. Proc. **33**, 011108 (2021).

T. Kishishita, Y. Sato, Y. Fujita, E. Hamada, T. Mibe, T. Nagasawa, S. Shirabe, M. Shoji, T. Suehara and M. M. Tanaka, *et al.* “SliT: A Strip-sensor Readout Chip with Subnanosecond Time-walk for the J-PARC Muon  $g - 2$ /EDM Experiment,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **67**, no.9, 2089-2095 (2020).

Y. Sato *et al.* [J-PARC muon  $g-2$ /EDM Collaboration], “Development of a front-end ASIC for silicon-strip detectors of the J-PARC muon  $g - 2$  /EDM experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **969**, 164035 (2020).

T. Aoyagi, Y. Honda, H. Ikeda, M. Ikeno, K. Kawagoe, T. Kohriki, T. Kume, T. Mibe, K. Namba and S. Nishimura, *et al.* “Performance evaluation of a silicon strip detector for positrons/electrons from a pulsed a muon beam,” JINST **15**, no.04, P04027 (2020).

J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, “Measurement of  $\gamma$  rays from  ${}^6\text{LiF}$  tile as an inner wall of a neutron-decay detector”, Journal of Instrum. **16**, P02001 (2021).

K. Yano, T. Yoshioka *et al.*, “Precise neutron lifetime measurement: An integration test with a gaseous and a solenoidal magnet”, JPS Conf. Proc. **33**, 011117 (2021).

H. Yoshikawa, T. Yoshioka *et al.*, “S-wave resonance analysis of  ${}^{139}\text{La}$  and  ${}^{109}\text{Ag}$  in the compound nuclear process towards T-violation search”, JPS Conf. Proc. **33**, 011136 (2021).

M. Hiromoto, T. Yoshioka *et al.*, “Proof-of-principle experiment for the study fo a new

intermediate range interaction using coherent neutron scattering”, JPS Conf. Proc. **33**, 011118 (2021).

J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, “Study for the experimental sensitivity of T-violation search in compound nuclear reaction of  $^{117}\text{Sn}$ ”, JPS Conf. Proc. **33**, 011137 (2021).

T.Okudaira , T. Yoshioka *et al.*, “Measurement of angular distribution of  $\gamma$ -rays from  $^{139}\text{La}+n$  to excited states of  $^{140}\text{La}$ ”, JPS Conf. Proc. **33**, 011121 (2021).

“Study of  $\gamma$ -ray from 4.53 eV p-wave resonance of  $^{111}\text{Cd}$  using compound nuclear reaction”, S. Makise, T. Yoshioka *et al.*, JPS Conf. Proc. **33**, 011138 (2021).

N. Sumi, T. Yoshioka *et al.*, “Precise neutron lifetime measurement using pulsed neutron beams at J-PARC”, JPS Conf. Proc. **33**, 011056 (2021).

H. Takeshita, T. Yoshioka *et al.*, “Thick target neutron yields from LiF, C, Si, Ni, Mo, and Ta bombarded by 6.7 MeV/u deuterons”, Nucl. Instrum. Meth. A **983**, 165482 (2020).

“Neutron lifetime measurement with pulsed cold neutrons”, K. Hirota, T. Yoshioka *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 123C02 (2020).

T. Yamamoto, T. Yoshioka *et al.*, “Transverse asymmetry of  $\gamma$  rays from neutron-induced compound states of  $^{140}\text{La}$ ”, Phys. Rev. C **101**, no.6, 064624 (2020).

S. Takada, K. Tateishi, Y. Wakabayashi, Y. Ikeda, T. Yoshioka, Y. Otake and T. Uesaka, “Polarized proton spin filter for epithermal neutrons based on dynamic nuclear polarization using photo-excited triplet electron spins”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 123G01 (2020).

T. Yoshioka ”Fundamental physics using neutron at J-PARC and accelerator-driven neutron source”, JAEA Conf **2020-001**, 21 (2020).

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

## 講演

### 《 海外での講演 》

Development of a Vertex Finding Algorithm using Recurrent Neural Network :

K. Goto, T. Suehara

Linear Collider Workshop 2021, Mar. 2021, Online

Optimization of K/pi separation using timing information with ILD simulation :

M. Kuhara, T. Suehara, K. Kawagoe, T. Yoshioka, D. Jeans

CALICE Collaboration Meeting, Mar. 2021, Online

Summary of the LGAD test beam at ELPH, Tohoku University :

Taikan Suehara

CALICE Collaboration Meeting, Mar. 2021, Online

The International Linear Collider (ILC) Project :

K. Kawagoe

KMI Colloquium, Nagoya University (online), Feb. 2021.

News on technological developments within CALICE :

Taikan Suehara on behalf of CALICE Collaboration

International Workshop on Circular Electron-Positron Collider, Oct. 2020, Shanghai and Online

LGAD/PSD development :

T. Suehara

CALICE Collaboration Meeting, Sep. 2020, Online

### 《 国内での講演 》

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ワイヤー保護用 CFRP 構造体の保護性能の評価

莊司 大志

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

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ワイヤー保護用 CFRP 構造体の機械強度評価  
岩下 侑太郎

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

Testing for the thermal conductive plate attachment to the silicon pixel detector for the Inner Tracker of the ATLAS experiment towards the HL-LHC project

Shunyu Yao

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル 検出器のワイヤー保護用 CFRP 構造体の強度評価

岩下 侑太郎

第 126 回日本物理学会九州支部例会、2020 年 12 月、オンライン開催

LHC における soft displaced track を用いたヒグシーノの新しい探索手法について  
音野 瑛俊

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

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実機量産工程の検証

小林 大

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

LHC-ATLAS 実験における消失飛跡を伴う長寿命チャージノ探索の新手法の研究  
山口 尚輝

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

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ワイヤー保護のための CFRP 構造体の設計

宮崎 祐太

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

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ワイヤー保護

用 CFRP 構造体を用いた試作機製作と性能評価

荘司 大志

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

Fundamental Physics at Colliders

東城 順治

KEK 研究会「素粒子・原子核コライダー物理の交点」、2020 年 8 - 9 月、オンライン開催

ILD のための新型シリコンセンサーを用いたカロリメータの時間・空間分解能の研究

久原 真美, 末原 大幹, 川越 清以, 吉岡 瑞樹, Daniel Jeans

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

ILD 検出器シミュレーションを用いた高時間・空間分解能カロリメータの研究

久原 真美, 末原 大幹, 川越 清以, 吉岡 瑞樹, Daniel Jeans

日本物理学会第 126 回九州支部例会、2020 年 11 月、オンライン開催

Detector Overview

T. Yoshioka

加速器・物理合同 ILC 夏の合宿、2020 年 9 月、オンライン開催

Improvement of vertex finder with deep learning

K. Goto

加速器・物理合同 ILC 夏の合宿、2020 年 9 月、オンライン開催

Simulation of LGAD

M. Kuhara, K. Kawagoe, T. Yoshioka, T. Suehara

加速器・物理合同 ILC 夏の合宿、2020 年 9 月、オンライン開催

趣旨説明 - ILC が切り拓く新技術とその多彩な応用の新展開 -

末原 大幹

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

深層学習を用いた ILD 崩壊点検出アルゴリズムの改良

後藤 輝一, 末原 大幹, 川越 清以, 吉岡 瑞樹, 倉田 正和, 長原 一, 中島 悠太, 武村 紀子

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

Future Lepton Colliders for Energy Frontier Studies

末原 大幹

高エネルギー将来計画勉強会、2020 年 4 月、オンライン開催

COMET 実験に向けた 8 GeV 陽子加速試験

野口 恭平

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

COMET 実験に向けた J-PARC メインリングの陽子ビームのエクステンクション改善と補正キッカーの最適化

野口 恭平

第 17 回日本加速器学会年会、2020 年 9 月、オンライン開催

COMET 実験の陽子ビーム実現に向けたエクステンクション試験用検出器の開発

野口 恭平

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

ミューオン加速用 Disk-and-Washer 空洞の開発

竹内 佑甫

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

ミューオン線形加速器のための Disk-and-Washer 空洞の開発

竹内 佑甫

第 17 回日本加速器学会年会、2020 年 9 月、オンライン開催

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での接着方法の開発

来見田 将大

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

次世代中性子技術を用いた高精度中性子寿命測定実験

吉岡瑞樹

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

$^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$  反応における  $\gamma$  線放出角度依存性の測定結果

古賀淳

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

ソレノイド磁石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及び性能評価

矢野浩大

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験：飛跡形状の背景事象の分類に関する調査

松崎俊

日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

磁場を用いた中性子寿命実験における宇宙線カウンターの開発

松崎俊

第 126 回日本物理学会九州支部例会、2020 年 12 月、オンライン開催

複合核反応における時間反転対称性の破れ探索実験のための  $^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$  反応断面積の角度依存性の測定

古賀淳

第 126 回日本物理学会九州支部例会、2020 年 12 月、オンライン開催

複合核共鳴における時間反転対称性の破れ探索に向けた  $\text{In}(n,\gamma)$  反応の解析 - $\gamma$  線分岐比の解析-

高田秀佐

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

$^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$  反応における  $\gamma$  線放出角度依存性の測定結果と先行研究の比較

古賀淳

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験:MC を用いたバックグラウンドの系統誤差の検証

矢野浩大

日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金、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)

文部科学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)

文部科学省科学研究費補助金、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

文部科学省科学研究費補助金、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)

文部科学省科学研究費補助金、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)

文部科学省科学研究費補助金、特別推進研究

ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定

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 三部 勉)

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)

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

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

トップクォークの単一生成と崩壊を用いた時間反転対称性の破れの探索  
研究代表者 織田 勸

文部科学省科学研究費補助金、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)

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究(B)  
FASER 実験における未開拓エネルギー領域でのニュートリノ研究  
研究代表者 音野 瑛俊

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会

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

#### 学部4年生卒業研究

津村 周作、樋口 義清：新しい半導体検出器の開発

松原 俊太：オルソポジトロニウムの寿命測定

川上 実言： $g-2$ /EDM 実験における飛跡再構成シミュレーションの研究

#### 修士論文

- 後藤 輝一 (指導教員 末原 大幹)：深層学習を用いた ILC 崩壊点検出アルゴリズムの開発

- 来見田 将大 (指導教員 吉岡 瑞樹) : J-PARC muon  $g-2$ /EDM 実験における陽電子飛跡検出器の高位置精度組み立ておよびシリコンストリップセンサーの品質保証の研究
- 松本 岳 (指導教員 東城 順治) : COMET 実験 Phase-I 用トリガー検出器の開発
- 荘司 大志 (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耐放射線組立手法の研究
- 矢野 浩大 (指導教員 吉岡 瑞樹) : ソレノイド磁場を用いた中性子寿命測定実験のための宇宙線カウンター開発

## 博士論文

- 古賀 淳 (指導教員 吉岡 瑞樹) : Measurement of angular distribution of  $\gamma$ -rays from neutron-induced compound states of  $^{118}\text{Sn}$  with a pulsed neutron beam
- 大石 航 (指導教員 川越 清以) : Study of Sensitivity to Search for a Charged Lepton Flavor Violating Process

## 学外での学会活動

- 川越
  - 日本学術振興会 : 学術システム研究センター・数物系科学専門調査班・専門研究員
  - 高エネルギー物理学研究者会議 : 高エネルギー委員会委員
  - 高エネルギー物理学研究者会議 : ILC 推進パネル委員 (幹事)
  - 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
  
- 末原  
高エネルギー物理学研究者会議：将来計画委員会委員  
高エネルギー加速器研究機構：素粒子原子核研究計画委員会委員 (幹事)

# 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 》

尾家 道弘    山下 晃弘    上戸 美乃    永友 建蔵

木下 智貴    米澤 弦起

《 学部 卒業研究生 》

松清 洋輝

## 担当授業

福田順一: 非平衡物理学, 統計力学 I・同演習 (, 物理学ゼミナール)

松井淳: 量子統計力学, 基幹物理学 IB 演習, 物理数学 II (, 最先端物理学)

藪中俊介: 力学・同演習, 統計力学 I・同演習 (, 物理学ゼミナール)

## 研究・教育目標と成果

**コレステリックブルー相液晶の光学特性に関する理論的考察** (福田順一)

コレステリックブルー相液晶について, 入射光の反射特性の入射角, 偏光依存性について数値計算に基づく理論的考察を行なった. 幅広い入射角範囲にわたって片方の円偏光した光のみを強く選択的に反射するという, 実験で得られた特性をほぼ完璧に再現, 説明することに成功し, 共同で論文を発表した (大阪大学 吉田浩之講師のグループとの共同研究).

**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行い, 特定の向きを取ることに対する考察を与え, 論文として発表した (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相転移に関する考察** (福田順一)

液晶がネマチック的な秩序（分子の向きが揃っているが重心の並進秩序はない）を持つか、スメクチック的な秩序（分子の向きが揃っているだけでなく重心が層状の秩序を有する）を持つかを、分子シミュレーションの結果得られる局所的な情報から機械学習を用いて判定するスキームを、液晶の相転移の問題に適用した。ネマチック秩序状態から生じるスメクチック秩序の核形成が多段階のプロセスを経ることを見出し、論文を投稿した。（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）

#### **コレステリックブルー相の双晶のシミュレーション** (山下晃弘, 福田順一)

立方対称性を有するコレステリックブルー相液晶が双晶構造を示しうることが実験で明らかになっている。そのような双晶の微細構造を調べるべく連続体シミュレーションによる考察を行い、双晶面を貫く位相欠陥の構造などを明らかにした。

#### **自己無撞着場の手法を用いた高分子の理論** (尾家道弘, 福田順一)

高分子鎖の配位とメソスコピックな相分離構造を結びつける自己無撞着場の手法を用いた高分子の理論について数値実装を行い、簡単な相分離系に対して適用した。

#### **誘電体のヘキサゴナルな構造に関するトポロジカルフォトンクス** (米澤弦起, 福田順一)

液晶薄膜が自発的に形成するヘキサゴナルな構造の光学的性質の理解を目指し、誘電体のヘキサゴナルな構造に関するトポロジカルフォトンクスの理論的検討を開始した。

#### **液晶が示す擬似カシミール力の数値計算** (永友建蔵, 福田順一)

液晶の熱揺らぎ由来の擬似カシミール力を数値計算によって直接的に求めることを目指し、ランジュバン方程式に基づく数値実装の検討を開始した。

#### **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について、粒子ごとにジャンプと次に起こるジャンプとの相関を計算した結果、ジャンプの向きは等方的に分布していることがわかった。

#### **円環分子の固液転移** (上戸美乃, 松井淳)

円環分子は、分子の中心（重心）付近に質量分布がないことが特徴であり、固液転移において重要となる分子間の排除堆積効果小さいため、転移や相構造がどのようなものか興味深い。低温領域で見出される秩序相を判別するため、系全体がずり変形可能なモンテカルロ・シミュレーションを導入した。

#### **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。

#### **Cellular Potts 模型での細胞極性のゆらぎ (藪中俊介)**

細胞集団の集団運動で細胞極性の揺らぎがどのようにおさえられているかは重要な問題である。我々は密集した細胞の集団を Cellular Potts 模型で扱い、形状の揺らぎの強さをコントロールし、細胞極性の揺らぎの性質がどのように変わるかを研究した。(大阪大学 生物学専攻 松下勝義特任助教、藤本仰一准教授との共同研究)

#### **温度勾配下での相分離 (木下 智貴, 藪中俊介)**

温度勾配下での相分離現象を小貫らの Dynamic van der Waals 理論に類似した枠組みで取り扱った。流体方程式を Lattice Boltzmann 法と通常の離散化による拡散方程式の解法を組み合わせ数値的に積分する枠組みを構築した。それにより温度勾配下での相分離ドメインの成長則を調べた。

### **発表論文**

《 原著論文 》

“Directed self-assembly of soft 3D photonic crystals for holograms with omnidirectional circular-polarization selectivity”

S.Y. Cho, M. Takahashi, J. Fukuda, H. Yoshida and M. Ozaki,  
Communications Materials **2** (2021) 39(1–9).

“Lattice orientation of cholesteric blue phases in contact with surfaces enforcing unidirectional planar anchoring”

J. Fukuda and S. Žumer,  
Physical Review Research **2** (2020) 033407(1–11).

“Polarity Fluctuation Inhibition by Memory in Collective Cell Motion”  
K. Matsushita, S. Yabunaka, K. Fujimoto,  
Journal of the Physical Society of Japan **90** 5 (2021) 054801.

“Finite  $N$  origin of the Bardeen-Moshe-Bander phenomenon and its extension at  $N = \infty$  by singular fixed points”  
C. Fleming, B. Delamotte, and S. Yabunaka,  
Phys. Rev. D **102**, 065008 (2020).

《 その他の論文 》

## 講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

福田順一

「液晶の Landau-de Gennes 理論」  
電気学会四国支部主催講演会（2021 年 1 月 28 日，オンライン，**依頼講演**）

福田順一

「キラル液晶薄膜が形成するスカーミオンとその光学的な性質」  
東京都立大学におけるセミナー（2020 年 12 月 3 日，オンライン，**依頼講演**）

山下晃弘，福田順一

「BPI 液晶の双晶の連続体シミュレーション」  
第 126 回日本物理学会九州支部例会（2020 年 12 月 5 日，口頭発表）

山下晃弘, 福田順一

「BPI 液晶の双晶の連続体シミュレーション」

2020 年日本液晶学会オンライン発表会 (2020 年 10 月 30 日, 口頭発表)

藪中俊介, 藤谷洋平

「選択的吸着効果のもとでの毛細管中の臨界点近くの二元混合系の浸透現象」

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

Fleming Claude, Bertrand Delamotte, 藪中俊介

「非摂動繰り込み群による  $O(N)$  模型における Bardeen-Moshe-Bander 現象の有限  $N$  での起源の研究」

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

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

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)

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)

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

福田順一:

令和 2 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: 東京都立大学における集中講義「液晶の物理」 (2020年12月)

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)

## 学部4年生卒業研究

松清 洋輝: (指導教員: 福田順一): ネマチック液晶のパターン形成のスタンダード・モデルとその背景

堀川 貴広: (指導教員: 松井淳): 格子気体を用いた拡散律速凝集

## 修士論文

尾家 道弘: (指導教員: 福田順一): 自己無撞着場理論を利用した高分子系のシミュレーション

山下 晃弘: (指導教員: 福田順一): コレステリックブルー相液晶の双晶の連続体シミュレーション

上戸 美乃：(指導教員：松井淳)：環状分子の固液転移

## 学外での学会活動

福田順一:

SPIE OPTO “Emerging Liquid Crystal Technologies” Program Committee

ソフトマター研究会 運営委員

国際会議 Optics of Liquid Crystals, Program Committee member

## その他の活動と成果

福田順一:

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)

体験入学セミナーにおけるオンライン講演「柔らかいものの物理」

# 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 益子 通生流

《 大学院 修士課程 》

藤村 啓 金子 甲二郎 白石 修一

## 担当授業

中西： 基幹物理学 II, レトリック I(大学院), 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, 量子統計物理学 (大学院)

## 研究・教育目標と成果

### 1. 2次元シートのパッキング構造（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調べた。一辺の長さ  $L = 50 \sim 300\text{mm}$  の多数の正方形の紙を無造作に丸めたものをマイクロ CT にかけて、3次元内部構造を再構成した。一辺の長さ  $L$  とそれを押しつぶした時の慣性半径との間にべき乗則が成り立ち、その指数から質量フラクタル次元  $D_M = 2.7 \pm 0.1$  を得た。また、内部構造のボックスカウンティング解析および質量分布に対するスペクトル強度の示すべき乗則から、構造の質量分布は次元  $2.5 \lesssim d_f \lesssim 2.8$  のフラクタル構造をしていることを示した。異なるサイズの丸めた紙の構造の関係を示す指数  $D_M$  と、それぞれの丸めた紙の質量分布のフラクタル次元  $d_f$  が、データの精度の範囲で一致していることが示された。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、その構造の Hurst 次元が、慣性半径より短いスケールで 0.9 程度、それ以上の領域で 0.5 程度になっていることを示した。

## 2. 非線形磁化率の研究（相場，野村）：

これまで磁化－磁場曲線を数値計算で求めて実験と比べることは盛んになされてきた。また、帯磁率についても同様の研究が行われてきた。本研究ではエネルギーの磁化に対する高階微分を数値的に求め、実験的に得られる非線形帯磁率と対比させる。

## 3. Ashkin-Teller 多重臨界点の研究（守屋，野村）：

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

## 4. Dimer-Trimer モデルと、SU(3) 対称性の研究（益子，守屋，野村）：

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

具体的には、Dimer-Trimer モデルで、相図の一部に3重周期の準長距離秩序（長距離秩序はないが、相関距離が発散）がある臨界領域（Trimer liquid 相）がある。これはパラメーターを動かすと相関距離有限の状態に相転移する。

DMRG を使った先行研究では、Trimer liquid 相の相境界はSU(3) 対称な点とは異なっていると報告されていた。

これについて、共形場理論と繰り込み群を組み合わせたレベルスペクトロスコピーを発展させた方法を用い、数値対角化のデータを解析し直したところ、Trimer liquid 相の相境界はSU(3) 対称な点と一致することを見出した。

## 発表論文

### 《原著論文》

A New Method to Calculate a 2D Ising Universality Transition Point: Application near the Ashkin – Teller Multicritical Point:

S. Moriya and K. Nomura,  
J. Phys. Soc. Jpn. **89** (2020) pp.093001

Method to observe the anomaly of magnetic susceptibility in quantum spin systems:  
N. Aiba, K. Nomura,  
Phys. Rev. B, **102** (2020) pp.134435

Universality Class around the SU(3) Symmetric Point of the Dimer – Trimer Spin-1  
Chain:

T.Mashiko, S.Moriya, K.Nomura,  
J. Phys. Soc. Jpn. **90** (2021) pp.024005

## 講演

《 国内での講演 》

1. 異方的  $S=1/2$  梯子系におけるネマティック TLL 相と周辺相間の相転移：摂動論  
岡本清美, 利根川孝, 野村清英, 坂井徹  
日本物理学会 2020 年秋季大会 (物性)
2. 異方的  $S=1/2$  梯子系におけるネマティック TLL 相と周辺相間の相転移：ユニバーサリティ  
野村清英, 利根川孝, 岡本清美, 坂井徹  
日本物理学会 2020 年秋季大会 (物性)
3. 異方的  $S=1/2$  梯子系におけるネマティック TLL 相と周辺相間の相転移：数値計算  
利根川孝, 岡本清美, 野村清英, 坂井徹  
日本物理学会 2020 年秋季大会 (物性)
4. リング交換相互作用のある三本鎖スピントチューブのスピネマティック液体  
坂井徹, 岡本清美, 利根川孝, 野村清英  
日本物理学会 2020 年秋季大会 (物性)
5. Multicritical point, conformal field theory and duality  
野村 清英  
統計力学セミナー StatPhys Seminar @ UTokyo Hongo

6. 一次元  $S=1$  量子スピン系の  $Z_3$  対称性  
益子通生流, 守屋俊志, 野村清英  
日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年)
7. 1 次元  $S=1$  ボンド交代 次近接 量子スピン系の相転移  
藤村啓, 守屋俊志, 野村清英  
日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年)
8.  $S=1/2$  強磁性-反強磁性ボンド交代鎖におけるネマティック TLL 相：摂動論  
岡本 清美, 利根川 孝, 野村 清英, 坂井 徹  
日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年)
9.  $S=1/2$  強磁性-反強磁性ボンド交代鎖におけるネマティック TLL 相：数値計算  
利根川 孝, 岡本 清美, 野村 清英, 坂井 徹  
日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年)

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

1. 中西 秀、基盤 (C) 代表,  
「2次元シートのパッキング：丸めた紙の構造解析」

## 修士論文

1. 藤村 啓：(指導教員, 野村)：「1 次元  $S = 1$  ボンド交代次近接量子スピン系の相転移」
2. 金子 甲二郎 (指導教員, 中西)：「円形・双子型の井戸中の棒状自己駆動粒子の MD シミュレーション」

## 博士論文

相場 信孝：(指導教員, 野村) “On the anomaly of susceptibility for quantum spin systems”

# 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 》

尾上友紀      河野芳輝

## 担当授業

身の回りの物理学 B (河合伸)、物理数学 I (河合伸)、原子分子の量子力学 (河合伸)、統計力学 II (成清修)、物理学総論 (成清修)、教職実践演習 (成清修)

## 研究・教育目標と成果

### ホール伝導度とフェルミ面の曲率の関係を明らかにした (成清修)

任意の対称性において、金属のホール伝導度をフェルミ面の曲率で表現することを目指してきた。経緯は過去の年次報告に記したとおりで、経過は QIR において速報してきていた。今回、QIR 速報における誤りを修正した完全版を出版した。このテーマについては完結をみた。[原著論文]

### 高温超伝導体が普通の金属ではないことを示した (成清修)

高温超伝導体の正常状態についての研究を間欠的に行ってきたが、その総括を行った。普通のコヒーレントな金属 (フェルミ流体) の枠組みで理解しようとするのは無理で、インコヒーレントな金属と考えるべきであるというのが結論である。次年度は超伝導状態についての総括を行って、高温超伝導体に関する研究を締め括る予定である。[その他の論文]

### 曲がった時空における量子論の圏論的定式化を行いつつある (成清修)

量子論と重力理論の統合は理論物理学の大きな課題である。しかし、本当に量子重力の理論は必要なのか。我々は時空は古典的であり、曲がった時空において量子論が定式化できれば十分であると考えて研究を進めている。どのような意味で十分なのかを、今後数年をかけて説明していく計画である。[その他の論文]

### オンライン授業の教材を公開した (成清修)

オンライン授業のために作成した教材を QIR で公開した。

<http://hdl.handle.net/2324/4061006> 量子統計力学

<http://hdl.handle.net/2324/4354916> 物理学総論

### 発表論文

#### 《 原著論文 》

Fermi-Surface Curvature and Hall Conductivity in Metals

O. Narikiyo

DOI10.7566/JPSJ.89.124701

[arXiv:2011.04421]

#### 《 その他の論文 》

量子臨界点のまわり：インコヒーレント金属

成清修

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/4061018>)

Note on a Categorical Quantum Field Theory

O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/4067296>)

### 学部4年生卒業研究

尾上友紀：(指導教員、成清修)：曲がった時空における量子場への代数的アプローチ

河野芳輝：(指導教員、成清修)：代数的量子論における時間の創発

# 磁性物理学

## 研究室構成員

和田 裕文 教授

光田 暁弘 准教授

《 大学院 博士課程 》

大山 耕平 田邊 巧祐

《 大学院 修士課程 》

松友 寛太 飯森 陸 木下 啓也 仲村 拓哉

《 学部 卒業研究生 》

川本 大雅 白木 陽 矢野 直樹

## 担当授業

熱力学 (和田裕文)、基幹物理学 1B (和田裕文)、物性物理学 I(光田暁弘)、素励起物理学 (光田暁弘)、物理学総合実験 (光田暁弘)、物理学ゼミナール (光田暁弘)

## 研究・教育目標と成果

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

$Gd_5Ge_4$  は 20～60K で強磁性から反強磁性に一次相転移し、さらに 124 K で反強磁性から常磁性に二次相転移することが知られている。一次相転移温度に幅があるのは、強磁性-反強磁性転移が磁場に強く依存するためである。この物質の磁気エントロピー変化は大きな値を示すことが報告されているが、一次相転移であるために 5K 以上の熱ヒステリシスがある。本研究では Gd または Ge を第三元素で置換することによって大きな磁気熱量効果を損なうことなく、一次相転移温度や熱ヒステリシスをコントロールすることを目的としている。現在、Ge を Si や Al で置換しその物性を調べている。Si 置換では一次相転移を保ったまま転移温度が 120～135K まで増加すること、熱ヒステリシスの幅も 2～3 K に減少することを見出した。今後磁気エントロピーの評価も行っていく予定である。

**遍歴電子メタ磁性のホール効果** (和田裕文、田邊巧祐)

磁性体のホール効果は正常ホール効果と異常ホール効果の和で表される。強磁性のホー

ル抵抗の磁場依存性を解析すると強磁性の正常ホール係数や異常ホール係数を評価することができる。一方常磁性のホール効果では正常ホール効果も異常ホール効果も磁場に比例するので、両者をうまく分離するのは難しい。遍歴電子メタ磁性体では同じ温度でも磁場によって常磁性と強磁性の両方が現れるため、ホール抵抗の磁場依存性を解析すると強磁性領域でも常磁性領域でも正常ホール係数を見積もることが可能となる。この考えに基づいて  $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$  のホール効果の解析を行った。また  $\text{CoS}_2$  の強磁性と非磁性のバンド計算による正常ホール係数の理論値も求め、実験との比較を行った。その結果強磁性の正常ホール係数の理論値は実験結果とほぼ一致したが、常磁性では実験値より小さいことが明らかになった。現在その原因を検討している。また  $\text{RCo}_2$  のホール効果についても解析と計算を進めている。

**$\text{Eu}_2\text{T}_6\text{X}_{15}$  (T=Pt, Ni, X=Al, Ga) 系における元素置換および圧力効果** (和田裕文、光田暁弘、大山耕平、仲村拓哉)

非  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型構造の  $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$  において新しく Eu の価数転移が発見された。  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型構造以外では珍しく興味深い。この物質は 1-2-2 系と同じく磁場誘起価数転移を示し、価数転移の特徴は酷似しており、この物質の価数転移を調べることは Eu 系の価数転移をより普遍的な視点から調べることにつながる。今年度はこの物質と同構造で構成元素を変えた  $\text{Eu}_2\text{T}_6\text{X}_{15}$  (T=Pt, Ni, X=Al, Ga) 系に着目し、元素置換及び圧力効果を調べた。  $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$  の Al サイトを Ga で置換していくと 10% 程度で価数転移は急速に消失して  $\text{Eu}^{2+}$  の反強磁性秩序が出現するが、元々  $\text{Eu}^{2+}$  の化合物に着目して、元素置換により格子を縮めた効果を調べた。現時点では元素置換にもかかわらず  $\text{Eu}^{2+}$  の振舞を示し、価数転移の兆候は見いだされていない。今後は圧力効果を含めて広範な条件下で調べ、2-6-15 系において圧力誘起価数転移を見いだすことを目標に研究を進める。

**スピントロニクス現象の圧力効果** (光田暁弘、松友寛太、飯森陸)

スピントロニクス分野に圧力効果の研究手法を導入することを目指して固体電子物性研究室と共同で研究を行っている。今年度の成果は、(1) Ni 薄膜について静水圧力下で異方性磁気抵抗効果の測定を行い、膜厚を薄くしていくと 2 GPa 付近で面内磁気異方性から垂直磁気異方性へ磁化容易軸が大きく変化することを見いだした。このような振舞はパーマロイ (NiFe) 薄膜では観測されず、Ni の磁歪が密接に関係していることがうかがえる。更に基板の Si と Ni 膜とのヤング率差が効いている可能性も考えられる。(2) Pt/CoFeB 二層膜において、静水圧力下で強磁性共鳴 (FMR) を安定的に誘起して観測することに成功した。それに伴ってスピン流が発生し、圧力の増加とともにスピン流が増加する様子を観測することができた。圧力によるスピン流の制御ならびにナノスピン素子の特性制御の可能性を高める成果が得られた。(3) CoFeB/Ag/Bi 三層膜において、Ag/Bi 界面の凹凸を抑制した良質な膜の作製に成功した。この三層膜においてはラシュバ-エデルシュタイン効果やその逆効果が起こることが報告されており、今

後、これらの圧力効果の研究を進めていく。(4) スピンナノ素子の圧力下磁化測定をより簡便に実現するために、試料振動型磁束計 (VSM) に小型軽量化した圧力セルを取り付けて磁化測定を試みた。その結果、VSM でも問題なく測定できるようになった。今後、(1) で調べた Ni 薄膜の圧力下磁化測定を進めていく。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

Evolution of lattice coherence in the intermediate-valence heavy-fermion compound  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  studied by point contact spectroscopy:

Masanobu Shiga, Isao Maruyama, Kengo Okimura, Takuro Harada, Takuya Takahashi, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yuji Inagaki, and Tatsuya Kawae, *Phys. Rev. B*, **103** (2020) pp. L041113-1-6

Lattice instability coupled with valence degrees of freedom in valence fluctuation compound  $\text{YbPd}$ :

Satoshi Tsutsui, Takumi Hasegawa, Akihiro Mitsuda, Masaki Sugishima, Kohei Oyama, Masaichiro Mizumaki, Norio Ogita, Hirofumi Wada, and Masayuki Udagawa, *Phys. Rev. B*, **102** (2020) pp. 245150-1-9

Ga Substitution Effect on the Valence Transition of  $\text{Eu}_2\text{Pt}_6\text{Al}_{15}$ :

Kohei Oyama, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yasuo Narumi, Masayuki Hagiwara, Ryunosuke Takahashi, Hiroki Wadati, Hiroyuki Setoyama, and Koichi Kindo, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **89** (2020) pp. 114713-1-7

Valence Transition of  $\text{EuRh}_2\text{Si}_2$  Studied by Synchrotron Mössbauer Spectroscopy:

Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Ryo Masuda, Shinji Kitao, Makoto Seto, Yoshitaka Yoda, and Hisao Kobayashi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **89** (2020) pp. 104703-1-5

Temperature-induced valence transition in  $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  investigated by high-energy resolution fluorescence detection X-ray absorption spectroscopy:

Ryohei Shimokasa, Naomi Kawamura, Takayuki Matsumoto, Koki Kawakami, Taku Kawabata, Gen Isumi, Takayuki Uozumi, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Masaichiro

Mizumaki, Kojiro Mimura,  
Rad. Phys. Chem. **175** (2020) pp.108150-1-4

Pressure Effects on Magnetic and Transport Properties in CoFe-Based Spin Valve:  
Akihiro Mitsuda, Motoki Kaneda, Kanta Matsutomo, Takashi Kimura, Hiromi Yuasa,  
Mater. Trans. **61** (2020) pp. 1483-1486

## 講演

《国内での講演》

点接合分光法を用いた  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の混成ギャップの観測:

志賀雅亘, 丸山勲, 沖村健吾, 原田琢良, 高橋拓也, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン, 2021 年 3 月

1-2-2 系 Eu 化合物  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の弾性特性:

宗木直茂, 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 76 回年次大会, オンライン, 2021 年 3 月

$\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  における点接合分光法を用いた電子状態測定:

高橋拓也, 志賀雅亘, 原田琢良, 光田暁弘, 丸山勲, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也

第 126 回日本物理学会九州支部例会, オンライン, 2020 年 12 月

CoFeB/Ag/Bi 三層膜における磁気抵抗効果とその圧力依存性:

飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇

The 25th symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, オンライン, 2020 年 11 月

点接合分光法を用いた  $\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  の電子状態測定:

高橋拓也, 志賀雅亘, 原田琢良, 光田暁弘, 丸山勲, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也

日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月

点接合分光法を用いた価数秩序物質 YbPd の近藤共鳴状態の観測:

志賀雅亘, 沖村健吾, 高田弘樹, 光田暁弘, 丸山勲, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也

日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月

点接合分光法を用いた近藤格子系  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の混成ギャップの観測:

志賀雅亘, 沖村健吾, 原田琢良, 高橋拓也, 丸山勲, 光田暁弘, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也

日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月

超音波測定による 1-2-2 系 Eu 化合物  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の弾性特性: 穴木直茂, 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

日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月

高分解能蛍光検出 X 線吸収分光による  $\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  ( $x = 0, 0.1$ ) の電子状態の研究:

田村浩太郎, 下笠諒平, 井角元, 井上賢太, 河村直己, 水牧仁一郎, 光田暁弘, 和田裕文, 魚住孝幸, 三村功次郎

日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月

共鳴硬 X 線光電子分光による  $\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  の電子状態の研究:

井上賢太, 田村浩太郎, 井角元, 柴垣善則, 保井晃, 雀部矩正, 水牧仁一郎, 河村直己, 池永英司, 筒井智嗣, 佐藤仁, 光田暁弘, 和田裕文, 魚住孝幸, 三村功次郎

日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

一次相転移を利用した液体水素～窒素温度領域における磁気冷凍材料の開発  
研究代表者：和田裕文

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

スピナノ素子の圧力効果研究の確立

研究代表者：光田暁弘

## 他大学での研究と教育

光田暁弘：兵庫県立大学理学部で集中講義を行った。

## 学部4年生卒業研究

川本大雅：(指導教員、光田暁弘)：価数転移物質  $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  の単結晶作製  
白木 陽：(指導教員、和田裕文)： $\text{Gd}_5\text{Ge}_4$  の磁気熱量効果における Si 置換の影響  
矢野直樹：(指導教員、光田暁弘)：高圧実験に向けた強磁性磁歪材料の磁気特性評価法の開発

## 修士論文

松友寛太：(指導教員、光田暁弘)：ナノ構造磁性体における磁気特性の圧力変化に関する研究

## 博士論文

大山耕平：(指導教員、和田裕文、光田暁弘)：Study on Valence Instabilities in Yb- and Eu-based Compounds.

## 学外での学会活動

光田暁弘：日本物理学会 領域8 運営委員

## 受託研究・民間との共同研究

大電株式会社との磁気ヒートポンプ材料の開発に関する共同研究

## その他の活動と成果

和田裕文：Elsevier 社 Physica B エディター  
和田裕文：九州大学理学研究院長，理学府長，理学部長  
光田暁弘：九州大学低温センター運営委員  
光田暁弘：九州大学超伝導システム科学研究センター運営委員

# 量子微小物性 A,B

## 研究室構成員

渡部行男 (量子微小物性 A) 教授

荒井毅 (量子微小物性 B) 准助教

《 訪問研究者 》

客員教授 藤澤浩訓

## 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)  
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。

ウィールス蔓延のためオンラインで講義した  
今年度の電磁気学 II は、地球惑星科学科の受講者 3 名。

————— 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、SrTiO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>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。

SrTiO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>の電子層の報告は、我々のBaTiO<sub>3</sub>表面の分極不連続での電子層の3年後である。SrTiO<sub>3</sub>は、LaAlO<sub>3</sub>を載せると表面が歪により、強誘電体になるので、SrTiO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>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、SrTiO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>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、現在のデータを見ると、

「酸素欠陥とLa混入によるSrTiO<sub>3</sub>表面の導体化」+ 「分極不連続」+ 「SrTiO<sub>3</sub>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 154 回

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

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

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

渡部のこの理論予想を直接示すため、超高真空中で、強誘電体の表面を原子レベルに制御し、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 127 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 184 回

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 57,R5563(1999) 被引用 109 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 692 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 47回

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

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

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

成立特許4件(2014-2016年)

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

[今年度の各テーマの説明]

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

また、PCを用いる研究(第一原理計算)で、上記の課題の解明に取り組んだ。

(1) 強誘電体酸化物の相転移での伝導異常の解明:

従来、BaTiO<sub>3</sub>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:

BaTiO<sub>3</sub>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 BaTiO<sub>3</sub> の表面伝導を測定し、支持する結果を得ている。

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

以下の (3) の結果と総合して、原子レベルで制御した強誘電体酸化物の表面電子層の物性解明することを予定している。

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

(3) 超高真空 AFM による表面研究：

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

第一原理計算で、以下の発表論文リストにあるような計算を行った。

特に、超高真空 A の表面の実験は、BaTiO<sub>3</sub>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、BaTiO<sub>3</sub> と SrTiO<sub>3</sub> 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、BaTiO<sub>3</sub> 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次元の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, Examination of Permittivity for Depolarization Field of Ferroelectric by Ab initio Calculation, Suggesting Hidden Mechanisms, Scientific Reports, 10.1038 (2021)

Y Watanabe, Breakdown of ion-polarization-correspondence and born effective charges: Algebraic formulas of accurate polarization under field, Physical Review Materials 4.104405(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

予定した招待講演がウィールス蔓延のため中止

Y. Watanabe, Breakdown of ion-polarization-correspondence & born effective charge- Algebraic formulas of accurate polarization under field , Fundamental Physics of Ferroelectrics(2021, USA Online).

《国内での講演》

Y. Watanabe, 強誘電体の反電場に用いる誘電率の値と隠れた機構, 応用物理学会 春季大会

Y. Watanabe, 電場中の正確な分極を与える代数式：従来の「イオン位置-分極対応とボルン有効電荷」の修正, 応用物理学会 春季大会

Y. Watanabe, 揺らぎの無い場合の基底状態としての SrTiO<sub>3</sub> の強誘電性, 応用物理学

会 秋季大会

Y. Watanabe, SrTiO<sub>3</sub>-BaTiO<sub>3</sub> 系の自発分極を格子パラメーターから精密に求める半経験的代数式 , 応用物理学会 秋季大会

Y. Watanabe, 強誘電体の第一原理計算の精度の基準の提案 及び 応力歪による分極増加の改定 , 応用物理学会 秋季大会

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

———— 量子微小物性 A 渡部 —————

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

## 学外での学会活動

———— 量子微小物性 A 渡部 —————

Integrated Ferroelectrics 誌 編集委員

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

## 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 》

Shaojie Hu

《 大学院 博士課程 》

Md. Kamruzzaman      Amany E. Harby

《 大学院 修士課程 》

Hossain Towfiq      Zheng Gang      松田亮      屋富祖稔

宮崎圭司      須小遼河      河邊怜也      岩堀拓真

大日方初良      高山裕成      鍋島すみれ      中田巧

《 学部 卒業研究生 》

愛智遼太郎      公田悠樹      榎本浩克      溝上航平

新田晴海

## 担当授業

電磁気学 I・同演習 (木村崇)、基幹物理学 IA (木村崇)、基幹物理学 IB (木村崇)、基幹物理学 IB 演習 (木村崇)、物理学概論 B (木村崇)、基礎物理実験学・同実験 (大西紘平)、素励起物理学 (大西紘平)、自然科学総合実験 (大西紘平、山田和正)、物理学総合実験 (山田和正)

## 研究・教育目標と成果

**動的スピン注入における強磁性共鳴発熱効果の寄与** (木村崇、大日方初良)

強磁性体/非磁性体の二層構造において強磁性体に FMR が誘起されると、強磁性体から非磁性体にスピン流が注入される動的スピン注入という現象がある。こ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、強磁性共鳴発熱効果もそのメカニズムの一因となると考えられている。しかしながら、どちらも FMR 時に生じる効果であることから、明確に分離することが困難であるとされてきた。そこで、強磁性体/非磁性体/強磁性体という独自の構造において動的スピン注入実験を行うことで、

動的スピン注入における強磁性共鳴発熱効果の寄与を明確に指摘することに成功した。

#### **s 波超伝導体におけるスピン偏極準粒子の緩和機構解明** (大西紘平、岩堀拓真)

超伝導転移温度近傍で存在する”超伝導準粒子”は、ある一定時間で通常の超伝導のキャリアであるシングレットクーパー対に緩和することが実験的に知られているが、その詳細な機構は明らかではない。そこで本研究では、超伝導体/強磁性体複合構造を用いたスピン偏極準粒子注入によって、準粒子緩和機構の解明を目指している。

#### **有機物中の熱スピン流の探索** (山田和正)

有機物中の熱スピン流を探索している。CoFeB をスピン流生成層、カーボンをスピン流通過層、Pt をスピン流検出層とする膜を成膜し、クロスバー構造に微細加工し、素子を作成した。現在のところ、スピン偏極電流に起因する信号は得られていない。界面の改良が必要だと分かった。熱スピン流を生成させるために、有用な材料としてスピギャップレス半導体 CoFeMnSi がある。CoFeMnSi の異常ホール効果の測定を行い、輸送特性を評価した。

#### **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分かっており、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。二本の強磁性体 CoFeAl 細線を Cu 細線で橋渡しした横型スピバルブ構造を作製した。二本の CoFeAl の磁化の平行、反平行によって変化するゼーベック電圧の観測に成功し、各種の定量的な解析の結果、得られた信号は、スピン依存ペルチェ効果に起因した信号変化が妥当であると結論付けた。

### **発表論文**

#### 《 原著論文 》

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

Md Kamruzzaman, S.Hu, K.Ohnishi and T.Kimura,

Appl. Phys. Express., **14** (2021) pp.073004

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

S. Obinata, K. Ohnishi, and T. Kimura,  
Appl. Phys. Lett., **118** (2021) pp.152401

Signature of spin-dependent Seebeck effect in dynamical spin injection of metallic bilayer structures:

Kazuto Yamanoi, Minoru Yafuso, Keishi Miyazaki and Takashi Kimura,  
J. Phys. Mater., **3** (2020) pp.014005

Asymmetric nonlocal signal induced by thermoelectric effects in a lateral spin valve:

N. Asam, T. Arika, 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) pp.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 》

Influence of Ferromagnetic-Layer Thickness on Dynamical Spin Injection:

S. Obinata, K. Miyazaki, K. Ohnishi, and T. Kimura,  
65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2020), online,  
(November 2020)

Transport properties in submicron Nb superconducting wire with ferromagnetic electrode:

K. Ohnishi, T. Iwahori, D. Yano, and T. Kimura,

New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS) 2020, Kashiwa, Japan (February 2020)

《国内での講演》

Nb系超伝導細線における電荷およびスピン不均衡状態の観測:

大西紘平, 岩堀拓真, 木村崇

Spin-RNJ 若手オンライン研究発表会, オンライン (2020年6月)

動的スピン注入における FMR 加熱効果の影響:

大日方初良, 公田悠樹, 榎本浩克, 大西紘平, 木村崇

第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25), オンライン (2020年11月)

超伝導 Nb 細線におけるスピン偏極準粒子の緩和過程:

岩堀拓真, 溝上航平, 松田亮, 大西紘平, 木村崇

第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25), オンライン (2020年11月)

CoFeB/Ag/Bi 三層膜における磁気抵抗効果とその圧力依存性:

飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇

第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25), オンライン (2020年11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強磁性体膜厚依存性:

大日方初良, 宮崎圭司, 屋富祖稔, 大西紘平, 木村崇

日本物理学会 2020年秋季大会 (2020年9月)

超伝導 Nb 細線におけるスピン偏極準粒子の緩和過程:

岩堀拓真, 松田亮, 大西紘平, 木村崇

日本物理学会 2020年秋季大会 (2020年9月)

横型スピバルブ構造素子を用いたスピネルンスト効果の電氣的検出:

松田亮, 須小遼河, 大西紘平, 木村崇

日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月)

微分強磁性共鳴法を用いた動的磁化特性の非線形性評価:

高山裕成, 大日方初良, 屋富祖稔, 宮崎圭史, 木村崇

日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月)

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (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

文部科学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

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

トリプレット超伝導電流におけるスピン偏極率の電気伝導測定

研究代表者：大西 紘平

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

有機スピンゼーベック素子の創成

研究代表者：山田 和正

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

戦略的創造研究推進事業 CREST

界面マルチフェロイク材料の創製

主たる共同研究者：木村 崇

## 修士論文

鄭剛 (ZHENG GANG) : (指導教員、木村崇) : Study of Magnetic Properties of 2D  $\text{Cr}_{2x}\text{Ge}_{4-2x}\text{Te}_6$  by Magnetic Proximity Effect

屋富祖稔 : (指導教員、木村崇) : 層間結合した強磁性体多層膜におけるスピンドイナミクスに関する研究

河邊怜也 : (指導教員、木村崇) : 磁性体/白金 二層膜における磁気・熱伝導特性に関する研究

松田亮 : (指導教員、木村崇) : 横型スピバルブを用いたスピネルnst効果の検出

須小遼河 : (指導教員、木村崇) : 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

HOSSAIN TOWFIQ : (指導教員、木村崇) : Numerical and Experimental Study on Spin Dynamics of Magnetic Vortex System

# 複雑物性基礎

## 研究室構成員

木村 康之 教授  
稲垣 紫緒 准教授  
植松 祐輝 助教

《 博士研究員 》

《 大学院 修士課程 》

林 和気 満生 明輝

《 学部 卒業研究生 》

井上 颯大 山科 スミレ 山口 雅也 野見山 直弥  
辻村 翔輝 米田 翔一

《 研究生 》

## 担当授業

物理学の進展 (木村康之)、物理学ゼミナール (木村康之)、振動と波動 (木村康之)、物理学総合実験 (植松祐輝)、電磁気学1・同演習 (植松祐輝)、最先端物理学 (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 》

- 様々なコロイド粒子の作成や、その集合的挙動および集合系の物性を解明することを目指した。(1)
- 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目指した。(3)

- 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。(2, 3)
- 電解質溶液の界面物性と電気物性を解明することを目指した。(4, 5)
- 粉粒体のバンド構造や局所構造の解明を目指した。(8)
- 粉粒体を充填した回転円筒容器内に生じる対流現象に関する実験的研究。(9)
- 障害物周りの二次元斜面流の流れ場測定。(10)
- 粉粒体の安息角が底面の粗さや山のサイズにどのように依存して変わるかを調べる実験的研究。(11)
- 気泡分散系の動力学に関する実験的研究。(7)
- 空気水界面の表面張力の精密計測。(6)

(1) **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。

(2) **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。

(3) **差分動的顕微鏡の開発と空間的不均一性のある流体の局所粘性測定** (野見山、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。

(4) **電解質溶液の界面物性の研究** (植松)

電解質溶液の気液界面の表面張力とゼータ電位、閉じ込められた系における

誘電物性や輸送物性などの理論的研究に取り組んだ。特に、鏡像力が電解質溶液の表面張力において、どの程度、本質的かを明らかにするためにモンテカルロ・シミュレーションと平均場理論との比較に取り組み、鏡像力以外にも界面とイオンとの間の斥力がなければ、実験結果を再現できないことを明らかにした。

- (5) **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)  
水とアルコールの混合系において、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。水とイソプロパノールの系が、室温付近で相分離することを再現し、この系での電気二重層の構造を今後、調べていく。
- (6) **空気水界面の表面張力の精密計測** (植松、木村)  
表面張力を精密に計測するために、毛管法と最大泡圧法の計測系の構築に取り組んだ。毛管法は、濡れ膜の影響により、表面張力を精度良く計測することはできないことが明らかとなったため、水平型の顕微鏡とシリンジポンプと圧力センサーを含んだ流体配管系を構築し、最大泡圧法による表面張力精密測定の前準備をした。今後は、毛管先端の $z$ 位置制御のための特殊セルを設計することに取り組む。
- (7) **気泡分散系の動力学に関する実験的研究** (井上、木村、植松)  
マイクロスケールの気泡分散系の顕微鏡観察をすることで、気泡分散系が従うオストワルト熟成の動力学を発見し、そのメカニズムを検討した。その結果、バブル数が時間に対して、ベキ則で減少することが明らかになった。今後は、個別気泡のダイナミクスの抽出や、気泡径分布関数の実験的な計測に取り組んでいく。
- (8) **回転円筒容器における粉体の相分離現象の研究** (辻村、稲垣、木村)  
水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体を入れ、回転させたときに観察されるサイズ分離現象について、実験を行った。従来、粉体のサイズ分離現象は、動的安息角に有意に差のある粒子の組み合わせのときによく観察されると思われていたが、実際には動的安息角に差がなくても粉体粒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**（米田、稲垣、木村）

水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体をほぼ完全に充填して回転させると、サイズ分離によって形成された粒子の縞模様が非常にゆっくりと円筒容器の軸に沿って動くことが分かっている。この非常にゆっくりとした縞模様の動きが、サイズ分離によって駆動されているかどうかを検証するために、単一の粒子を用いて、二重円筒に高充填に封入した粒子の流れ場を測定した。粒子が拡散しながらも、着色した粒子のドメインがほぼ左右対称に動いていることが分かった。また、その速度は、サイズ分離した縞模様の速度と同程度であり、縞模様のダイナミクスはサイズ分離とは独立に駆動されていることを示唆する結果を得た。今後は、このゆっくりとした流れがどうやって駆動されるのか、そのメカニズムの解明を目指して引き続き実験を行う。

(10) **粉粒体の障害物周りの流れ場に関する実験的研究**（山口、稲垣、木村）

非常事態に、建物から大勢の人が急いで避難しようとするときに、狭い入り口付近で人が詰まって出にくくなるという現象がある。動物の群れが囲いから出る時にも、同様の流れの詰まりがおきる。この時に、出口付近に障害物を置くことで、詰まりを置きにくくすることが実験的に知られている。モデル系として、2次元の斜面流で障害物が及ぼす流れ場への影響を実験的に行った。障害物の大きさや出口からの距離に依存して、粒子の排出速度が変わることを確認した。今後は、障害物が流れ場に及ぼす影響をより定量的に調べ、流れの詰まりが解消されるメカニズムを明らかにしたい。

(11) **粉粒体の安息角に関する実験的研究**（山科、稲垣、木村）

粉粒体を平面に注ぐと、ある一定の角度を保って斜面を形成する。その角度を安息角というが、一般にはそれぞれの粒子の物性値の一つとして知られて

いる。我々の実験で、この安息角が山のサイズや、底面の床のざらつき具合によって変わることが分かった。先行研究においては、安息角の山のサイズ依存性は詳しく調べられておらず、床の影響がどの程度山が大きくなっても残るのか、今後系統的にパラメータを振って実験を行う。

#### 《 来年度の目標 》

研究 (1 - 11) のさらなる発展、及び教育の充実。

#### 発表論文

##### 《 原著論文 》

1. Consistent description of ion-specificity in bulk and at interfaces by solvent implicit simulations and mean-field theory, Alexandre dos Santos, Yuki Uematsu, Alexander Rathert, Philip Loche, and Roland Netz, J. Chem. Phys. **153**, 034103 (2020). doi:10.1063/5.001610
2. 「ネマチックコロイド」, 木村康之; 液晶,**24** (2) pp.88-96 (2020).
3. 「電気泳動光散乱法の基礎と展開」, 木村康之; ソフトマター, 2020年10月号 pp.10-13 (2020).

#### 講演

##### 《 海外での講演 》

1. Is the origin of the negative surface charge of hydrophobic water surface OH ion adsorption? (Oral Presentation) Yuki Uematsu (17th Australia Japan Colloids Symposium 2020, 2020年09月18日)

##### 《 国内での講演 》

1. 液晶マイクロスイマー, 木村康之, 日本液晶学会ソフトマターフォーラム講演会 (オンライン, 招待講演) (2020年10月24日)

2. 光渦で駆動された流体相互作用する粒子系が示すリズム運動, 木村康之, 研究会「光の軌道角運動量の発生機構と物質相互作用の理解」(オンライン, 招待講演) (2021年3月5日)
3. 疎水性表面のマイナス電荷はOHイオンの吸着なのか?, 植松祐輝, 岡山大学甲賀グループセミナー (2020年7月7日)
4. カーボンナノチューブ中の電解質溶液の電気伝導の濃度に関するスケーリング理論, 植松祐輝, 第71回コロイドおよび界面化学討論会(オンライン)書込形式 (2020年9月14-16日)
5. カーボンナノチューブ中の電解質溶液の電気伝導の濃度に関するスケーリング理論, 植松祐輝, 日本物理学会秋季大会(オンライン)口頭 (2020年9月9日)
6. カーボンナノチューブ中の電解質溶液の電気伝導の濃度に関するスケーリング理論, 植松祐輝, 西日本非線形研究会(オンライン)口頭 (2020年7月18日)
7. 粉粒体のサイズ分離現象稲垣紫緒, 日本物理学会秋季大会(オンライン)口頭 (2020年9月9日)  
 《第126回日本物理学会九州支部例会, オンライン, 2020年12月5日》
8. 長方形キャピラリー中のマイクロバブル分散系の粒径分布と時間変化, 井上颯大、木村康之、植松祐輝
9. ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド分散系の3次元解析, 満生明輝、植松祐輝、木村康之
10. 差分動的顕微鏡を用いた複雑液体のダイナミクス測定, 野見山直弥、田旗栄太、植松祐輝、木村康之
11. 液晶マイクロスイマーの運動, 林和気、植松祐輝、木村康之
12. 二次元粉体流における障害物の影響山口 雅也、稲垣紫緒
13. 粉粒体の安息角に対する障害物の影響山科 スミレ、稲垣紫緒
14. 回転円筒容器における単分散粉体系の対流現象米田 翔一、稲垣紫緒
15. 円筒容器内の粉体分離現象における回転速度依存辻村 翔輝、稲垣紫緒

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究(C)

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

文部科学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粃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

文部科学省科学研究費補助金、国際共同研究加速基金 (B)

多彩な環境応答を示す溶媒誘起力の解明：理論・実験融合研究

研究代表者：甲賀研一郎 (岡山大学)

研究分担者：植松祐輝

文部科学省科学研究費補助金、若手研究

電荷を帯びた微量成分に基づく疎水性界面での表面電荷の起源の解明

研究代表者：植松祐輝

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

顕微イメージングを用いた非平衡ソフトマター不均一系の局所力学応答測定

研究代表者：木村康之

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》

## 他大学での研究と教育

### 学部4年生卒業研究

井上 颯大：(指導教員、植松祐輝・木村康之)：

マイクロバブル分散系の粒径変化とオストワルト熟成

野見山 直哉：(指導教員、木村康之)：

差分動的顕微鏡法を用いたマイクロレオロジーの研究

米田 翔一：(指導教員、稲垣紫緒)：

回転円筒容器における単分散粉体系の対流現象

山科 スミレ：(指導教員、稲垣紫緒)：

粉粒体の安息角に対する障害物及び床の影響

辻村 翔輝：(指導教員、稲垣紫緒)：  
円筒容器内の粉体分離現象における回転速度依存  
山口 雅也：(指導教員、稲垣紫緒)：  
二次元粉体流における障害物の影響

## 修士論文

### 学外での学会活動

散乱研究会運営委員 (木村)  
ソフトマター研究会運営委員 (木村)  
Optics of Liquid Crystal 21 運営委員 (木村)  
日本物理学会若手奨励賞領域12 審査委員長 (木村)  
日本液晶学会物理物性フォーラム委員 (木村)  
界面動電現象研究会役員 (植松)

### その他の活動と成果

第5回福井謙一奨励賞 受賞 (植松)  
九州大学 理学部ニュース インタビュー (植松)

# 複雑流体

## 研究室構成員

前多 裕介 准教授

《 博士研究員 》

福山 達也

《 大学院 博士課程 》

別府 航早 坂本 遼太

《 大学院 修士課程 》

賀屋 紘典 萩原 宙 加藤 修三 白井 瑞穂

荒木 駿也 巖 路燦

《 学部 卒業研究生 》

繁田 和幸

## 担当授業

生物物理学（前多）、基礎物理学実験・同演習（前多）、国際科学特論1（前多）

## 研究・教育目標と成果

### 1. アクティブゲルと細胞内配置対称性に関する研究（前多、坂本）

細胞はエネルギーを消費し、秩序だった構造を維持しながら、動き、変形する複雑な分子システムである。このようなダイナミクスの根幹となる概念が「対称性」である。対称性は花々の花卉、昆虫や動物の左右対称性、そして原子分子のカイラル対称性まで、広く自然界に満ち溢れている。生命の基本単位である細胞の対称性も、その内部構造の配置、細胞運動や細胞分裂、さらには分化する細胞の運命をも決定する。ある種の細胞では、アクチン細胞骨格とミオシン分子モーターの複合体（アクトミオシン）が細胞内の配置対称性を制御することが知られていたが、そのメカニズムは十分理解されていなかった。

この問題を解決する鍵は、細胞がもつ対称性の制御の本質を失わず、細胞の複雑性を軽減した人工細胞モデルを用いることにある。我々は人工細胞モデルの構築技術を確立し、対称性の決定機構を理解するためにアクトミオシンを細胞サイズの液滴に封入した。すると、人工細胞の端から中央へ収縮しながら伝搬するアクトミオシン波が

起こり、細胞核のようなクラスターを中央へ運ぶことがわかった。一方で、人工細胞の縁とクラスターの間形成されたアクトミオシン・ブリッジはクラスターを縁に引き寄せて「配置対称性の破れ」を引き起こすことがわかった。以上の結果から、アクトミオシン波とアクトミオシン・ブリッジは綱引きのようにクラスター位置を制御し、波の周期とブリッジ形成にかかる時間の大小関係で配置箇所が決まるという新規メカニズムを解明した。本研究は Nature Commun. (論文1) に掲載され、理学部ニュースなどに取り上げられる等の注目を浴びる成果となった。

## 2. アクティブマターの集団運動と幾何法則の研究 (前多、別府、荒木)

自律的に動く要素 (アクティブマター) が多数あつまると、運動方向の相関が長距離にわたって持続する集団運動が出現する。代表的なアクティブマターであるバクテリアは、高密度の集団において擬2次元平面内で大小さまざまな渦構造が入り乱れる乱流様の運動を示す。この懸濁液を円形境界のもとにおくと渦運動が出現し、複数の渦が接すると回転方向が揃う相や交互に入れ替わる相が出現する。しかし、相互作用する渦の回転方向の遷移に関する明確なルールは明らかにされておらず、本研究では境界形状を自在に設計する新たな手法を開発し、集団渦運動の転移に関わる幾何法則の解明を行った。

バクテリア *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 は代表的なアクティブマターであり、これを用いて集団運動の幾何学的な制御をおこなった。バクテリア懸濁液をマイクロウェルに封入し、再現性の高い実験が可能となった。この実験系で幾何学的制約下のバクテリア集団運動を解析したところ、渦の回転方向が一方向に揃う「キラル渦運動」が出現することがわかった。この詳細なメカニズムを理論モデルと共に明らかにし、論文投稿を行った (論文2)。現在はバクテリア以外にも、キネシン分子モーターに運ばれる微小管の集団を用いた幾何的制御にも取り組んでいる。特に、分子モーターに駆動される微小管の集団運動は配向相互作用がネマチック相互作用となるため渦形成とは異なる集団運動パターンとなる。しかし理論的には同様の幾何法則で集団運動を制御できると予測されるため、実験と数値計算による検証を進めている。

## 3. 非平衡系の流れと集団運動の研究 (前多、福山)

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。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た (論文

3)。これを生命現象に展開し、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、細胞集団にお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、学術雑誌に投稿を行った（論文 4）。

#### 4. 細胞質溶液の液液相分離現象の研究 (前多、加藤)

細胞はタンパク質や DNA、脂質膜などの柔らかい物質群からなる複雑なシステムである。細胞内部では多種多様な生化学反応の制御を行い、細胞膜界面では形状変化等の環境応答が行われるが、これらのダイナミクスを支えるのはソフトマター特有の自発的な秩序形成である。これまでに、ソフトマターの時空間構造形成のメカニズムの究明は、主として単純な分子を用いた理想的な径で研究が行われてきたが、近年の微細加工技術の進展により我々は細胞サイズの空間を構築し細胞内現象を再構成する人工細胞研究を可能とする技術を開発して来た。本研究では、タンパク質合成活性を保持する細胞抽出液を細胞サイズの油中水滴に封入した人工細胞を構築することに成功した。この系においては、人工細胞が濃縮によって自発的に内部で液滴を生成し、その内容液のタンパク質成分が二相に分離する液液相分離現象を発見した。これまで二成分高分子溶液での相分離現象は知られていたが、その構成要素は実に単純で細胞内現象を反映するかという問題が伴っていた。しかし我々の実験により、細胞内環境に近い反応活性を持つ複雑溶液での初めての実証となり、細胞内現象と相分離現象をつなぐ新しいモデル系と位置付けることができる。

重要なことに、我々が示した人工細胞系での相分離現象は、近年報告が相次ぐ「細胞内の液液相分離現象」と密接な関係があると期待される。人工細胞内に生成される液滴が特定の分子を格納・濃縮することで細胞内の構造形成や反応制御を担う重要な構造体であることを明らかにし、論文として発表を行った（論文 5）。

## 発表論文

### 《原著論文》

1. Sakamoto R, Tanabe M, Hiraiwa T, Suzuki K, Ishiwata S-i, Maeda YT, and Miyazaki M

Tug-of-war between actomyosin-driven antagonistic forces determines the positioning symmetry in cell-sized confinement

Nature Communications, **11** (2020), 3063

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

Edge current and pairing order transition in chiral bacterial vortices

arXiv:2002.01247, now published in Proc. Natl. Acad. Sci. USA

3. Fukuyama T, Maeda YT

Optothermal diffusiophoresis of soft biological matters: From physical principle to molecular manipulation

Biophysical Reviews, **12** (2020), pp 309-315

4. Fukuyama T, Ebata H, Kondo Y, Kidoaki S, Aoki K, and Maeda YT

Why epithelial cells collectively move against a traveling signal wave

arXiv:2008.12955

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

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

arXiv:2101.05184, now published in Biomacromolecules

6. Yan L, Fukuyama T, Yamaoka M, Maeda YT, and Shimamoto Y

Examining the assembly pathways and active microtubule mechanics underlying spindle self-organization

arXiv:2011.14592

### 《その他の論文》

7. 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** (2020), pp 13-18

8. 坂本遼太, 前多裕介  
構成的アプローチで探る「発動する人工細胞」の設計原理  
化学と工業 **73(6)** (2020), pp 463-465

## 講演

### 《 海外での講演 》

Yusuke T. Maeda

Understanding symmetry breaking induced by cell-sized compartments: a minimal cell approach.

International Workshop: From Soft Matter to Protocell 2020, Online Zoom webinar,  
2020年10月29日

### 《 国内での講演 》

福山達也, 菊池幸祐, 上野隆史, 前多裕介

タンパク質ニードルの末端間相互作用と2次元表面上における集団秩序形成  
日本物理学会 第76回年次大会, 2021年3月15日

白井瑞穂, 前多裕介

温度勾配下における核酸高分子とペプチドの相分離液滴  
日本物理学会 第76回年次大会, 2021年3月15日

加藤修三, 前多裕介

非平衡界面が誘起するセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象  
日本物理学会 第76回年次大会, 2021年3月15日

萩原宙, 前多裕介

回転する弾性バブルの振動現象  
日本物理学会 第76回年次大会, 2021年3月12日

坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介

対称性の破れと界面摩擦が駆動するアクトミオシン液滴の自発運動

日本物理学会 第76回年次大会, 2021年3月12日

別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介

遊泳バクテリア集団が示すキラルなエッジカレントと秩序渦の制御原理

日本物理学会 第76回年次大会, 2021年3月12日

Kazusa Beppu

Chiral edge current and pairing order transition in the bacterial vortices

アクティブマター研究会 2021, 2021年1月22日

Ryota Sakamoto

Symmetry-breaking induced adhesion-independent motility of actomyosin droplets under confinement

アクティブマター研究会 2021, 2021年1月22日

前多 裕介

高分子共存系の非平衡現象と生命システムへの展開

新潟大学化学科集中講義セミナー, オンライン, 2020年10月29日

前多 裕介

Gene expression and artificial cells: Revisiting the role of interface

日本生物物理学会第58回年次大会, オンライン, 2020年9月17日

坂本 遼太, 平岩 徹也, 田邊 優敏, 鈴木 和也, 石渡 信一, 前多 裕介, 宮崎 牧人

収縮するアクトミオシン構造の綱引きで決まる細胞サイズ液滴内の位置対称性

日本生物物理学会第58回年次大会, オンライン, 2020年9月17日

前多 裕介

高分子共存系の非平衡現象と生命科学への展開

日本物理学会 2020年秋季大会 シンポジウム講演, 2020年9月9日

福山達也, 巖路燦, 島本勇太, 前多裕介

紡錘体の動的形状制御とアクティブゲルモデル

日本物理学会 2020年秋季大会, 2020年9月9日

別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介  
遊泳バクテリア集団のエッジカレントとキラルな秩序渦  
日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 9 日

加藤修三, 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介  
アクトミオシン液滴のダイナミクスと空間対称性の制御  
日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 9 日

坂本遼太, Guillaume Charras  
分子レベルから探る細胞分裂の力学  
日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 8 日

## 外部資金

《 文部科学省科学研究費補助金 》  
アクティブマターのキラルな秩序渦と乱流状態の幾何的普遍性の研究  
科学研究費補助金 基盤研究 (B)  
研究代表者：前多裕介

発動分子の自律的運動と機能設計のエネルギー論的研究  
科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「発動分子科学」計画研究  
研究代表者：前多裕介

《 文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金 》  
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  
理研九大科学技術ハブ研究 Grant  
研究代表者：前多裕介

バイオリアクター創成と動作機構解明  
九州大学-日本電信電話株式会社 共同研究 Grant  
研究代表者：前多裕介

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

坂本遼太

生体分子モーターが躍動する非平衡界面と細胞の破れた対称性の物理学

日本学術振興会特別研究員 DC1

別府航早

遊泳バクテリア懸濁液の乱流ダイナミクスと幾何的普遍性の研究

日本学術振興会特別研究員 DC2

## 他大学での研究と教育

前多裕介：新潟大学理学部 集中講義「非平衡系の輸送現象と流動現象」

## 学部4年生卒業研究

繁田 和幸：(指導教員、前多裕介)：3 Dゲルに誘起される上皮細胞の集団運動

## 学外での学会活動

前多 裕介

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業さきがけ「細胞の動的・高次構造体」領域アドバイザー

前多 裕介

日本生物物理学会雑誌編集委員

## その他の活動と成果

坂本 遼太

第34回独創性を拓く 先端技術大賞・特別賞 受賞

坂本 遼太

日本生物物理学会 第5回学生優秀講演賞 受賞

# 複雑生命物性

## 研究室構成員

水野 大介 教授

助教

《 大学院 博士課程 》

杉野 裕次郎

藤原 誠 白木 啓悟 江藤 高宏

荊原 佳祐 井口 昇之 杜 海洋

《 学部 卒業研究生 》

熊丸 一平 松岡 亮佑

《 研究生 》

## 担当授業

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(水野大介)、

## 研究・教育目標と成果

《 今年度の目標 》

- 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。(3)
- 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。(4,6,7)
- 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。(5)
- 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。(6)
- 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。(4,2)

- 細胞を始めとする光学的に不均質な媒質中において、光捕捉による力の印加とレーザー干渉法に基づく粒子追跡を高い時空間分解能で精密に行うための技術を開発する。(1)

(1) **多重フィードバックと補償光学を用いた非平衡ソフトマターの揺らぎ応答解析** (井口、杉野、水野)

多重フィードバックを用いて試料中の揺らぎに追随しつつ、補償光学技術を用いて不均一媒質を通過する際に生じるレーザー波面の乱れを補正し、精密な力の印加と干渉パターンの生成を実現する技術開発を進めている。

(2) **剛体球コロイド濃厚懸濁系の非線形・非平衡レオロジー** (林原、江藤、荊原、松岡、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  $\rightarrow$  thickening が生じるのに対して、微視的には thickening  $\rightarrow$  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。

(3) **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。

(4) **細胞内部環境のガラス的挙動** (杉野、熊丸、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。

(5) **フィードバック増強マイクロレオロジーの開発と細胞・生体組織計測** (杉野、井口、熊丸、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 piezo 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。

(6) **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、杜海洋、水野)

培養液中で遊走するバクテリア(大腸菌)や単細胞微生物(クラミドモナス)が生み出す非平衡揺らぎが、我々の提案する新しい極限安定分布に属することを明らかにした。その時間発展を解析することで、非平衡揺らぎに新しい極限分布が現実の物理系において普遍的に現れる機構とその出現条件を明らかにした。さらに、遊走微生物が存在を許された空間の次元と、現実の空間の次元を様々に制御した実験を行うことで、この新しい極限分布が現実世界で観測される非ガウス揺らぎを一般的に表現することを示しつつある。本年度は、理論を長距離相互作用を含む形式に拡張してさらに一般化した。

(7) **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、杉野、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。

(8) 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、井口、富田、水野）

近年、直接検出することが困難な微弱な相互作用が細胞内で集団として働く姿を、*in vitro* の相分離や相転移現象として間接的に観察する試みがなされている。顕微鏡観察できるマクロなスケールの液滴（マクロ液滴）の観察が盛んに行われ、その結果、細胞内では微弱だが集団として働く相互作用が満ちあふれており、幅広い場面で生体制御に関わっていると考えられはじめている。しかしながら、細胞内における液滴の物理的な理解は殆ど進んでおらず、液滴の発生と成長がどのような法則に従うのか明らかではない。我々は、細胞内でミクロに相分離した液滴の物理的性質の計測を行い、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（1-8）のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《 原著論文 》

1. 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
2. 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

3. 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
4. Noise-Induced Acceleration of Single Molecule Kinesin-1 Takayuki Ariga , Keito Tateishi, Michio Tomishige, and Daisuke Mizuno, PHYSICAL REVIEW LETTERS **127**, 178101, (2021) DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.178101

## 講演

《 海外での講演 》

《 国内での講演 》

1. 《 日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔 》  
代謝活性を持つ細胞質モデルのレオロジーと構造緩和 (口頭)  
杉野裕次郎, 熊丸一平, 福本昂平, 曾和義幸, 高橋達郎, 水野大介
2. 《 日本物理学会 第 76 回年次大会, 遠隔 》  
レーザー干渉法における光てこの応用 (口頭)  
井口昇之, 水野大介
3. 《 2021 年 応用物理学会春季学術講演会, 遠隔 》  
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, 水野大介
4. 《 2020 年 第 10 回分子モーター討論会, 遠隔 》  
モーター蛋白質が生み出す非熱揺らぎの時空間特性と細胞質流動化 (口頭・招待)  
水野大介
5. 《 2020 年 第 126 回日本物理学会九州支部例会, 遠隔 》  
非平衡系におけるアクティブ拡散と構造緩和の測定 (口頭)

熊丸一平、杉野裕次郎、水野大介

6. 《2020年 第126回日本物理学会九州支部例会, 遠隔》  
濃厚エマルジョンの広帯域マイクロレオロジー (口頭)  
松岡亮佑、井口昇之、水野大介

## 外部資金

《文部科学省科学研究費補助金》

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

非熱揺らぎの時空間スペクトル解析に基づく細胞質の非平衡挙動の解明

研究代表者：水野大介

文部科学省科学研究費補助金、新学術領域研究 (公募)

揺動散逸定理の破れと非ガウス性解析に基づく非熱的揺らぎの有用性評価

研究代表者：水野大介

文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

非平衡系のガラス・ジャミング転移

研究代表者：宮崎 州正

研究分担者：水野大介

《文部科学省科学研究費補助金以外の外部資金》

## 学部4年生卒業研究

熊丸一平：(指導教員、水野大介)：揺動散逸定理の破れの細胞質レオロジーへの示唆

## 修士論文

藤原 誠：(指導教員、水野大介)：液-液相分離により生じる細胞内凝集体のマイクロレオロジー

白木 啓悟：(指導教員、水野大介)：局所的な力に対する半屈曲性高分子ゲルの普遍的

な非線形応答

江藤 高宏: (指導教員、水野大介): 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

外国人留学生の受け入れ

修士1年 杜海洋

学外での学会活動

## 令和2年度 客員准教授

兵庫県立大学 大学院工学研究科 電子情報工学専攻 教授 藤沢 浩訓

量子微小分野で、藤沢浩訓氏(兵庫県立大学 大学院工学研究科 電子情報工学専攻 教授)が、今年度、客員准教授 に着任した。

今年度は、コロナウイルスの感染蔓延により移動が自粛されたため、予定を変更して、オンラインで集中講義と教室談話会の講演と研究協議をしていただいた。

文責:渡部行男

## 令和2年度 教職員一覧

講座		教授	准教授	講師	助教/准助教	研究員	
基礎粒子系物理学	粒子宇宙論	素粒子理論	鈴木 博	津村 浩二		奥村 健一(特任助教)* 山津 直樹(特任助教)	
		理論核物理	肥山 詠美子	池田 陽一		松本 琢磨 富樫 甫(特任助教) 鷺山 広平**	
		宇宙物理理論	山本 一博	菅野 優美			
	粒子系理論物理学	[原田 恒司]	[大河内 豊] [小島 健太郎]		[田尾 周一郎]		
	粒子物理学	素粒子実験	川越 清以	東城 順治 吉岡 瑞樹*		織田 勲 末原 大幹 音野 瑛俊*	小林 大(特任助教) 倉田 正和*
		実験核物理	森田 浩介 若狭 智嗣	寺西 高 坂口 聡志 市川 雄一		郷 慎太郎 西畑 洸希	田中聖臣(PD)**
物性物理学	物性基礎論	物性理論	福田 順一		松井 淳	藪中 俊介	
		統計物理学	中西 秀	野村 清英			
		凝縮系理論		河合 伸 成清 修			
	量子物性	磁性物理学	和田 裕文	光田 暁弘			
		量子微小物性	渡部 行男			荒井 毅(准)	
		固体電子物性	木村 崇			山田 和正 大西 紘平	
	複雑物性	複雑物性基礎	木村 康之	稲垣 紫緒		植松 祐樹	
		複雑生命物性	水野 大介				
		複雑流体		前多 裕介		福山 達也	

[基幹教育院] RCAPP\*

[超重元素センター]\*\*

## 令和2年度 各種委員

(○は委員長)

部門長・学科長・専攻長： 山本

副部門長： 若狭、木村(康)

将来計画委員： ○福田、山本、東城、野村、光田、前多、津村

人事WG： ○若狭、川越、福田、木村(康)、水野、鈴木

教育課程委員： ○木村(崇)、鈴木、若狭、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： 藪中、植松(副幹事)

社会連携委員： ○渡部

奨学金資格検討委員： ○中西、池田、水野、東城、寺西

経理委員： ○若狭、木村(康)

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、山田

支線LAN管理者： ○松井、山田

広報委員： ○水野、吉岡、津村、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、池田

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、  
松本、山田

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、植松

ハラスメント関連支援室： ○中西、東城、松井、西畑

なんでも相談窓口： 松井、大西

留学生相談委員： 織田

科研費採択率向上委員： 渡部

## 令和2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： 初期宇宙とエンタングルメント

講師： 南部 保貞 氏（名古屋大学大学院理学研究科 准教授）

日時： 10月6日（火）16：30～17：30

場所：物理講義室（W1-B-212室）

### 第2回物理学教室談話会

講演題目： 準局所保存量と可積分量子スピン鎖の非平衡でのふるまい

講師： 松井千尋 氏（東京大学・准教授）

日時：10月29日（木）16：30～18：00

場所：Zoomによるオンライン

### 第3回物理学教室談話会

講演題目：ガラス系の物理

講師： 池田昌司 氏（東京大学大学院総合文化研究科・准教授）

日時：11月16日（木）14：50～15：50

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：電荷テレポーテーション

講師： 米倉和也 氏（東京大学大学院理学研究科・准教授）

日時：11月26日（水）16：40～18：00

場所：物理部門会議室（W1-A-711）

### 第5回物理学教室談話会

講演題目：ナノ強誘電体の作成とその強誘電特性

講師： 藤澤浩訓氏（兵庫県立大学・准教授）

日時：12月7日（木）10：40～12：10

場所：Zoomによるオンライン

### 第6回 物理教室談話会

講演題目： From Quarks to Neutron Stars

講師： 初田 哲男 氏（理化学研究所数理創造プログラム・プログラムディレクター）  
日時： 12月8日（木）15：30～17：00  
場所：Zoomによるオンライン

#### 第7回 物理教室談話会

講演題目： 圧力誘起超電導物質 CeNiC<sub>2</sub> の量子臨界性  
講師： 上床美也 氏（東京大学物性研究所・教授）  
日時： 1月13日（木）13：00～14：30  
場所：Zoomによるオンライン

#### 第8回物理学教室談話会

講演題目： 電弱階層性問題とプランクスケールの物理  
講師： 磯暁 氏（高エネルギー加速器研究機構・教授）  
日時： 1月13日（水）13：00～14：30  
場所：Zoomによるオンライン

#### 第9回物理学教室談話会

講演題目： 重力波天文学の黎明  
講師： 神田展行 氏（大阪市立大学・教授）  
日時： 1月19日（木）16：40～18：00  
場所：Zoomによるオンライン

#### 第10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： 小林 隆 氏（高エネルギー加速器研究機構・教授）  
日時： 1月28日（木） 16：30～18：30  
場所：IMI オーディトリウム（W1-D-413）

## 令和元年度 物理学教室水曜木曜談話会

世話人 稲垣 紫緒

なし。

## 令和2年度 非常勤講師一覧

講師	所属	題目
米倉 和也	東北大学 大学院理学研究科	場の量子論におけるアノマリー
南部 保貞	名古屋大学 大学院理学研究科	量子情報と重力
神田 展行	大阪市立大学 大学院理学研究科	重力波の物理
松井 千尋	東京大学 大学院数理科学研究科	可積分系と非平衡現象
上床 美也	東京大学 物性研究所	圧力発生技術と物性研究
池田 昌司	東京大学 大学院総合文化研究科	ガラス系の物理
初田 哲男	理化学研究所 数理創造プログラム	Hadron Interactions from Quantum Chromodynamics
磯 暁	KEK 素粒子原子核研究所	ヒッグス場の理論
小林 隆	KEK 素粒子原子核研究所	ニュートリノ物理学入門

## 令和2年度 外国人研究者等受入記録

所属・職・氏名	所在地	受入目的	受入期間	受入者
浙江大学寧波理工学院・教授・ Cheng-Jun Xia	中国	外国人訪問 研究員	令和2年11月23日～28日	肥山

## 令和2年度 教育課程委員会活動報告

木村 崇

2020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
学生実験	光田
特研配属	坂口
カリキュラム	坂口・木村崇
基幹教育科目	前多
アンケート	松本
授業参観	河合
文書確認	鈴木、木村

2020年度の教育課程委員会の活動を時系列順に列挙すると以下のようになる：

- コロナ禍における授業方針の決定
- 学部・学府新3ポリシー（ディプロマ・カリキュラム・アドミッション）の英文化
- カリキュラムマップのブラッシュアップ
- 学部新生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- 過年度生に対する個別の履修指導
- 大学院生新生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- 学習支援室の体制の整備、役割（過年度生の学習支援など）の設定、TAの設定
- 合理的配慮を必要とする学生への対応の連絡と調整・講義、シラバス入力の設定
- 学生の入試形態別学力の追跡調査
- 新生 基礎学力調査の実施・「大学の实力調査」への対応
- 教職免許法改正に向けた担当教員の調整
- 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
- 2021年度入学者向けの専攻科目一覧案及び時間割案作成
- 物理学科ファカルティディベロップメント（FD）  
『ハイブリッド講義の実践例と講義活性化』の実施
- 学外非常勤講師授業計画作成
- 「修得単位自己チェック表」の確認
- 大学院特別講義番号の設定
- 障がいのある学生の修学支援実態調査への対応
- 2019年度入学者対象のコース配属予備調査
- 特別研究生配属調整
- 次年度進級・新入生・編入生ガイダンス計画
- コース配属
- 次年度理学部・理学府履修の手引きの確認作業

当該年度は、Covid-19 の感染拡大による緊急事態宣言等で、対面型授業が実施できないことになり、新しい授業スタイル、特に各種の Web 会議システムを用いたオンライン授業の導入が一気に加速した。教員と学生、双方の協力により、思いのほか、スムーズに遠隔講義の実施が可能となり、ハイブリッド（ハイフレックス）講義や授業の録画など、多様な授業スタイルが確立された。また、翌年度入学生から導入されるクォーター制の積極的導入に合わせて、複数の科目にクォーター化を導入した。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。加えて、助教の人数の減少に伴い、学生実験の運営や演習の実施が困難となりつつあり、今後、中講座で連携して対応する必要がある。また、引き続き、教育カリキュラムなどに学生の意見をより反映させる仕組みを構築したい。

令和 2 年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

## 「ハイブリッド講義の実践例と講義活性化」

開催日時：令和3年3月9日（火） 13：00～14：30

開催場所：Zoom ミーティングによるオンライン会議

講師：理学研究院物理学部門・教授 福田順一 先生

物理学部門では、大学院理学研究院・大学院理学府の中期目標・中期計画を軸にファカルティ・ディベロップメントを行っている。本年度より物理学部門では、効果的な授業を行うために一部の講義で対面型とオンライン型のハイブリッド形式を採用した。ハイブリッド形式での講義の実践例を福田順一教授教員から紹介いただき、効果的な授業手法の情報共有を行った。福田教授が担当する「統計力学Ⅰ」の講義では対面講義とビデオ映像を通して講義を聴講するハイブリッド形式を採用している。講義の中ではPPTスライドを用いて板書との切り換えを行う等の工夫も行っており、その手法について詳細が述べられた。また、授業を円滑に行う上でのTAの配置とその作業内容についても具体的な方策が示された。さらに、対面講義を通じた学習効果や学生からの意見についても紹介がなされ、完全オンライン講義では得難い、ハイブリッド形式・対面形式での授業の効果が改めて指摘された。

続いて、「2021年度からの授業等の在り方に関する討論」として出席者との議論を行った。スライドと板書の切り換えの頻度についての質問があり、カメラに繋いでいるPCにスライドPPTファイルを予め配置し、TAに口頭で指示を出して切り換えを行うという工夫について詳細が示された。ハイブリッド授業における対面とオンラインの希望割合や、どのくらいの学生が完全オンラインでの聴講となったのかという点も次年度の授業計画を建てる上で重要な情報となった。黒板を使った板書とペンタブレットによる板書の違いなどについても議論が交わされ、ハイブリッド講義を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、次年度に向けた活気ある講義に向けた議論を行い、当研究院・当専攻の授業をより良いものにする効果を共有する場となった。

## 令和2年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科(情報理学コースを含む)	59	52
物理学科3年次編入	4	—
修士課程(物理学専攻)	43	35
博士課程(物理学専攻)	5	8

## 令和2年度 就職・進学状況

令和2年度もここ数年同様、情報系をはじめとするさまざまな分野で物理学科への求人が増える傾向にある。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、COVID-19によるさまざまな制約は就職活動の方式や学生の就職活動への意気込みに大きな影響を与えた。ことに、企業説明会、面接、内定式等もすべてオンラインで行われ、就職する会社にも実際訪問し、社員と対面で直接接触することなく就職が決まるという、これまでにないタイプの就職活動となった。

就職活動のオンライン化は九大のように首都圏や京阪神と離れた地域の学生には、(1)旅費が不要、(2)移動による時間的ロスがない、(3)短期間に複数の会社を対象とした就職活動が可能、等のメリットがあり、従来のように就職活動用の資金を事前に蓄えておく必要ないという点でもメリットがあった。一方で、(1)インターンシップが単なるオンライン説明会になっていた、(2)社員との接触がないために、4月から働くという具体的な実感がもてないまま就職活動が終了する、(3)先輩や同級生と情報交換する機会がなく、孤立して就職活動を行っていた、等の精神面での困難さがあったと思われる。しかし、COVID-19終息後も就職活動のハイブリッド化が標準的な形式となると考えられ、学生・企業とも今後もその方式に関しては当分の間、模索が続くと考えられる。

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。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6名、民間企業23名、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、日産自動車、住友重機械工業、沖縄電力、富士通、東芝、ソニーLSIデザイン、マイクロンメモリー、富士ゼロックス、AGC、日立ソリューションズ、NECソリューションズイノベータ、大和証券、日本原燃、アマゾンウェブサービス、日本非破壊検査、両備システムズ、コロンビアワークス、Qnet、岡山システムサービス、三浦工業、トヤマ、ソールドアウトなどである。公務員は、気象庁、美作市役所である。

#### ・博士の進路・就職

博士課程修了者は8名であり、PD4名、民間企業3名、公立高校教諭1名である。

#### ・学部学生の進路・就職

修士進学者が34名、民間企業就職6名であった。民間企業は、南陽、アドソル、au コマーズ&ライフ、オービック、日産自動車、コアである。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。

## 第24回 体験入学・公開講座報告

担当： 前多 裕介

令和3年3月25日(木)に「第43回体験物理学」を開催するべく、令和3年1月21日～2月26日まで広く募集を行った。本年は新型コロナウイルス感染防止対策を鑑み、初のオンライン開催となった。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。体験入学のプログラムの中ではセミナー部分を公開講座として一般向けに広く解放し、大学への3年次編入を考えている高等専門学校生への説明会を兼ねている。例年と同様に、福岡県内の全ての高校と周辺県の有力高校に案内状を送り、定員を60名とし参加者を募集したところ、85名の応募があった。また、一般向けの公開講座に高専生5名の申込があり、全体受講者数が約90名になった。体験入学参加者の住所は福岡を中心に、大分、長崎、佐賀、鹿児島、愛媛など広範囲にわたっている。また、関東・関西からも参加者がおり、オンライン開催であるために従来は参加が難しかった地域からも関心を引きつけ、応募数も期待を上回るものであるものであった。

オンライン開催では体験実験を実施することが困難であったため、午後の部には大学生・大学院生・教員を交えた懇談会とオンライン研究室見学ツアー(素粒子理論研究室、固体電子物性研究室)を行った、事前に参加者にはどのような点に関心があるかとアンケートで調査し、大学での物理学の学習や、研究の進め方などへの関心が伺えたため、それらの点について重点を置きながら2研究室の紹介を行って頂いた。さらに、興味ある物理学分野についても事前アンケートをとったところ、宇宙物理学・相対性理論への関心を寄せる参加者が多いことがわかった。部門長の山本先生がご専門であるということもあり、急遽ランチタイムトークとして講演者の福田先生と市川先生を交えた3名の方にランチタイムトークとして、物理学者を目指したきっかけ、大学時代の過ごし方など、ご自身の体験と宇宙論を含む最先端物理の魅力を語って頂いた。この企画は大変好評で、体験入学イベント終了後にも参加生徒から質問をメールで頂く等、概ね好評であったと考えている。次回開催においても新型ウィルス対策が必要と思われ、開催方法を含む検討が必要と思われるが、研究室紹介・懇談会の内容を充実させるといった課題を改善して行きたい。

[プログラム]

3月25日(木)

9:40～	オンライン会場入室開始
10:00～10:40	開校式
10:40～11:10	講義：「柔らかいものの物理」（福田順一教授）
11:10～11:25	休憩
11:25～11:55	講義：「宇宙の謎を紐解くミクロな粒子」（市川雄一准教授）
昼休み	特別企画・物理学科教員とのランチタイムトーク
13:00～14:30	大学生によるオンライン研究室ツアーと懇談会
14:30～14:45	閉校式

## 令和2年度 社会貢献活動報告

社会連携委員長 渡部行男

### (1) 高校訪問出前授業等の実施

感染拡大のため、オンラインで、模擬講義と理学部および物理学科の説明（入試状況、カリキュラム、就職状況等）を行った。

- ・先端科学普及事業（高校への出張講義等、音野瑛俊助教）  
福岡県立明善高等学校（2020年 11月12日、オンライン）  
2年生 63名

### (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）

感染拡大のため、中止

### (3) 先端科学体験事業

体験入学・公開講座（2020年3月25日、オンライン、担当：前田祐介准教授）

対象：高校1、2年生、高専生（参加人数：88名）

講義「柔らかいものの物理」（福田順一教授）

講義「宇宙の謎を紐解くミクロな粒子」（市川雄一准教授）

バーチャルラボ見学 編入試験の紹介質疑応答等

### (4) 2020年度オープンキャンパス

今年度は実施方法を従来の対面型からオンラインへ変更した。

内容：研究紹介および講義

- ・「受験生向け特設サイト（九州大学HP内）」にて、2020年7月22日より一般公開
- ・理学部の紹介動画、パンフレット、各学科・研究室の紹介動画、模擬授業など、多様な企画を掲載