

物理教室年次報告書
平成28年度

2017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
平成27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	35
実験核物理	45
素粒子実験	60
物性理論	90
統計物理学	93
凝縮系理論	100
磁性物理学	103
量子微小物性	109
固体電子物性	116
光物性	124
低次元電子物性	132
複雑物性基礎	135
複雑流体	150
客員准教授	158
教職員一覧	159
各種委員一覧	160
物理学教室談話会	161
物理学教室水曜木曜談話会	164
物性基礎論コロキウム	165
九大原子核セミナー	167
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	171
物理学部門ファカルティ・デベロップメント報告	173
入学者数と卒業者数	174
就職・進学情況	175
体験入学・公開講座報告	176
社会活動貢献報告	179

はじめに

本報告書は、九州大学理学研究院物理学部門の年次報告として、2016年度の活動記録をまとめたものです。

本年度も物理学部門が関係する様々な出来事がありましたが、圧倒的なインパクトで日本中を魅了したのが森田先生の113番元素でした。2015年の大晦日に113番元素の命名権獲得の発表があり、2016年6月にニホニウムなる名称案を発表し、パブリックレビューを行ったのち、正式に名称が決定しました。このアジア初の快挙を成し遂げた森田先生は、九大物理出身で、現在、実験核物理学講座の教授を務めており、まさに、九大物理に取りましても誇らしい成果と言えると思います。これら一連の業績により、森田先生は、日本学士院賞や朝日賞、その他、諸々の賞を受賞されるに至っており、ご本人は、講演などで多忙を極められております。本学においても、更なる超重元素研究を推進するべく、概算要求が認められ、九州大学・改革活性化制度にも採択されるに至りました。これらにより、本学における超重元素研究が強化されると期待されます。

教室内の人員配置にも様々な変化がありましたが、時系列で紹介していきます。まず、4月より松井先生が講師に昇任し、物理学教室内に、学生教育支援室を発足させました。これにより、学部生の修学支援体制をより一層強化して、きめ細やかな指導を行う予定です。また、12月には、稲垣先生が、准教授に昇任されました。稲垣先生は、九州大学に新たに設置される予定の共創学部を担当される見込みです。平成30年度から受け入れ開始の新学部ということで、かなり忙しくなれると思いますが、引き続き理学研究院物理学部門の教員として、研究活動を続けていかれます。

最後は、少し寂しい話題ですが、実験核物理講座の教授として16年2か月の間、本教室の研究・教育にご尽力いただきました野呂先生が3月末で定年退職されました。常に的確なコメントをされ、自身の考えが全くぶれない野呂先生には、物理学部門の重鎮として、数多くの危機を救って頂きました。理学研究院の執行部にも長く在籍され、最後は、箱崎タンデム加速器のシャットダウンという大きな任務を完成させ、退職されました。

上記は、教員に関する話題でしたが、事務職員に関しても大きな変化がありました。長年、主任を務められた山路さんが、本年度より地球惑星部門に異動されることになり、相当な不安のもとで、新年度が始まったのですが、後を引き継がれた家田主任と、それにサポートして頂いた事務職員の方々の相当なご尽力により、全くの滞りない教室の運営が可能となりました。教員一同、深く感謝しているところです。

また、同年10月には理学研究院の院長選挙が実施され、地球惑星部門の中田院長が再任されました。物理学部門からは、引き続き、和田教授と木村康之教授が執行部メンバーとして留任されております。

このように一見、明るい話題が多い物理学教室ですが、大学院生の確保には、何らかの改善が必要と考えられます。博士課程学生の充足率は以前低い状態ですが、今年度の入試では、修士学生においても、入学辞退者が予想以上となり、入学者数が定員に達しない状況となりました。本学科で教育された学部生が、より高い目標を目指して外に出るのは良いことでもありますが、研究大学としての使命を果たす必要もあり、各教員が特徴的な研究を展開して、九大物理のプレゼンスを示していく必要があると感じています。今後とも、ご指導、ご鞭撻のほどお願い申し上げます。

物理教室の情報はウェブサイト <http://www.phys.kyushu-u.ac.jp> において、適宜更新されていますので御参考になさってください。

物理学部門 部門長 木村 崇

素粒子理論

研究室構成員

鈴木博 教授 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
奥村健一 助教 田尾周一郎（基幹教育院） 助教
牧野広樹 技術職員

《 博士研究員 》

《 大学院 博士課程 》

笠井彩

《 大学院 修士課程 》

稗田健治 釘崎充規 土屋創聖 森川億人

《 学部 卒業研究生 》

河野泰弦 下条昂礼 仲原英駿 橋本奨平
神里華澄

《 訪問研究者 》

井上研三 郷六一生 豊田文彦 杉野文彦

担当授業

力学・同演習（奥村健一）、統計力学I・同演習（奥村健一）、物理学特別講義I（奥村健一）、解析力学（鈴木博）、物理学基礎演習（鈴木博）、量子力学II（鈴木博）、物理学特別研究I・II（奥村健一）、場の量子論（鈴木博・奥村健一）、M1ゼミナール（鈴木博）

研究・教育目標と成果

グラディエント・フローの繰り込み可能性の証明（稗田健治、牧野広樹、鈴木博）
近年、グラディエント・フローという概念・手法が主に格子ゲージ理論の文脈において注目を集めている。これは、ゲージ理論に仮想的な時間を導入し、ゲージ場や物質場

をある種の熱拡散方程式に従って時間発展（フロー）させるもので、直感的にはゲージ場や物質場の配位を滑らかにする働きがある。このグラディエント・フローが注目されている主な理由は、フローさせた裸のゲージ場の量子論的相関関数や複合演算子が乗法的な繰り込み因子を掛けることなく自動的に有限になるという驚くべき性質のためである。またフローさせた裸の物質場の相関関数や複合演算子は単一の乗法的な繰り込み因子で有限にでき、これも驚くべき性質である。こうした性質のおかげで、用いる正則化に依らずに繰り込まれた有限の物理量を定義出来るという点が、非摂動的な計算を念頭に置いている格子ゲージ理論では非常に有用なのである。このグラディエント・フローの「繰り込み可能性」の摂動論での証明は Lüscher-Weisz によって初めて与えられたものであるが、その議論の途中段階は必ずしもわかりやすいものとは言えない。この研究では、グラディエント・フローの繰り込み可能性に必要な道具立ての微妙な点を明確にすると同時に、有効作用の方法に基づいたより簡明な証明を与えた。これにより、より多くの人にとってグラディエント・フローの繰り込み可能性がより親しみやすいものになったと考えている。

フェルミオン双線形演算子のグラディエント・フローによる表示（稗田健治、鈴木博）

（この研究は、稗田健治さんの修士論文の内容の一部をなしている。）上で述べたように、グラディエント・フローを用いて構成した裸の場の複合演算子は自動的に繰り込まれた有限の複合演算子となり、複合演算子の正則化に依存しない表式を与える。場の量子論では、理論の対称性に付随したネーターカレントは重要な複合演算子であり、その規格化は Ward-高橋関係式で決まっている。この研究では、カイラル対称性に付随したネーターカレントであるカイラルカレントや、それと Ward-高橋関係式で関係付いている擬スカラー密度など、フェルミ場の双線形演算子として与えられる次元3の複合演算子のグラディエント・フローによる表示を与えた。具体的には、フレーバー非一重項のカイラルカレント、擬スカラー密度、また、フレーバー一重項のカイラルカレント、擬スカラー密度、またこれらとアノマリーで結びついているトポロジカル密度、また、ベクトルカレント、スカラー密度などを考察した。ここでは、いわゆる小フロー時間展開の係数を摂動計算で求めることで、グラディエント・フローによる各複合演算子の表式を得た。これらの表式は現在、QCD の格子数値シミュレーションにおける、カイラル凝縮の測定、トポロジカル感受率の測定に応用され、成功を納めつつある。

カイラルゲージ理論の新しい格子定式化におけるフェルミオン数アノマリー（奥村健一、鈴木博）

Glashow-Weinberg-Salam 模型に代表される、Weyl フェルミオンがゲージ場と相互作用

用するカイラルなゲージ理論は、現在の素粒子理論の根本的な枠組みである。にもかかわらず、カイラルなゲージ理論は今のところ摂動論的にしか理解されておらず、その非摂動論的な定式化、非摂動論的なダイナミクスについては、長年の挑戦にも関わらずほとんど何も掴めていないと言っても過言ではない。このカイラルゲージ理論の非摂動論的な定式化に対して、ごく最近 Grabowska–Kaplan により、新しい提案がなされた。彼らは、彼らが以前に提案していた、5次元のドメインウォール・フェルミオンとグラディエント・フローを結びつけたカイラルゲージ理論の格子定式化から出発し、5次元バルクのフェルミオン自由度を積分してしまうことで、完全に4次元の格子上での定式化を得た。さらに、結果として得られる4次元格子上の格子ディラック演算子がいわゆる Ginsparg–Wilson 関係式を満たしていることを彼らは指摘した。彼らの定式化ではグラディエント・フローを利用することで、ゲージ対称性が常に保たれていることが大きな特徴である。定式化の中には左手型と右手型の Weyl フェルミオンが含まれる。このうち fluff (ふわふわしたもの) と呼ばれる右手型の Weyl フェルミオンが無限時間フローされたゲージ場とだけ結合することで物理に効かなくなり、カイラルなゲージ理論が実現するというのが彼らのシナリオである。ここで我々は、この定式化の基本的な構成だけを用い、fluff が左手型の Weyl フェルミオンと同じ大きさで符号が逆のフェルミオン数アノマリーを常に出すこと、言い換えると、アノマリーやゲージ場のトポロジーといった効果を通じて、fluff が完全には物理的なゲージ場と decouple できないことを指摘した。そして、もし、fluff が本当に自然界に存在した場合に、fluff のフェルミオン数アノマリーが素粒子現象論にどのような意味を持つかを議論した。例えば QCD のラグランジアンにはくりこみ可能で P と CP 対称性を破る項が許されるが、中性子の電気双極子モーメントの測定からその大きさは 10^{-9} 以下であることが分かっている。電弱相互作用は CP 対称性を破るため、QCD の CP 対称性を破るパラメータをこの様に小さく保つためにはパラメータの繊細な微調整が必要である。この問題は強い CP 問題と呼ばれ、古くから知られる標準理論の未解決問題の一つである。しかし単純で美しく、理論的に信憑性の高い解は未だにアクシオンの導入しか知られていない。一方、Grabowska–Kaplan の定式化では fluff クォークがアノマリーを感じることから、fluff クォークのどれかが質量を持たないとすると、カイラル変換により CP 対称性を破るパラメータを消すことが出来、複雑なモデルを導入することなく自然に強い CP 問題の解が与えられる。また、宇宙のエネルギー密度の4分の1を占める暗黒物質の正体とその宇宙論的な起源は現在現象論の最も重要な未解決問題の一つであり、様々な現象論的モデルが構築されているが、質量を持った fluff は暗黒物質の自然な候補となる。fluff の対称成分が生成されない、あるいは相対論的な放射に強く対消滅するならば、fluff 数はスファレロン過程によりバリオン数非対称性と熱力学平衡の関係を持ち、宇宙のエネルギー密度に占める暗黒物質とバリオンの比が同程度 (約5倍) であること

を自然に説明することができる。これらのシナリオについては、その後の詳しい考察により様々な問題点も指摘されたが、こうした場の量子論の基本的な問題の解が、素粒子現象論研究の新しい指針を与える可能性は大変興味深いと考えている。

グラディエント・フローを用いた、 $SU(3)$ Yang–Mills 理論の状態方程式の測定（鈴木博）

（これは、FlowQCD Collaboration との共同研究である。）上で触れたように、グラディエント・フローを用いることで、ネーターカレントのような複合演算子の、正則化に依らない表式を得ることができる。並進対称性に付随したネーターカレントであるエネルギー運動量テンソルは極めて重要な物理量であるが、格子正則化が並進対称性を破るため、ゲージ理論の非摂動論的解析におけるエネルギー運動量テンソルの構成は厄介な問題である。グラディエント・フローはこの問題を回避できる可能性を与える。ここでは、グラディエント・フローを用いて構成したエネルギー運動量テンソルの有限温度期待値を、格子数値シミュレーションで測定することで、 $SU(3)$ pure Yang–Mills 理論の状態方程式を高い精度で決定した。ゲージ理論の状態方程式は、クォークグルーオンプラズマの状態方程式であり、宇宙の QCD 相転移や重イオン衝突などの文脈で大変重要なものである。これは以前の FlowQCD Collaboration での研究と同様のものであるが、より多くの配位数、より細かい格子間隔、より大きな物理的体積など、より大規模な数値シミュレーションであり、また、連続極限とゼロフロー時間極限を初めて系統的に取ったものになっている。この理論の状態方程式については過去にも異なった方法に基づく多くの研究が存在し、これらの結果との比較を行うことで、グラディエント・フローに基づいたエネルギー運動量テンソルの構成法に対する我々の推論が間違っていなかったことがほぼ確実となった。

グラディエント・フローを用いた、 $N_f = 2 + 1$ フレーバー QCD の有限温度トポロジカル感受率の測定（鈴木博）

（これは、WHOT-QCD Collaboration との共同研究である。）ゲージ理論におけるトポロジカル感受率とは、トポロジカル密度の 2 点相関関数の積分で与えられる。有限温度のゲージ理論におけるトポロジカル感受率は、いわゆるアクシオンの質量と直接関係し、宇宙の進化の過程でのアクシオンの残存量、ひいてはアクシオンダークマターの成否を判断するための基本的な量である。ここでは、カイラル対称性に関連した Ward–高橋関係式を用いることで、トポロジカル感受率がフェルミオンの擬スカラー密度演算子の disconnected 相関関数で表されることに注目した。そして、上の稗田さんとの研究で得たフェルミオンの擬スカラー密度演算子のグラディエント・フローによる表示を用い、 $N_f = 2 + 1$ フレーバー QCD における有限温度トポロジカル感受率を格子数

値シミュレーションにより測定した。トポロジカル感受率はトポロジカル密度の2点相関関数からも直接得ることができる。この計算にもグラディエント・フローを応用することができるが、この計算結果と先ほどの計算結果が非常によく一致していることを我々は見出した。このことは、我々の方法論の正しさと、またそこから得られた物理的情報が共に信頼できることを強く示唆している。

ディラトンとパイオンによる QCD の有効理論の研究 (鈴木博、奥村健一、笠井彩)

クォークとグルーオンの強い力によるダイナミクスは量子色力学 (QCD) で記述されるが、その低エネルギーでの振る舞いを記述する有効理論としてパイオンによるカイラル有効理論が知られている。近年、カイラル対称性に加えてスケール対称性を持つような QCD の低エネルギー有効理論として、ディラトンとパイオンによる有効理論の定式化の方法が Golterman-Shamir によって提案された。標準理論を超える理論としてテクニカラーモデルを構築した際、このような有効理論がテクニカラーモデルの低エネルギーでの振る舞いを記述すると考えられている。また、テクニカラーの文脈ではディラトンは標準理論中のヒッグスであると考えられる。我々はこの有効理論の持つ対称性について再度考察し、Golterman-Shamir で定義されているスケール変換とは一部異なるスケール変換が適当であると結論づけた。また、有効理論に登場するディラトンとパイオンの質量の間に成り立つ関係式を、最低次の量子補正を加味して算出した。このディラトン-パイオン質量関係式を古典レベルで計算した別の先行研究が存在するが、量子補正込みで計算したのは我々が初めてであるほか、古典レベルでも先行研究とは異なる結論を得た。この先行研究が定義しているディラトン-パイオン有効理論には、Golterman-Shamir の有効理論にも存在しない項が加えられていることと、Golterman-Shamir と同じスケール変換の定義が用いられていることの2点で我々の有効理論と相違があり、質量関係式における差異の原因となっている。新たに加えられた項の必要性については議論中であるが、スケール変換の定義に関しては Golterman-Shamir に対する議論と同じく我々の定義が適当であると考えている。このディラトン-パイオン質量関係式を正しく把握しておくこと、スケール対称性を持つ QCD の格子ゲージ理論によるシミュレーションの結果が報告されたとき、その結果と照合してディラトンの崩壊定数を決定することができる。実験から判明しているヒッグス粒子の質量とこの結果を合わせると、テクニカラーモデルにおけるディラトンをヒッグスと解釈できるかどうかの判断基準になると期待している。

格子上の核子系有効場理論による有限密度系の研究 (原田恒司)

昨年度に引き続き、核子系有効場理論を格子上で数値シミュレーションする研究を行った。核子系有効場理論を格子上で数値シミュレーションするためには、核子同士の

接触相互作用を補助場を用いて書き直し、核子の双一次形式にする必要がある。この双一次形式を積分して得られるフェルミオン行列式は、結合定数の値によっては複素数になるという「符号問題」があり、これを含むギブス因子を確率分布関数とはみなせない。昨年行った繰り込み群の解析に基づき、符号問題を起こさない「参照フェルミオン行列式」を拡大的 (relevant) 演算子のみを含むものとして定義し、これを用いた再加重法を導入した。再加重因子の標準偏差を、他の再加重法の場合と比較し、我々の提案の有効性を確認した。この研究は、核理論研究室の八尋教授と佐々部悟氏との共同研究である。

有限温度系における準安定状態の崩壊と触媒効果 (大河内豊)

近年の弦理論の進展により、この理論には多くの準安定状態が存在していることがわかってきた。この仮定を信じるならば、初期宇宙において、現在とは異なる準安定状態にいた可能性が出てくる。あるいは、我々の今の真空がより安定な真空へと遷移してしまう可能もある。初期宇宙で高温な状態であったならば、様々な真空間の遷移が繰り返されたとも考えられる。我々はこの準安定状態にソリトンとして観測しうる物体が存在する場合、触媒効果がおこり、真空の寿命が短くなることを調べた。特に有限温度効果ではブレーンは non-extremal ブラックブレーンと呼ばれるものとなり、それからの寄与が準安定状態の触媒効果にどのような影響を与えるかを調べた。また崩壊が生じるのは、熱的に励起された状態からの崩壊も起こりうるもので、その寄与についても計算を行った。その結果、真空は温度効果で不安定となり、崩壊が早まることがわかった。この結果は弦理論のランドスケープと呼ばれる概念を議論する上で、触媒効果は見過ごすことができないことを示唆している。

高次元理論における大統一对称性の自発的な破れと真空構造の解析 (小島健太郎)

これは熊本保健科学大学の竹永和典氏および愛知医科大学の山下敏史氏との共同研究であり、昨年度より継続的に取り組んできたものである。非単連結な余剰次元を持つ高次元理論では、ゲージ場の余剰次元成分の非自明な配位が実現することで、ゲージ対称性の自発的な破れが起こりうる。この現象は、細谷機構と呼ばれ、素粒子の現象論への適用が広く議論されてきた。本研究では、この機構が、大統一对称性の自発的な破れを与える可能性を議論した。大統一对称性の自発的な破れのパターンは、さまざまな可能性が考えられる。我々は本研究では、5次元時空上で、直積群 $SU(5) \times SU(5)$ を持つ大統一モデルを構築し、このモデルの対称性の破れのパターンについて詳しく調べた。このモデルでは、外部自己同型写像による余剰次元方向の境界条件の帰結として、 $SU(5) \times SU(5) \rightarrow SU(5)_D$ という対称性の破れが起こる。また、 $SU(5)_D$ は、上述の細谷機構により、標準理論の持つ $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ へと自発的に破れる。我々は、

後者の破れを記述する量子補正と有効ポテンシャルを計算し、宇宙初期に実現していたと考えられる極限的な高温状態での有効ポテンシャルの大域的な構造を詳細に解析した。その結果、特定の物質場を含んだ大統一模型において、広い温度領域で安定的に $SU(5)_D \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ という破れのパターンが実現することに成功した。この成果は、以下の論文として発表した: Kojima Kentaro, Kazunori Takenaga, Toshifumi Yamashita, Physical Review D95 (2017) no.1, 015021.

カイラル・オーバーラップ演算子を用いたフェルミオン数アノマリーのローレンツ対称性の破れ (牧野広樹、森川億人)

カイラルゲージ理論の非摂動的定式化は、素粒子物理学の長年の問題である。近年、Grabowska と Kaplan により、カイラルゲージ理論の 5 次元ドメインウォール・フェルミオンに基づいた格子定式化が構成された。これを用いて、彼らはカイラル・オーバーラップ演算子で記述される 4 次元格子定式化を導いた。この定式化には左巻きと右巻きの両方の Weyl フェルミオンが含まれており、右巻き成分はグラディエント・フローによって変形されたゲージ場とのみ結合すると期待される。それによって、右巻きフェルミオンが「見えない」ようなカイラルゲージ理論となる。特に、この定式化におけるフェルミオン数アノマリーは強い CP 問題やバリオン数生成、ダークマターに対して現象論的な示唆を持つことが議論された。しかしながら、このアノマリーの形について予想はされていたが、具体的な計算は行われていなかった。そこで我々は、カイラル・オーバーラップ演算子を用いてフェルミオン数アノマリーの古典連続極限を計算した。その結果は予想されていたものよりも非常に複雑であった。興味深いことに、この連続極限にはローレンツ対称性の破れた項が含まれることがわかった。この項はゲージアノマリー係数に比例しており、ゲージアノマリーが消えているときにはフェルミオン数アノマリーは自動的にローレンツ不変性を回復する。その後、我々の計算結果から、必ずしもローレンツ対称性の回復しないこと、右巻きフェルミオンは完全にはゲージ場から分離しないことが指摘されている。この問題は、フロー時間の取り方に依って解消すると期待されている。

発表論文

《 原著論文 》

Proof of the renormalizability of the gradient flow:

Kenji Hieda, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki,

Nuclear Physics **B918** (2017), 23–51
[arXiv:1604.06200 [hep-lat]]

Small flow-time representation of fermion bilinear operators:
Kenji Hieda, Hiroshi Suzuki,
Modern Physics Letters **A31** (2016) no.38, 1650214
[arXiv:1606.04193 [hep-lat]]

Fermion number anomaly with the fluffy mirror fermion:
Ken-ichi Okumura, Hiroshi Suzuki,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2016** (2016), 123B07
[arXiv:1608.02217 [hep-lat]]

Equation of state for $SU(3)$ gauge theory via the energy–momentum tensor under gradient flow:
Masakiyo Kitazawa, Takumi Iritani, Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Hiroshi Suzuki,
Physical Review **D94** (2016), 114512
[arXiv:1610.07810 [hep-lat]]

Topological susceptibility in finite temperature $(2+1)$ -flavor QCD using gradient flow:
Yusuke Taniguchi, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda,
Physical Review **D95** (2017), 054502
[arXiv:1611.02411 [hep-lat]]

Numerical study of renormalization group flows of nuclear effective field theory without pions on a lattice:
Koji Harada, Satoru Sasabe, and Masanobu Yahiro,
Physical Review **C94** (2016), 024004-1–024004-13

Baryon as impurity for phase transition in string landscape:
Aya Kasai, Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi,
Journal High Energy Physics **1606** (2016), 029
[arXiv:1508.04608 [hep-th]]

Thermal effects on decays of a metastable brane configuration:

Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi,
Physics Letters **B762** (2016), 321–326
[arXiv:1608.01232 [hep-th]]

Gauge symmetry breaking patterns in an $SU(5)$ grand gauge-Higgs unification model:

Kojima Kentaro, Kazunori Takenaga, Toshifumi Yamashita,
Physical Review **D95** (2017), 015021
[arXiv:1608.05496 [hep-ph]]

Lorentz symmetry violation in the fermion number anomaly with the chiral overlap operator:

Hiroki Makino and Okuto Morikawa,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2016** (2016), 123B06
[arXiv:1609.08376 [hep-lat]]

《Proceedings》

Equation of state in $(2 + 1)$ -flavor QCD with gradient flow:

Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi,
Proceeding of Science LATTICE2016 (2016) 063
[arXiv:1610.09518 [hep-lat]]

Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow:

Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Ryo Iwami, Naoki Wakabayashi,
Proceeding of Science LATTICE2016 (2016) 064
[arXiv:1611.02413 [hep-lat]]

Energy–momentum tensor on the lattice: recent developments:

Hiroshi Suzuki,
Proceeding of Science LATTICE2016 (2016) 002
[arXiv:1612.00210 [hep-lat]]

Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory:

Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Mizuki Shirogane, Naoki Wakabayashi, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi,
Proceeding of Science LATTICE2016 (2016) 058
[arXiv:1701.08570 [hep-lat]]

《その他の論文》

$N_f = 2 + 1$ QCD thermodynamics from gradient flow:

Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi,
[arXiv:1609.01417 [hep-lat]]

Remark on the dilaton mass relation:

Aya Kasai, Ken-ichi Okumura, Hiroshi Suzuki,
[arXiv:1609.02264 [hep-lat]]

4D $\mathcal{N} = 1$ SYM supercurrent in terms of the gradient flow:

Kenji Hieda, Aya Kasai, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki,
[arXiv:1703.04802 [hep-lat]]

著書

臨時別冊・数理科学「超対称性の破れ」:

大河内豊,

発行：サイエンス社

講演

《海外での講演》

Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor QCD: a conformal bootstrap approach:

Hiroshi Suzuki,

2016年4月29日、National Taiwan University、Taiwan

Lattice energy–momentum tensor from the Yang–Mills gradient flow:

Hiroshi Suzuki,

2016年5月5日、National Taiwan University、Taiwan

Energy–momentum tensor on the lattice: recent developments:

Hiroshi Suzuki,

plenary talk at The 34th International Symposium on Lattice Field theory (LATTICE2016)、2016年7月29日、University of Southampton, UK

《国内での講演》

Lattice energy–momentum tensor from the Yang–Mills gradient flow

鈴木博

素粒子論研究室セミナー、2016年5月31日、大阪大学大学院理学研究科

Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor QCD: a conformal bootstrap approach

鈴木博

2016年8月29日、岡山光量子研究所

Proof of the renormalizability of the gradient flow

鈴木博

日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月22日、宮崎大学

Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor QCD: a conformal bootstrap approach

鈴木博

素粒子論研究室セミナー、2016年11月10日、東京大学駒場キャンパス

Fermion number anomaly with the fluffy mirror fermion

鈴木博

理論センターセミナー、2016年11月22日、高エネルギー加速器研究機構

Fermion number anomaly with the fluffy mirror fermion

鈴木博

KEK Theory Workshop 2016、2016年12月8日、高エネルギー加速器研究機構

Lattice energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow

鈴木博

素粒子論研究室セミナー、2017年01月31日、金沢大学

4D $\mathcal{N} = 1$ SYM supercurrent in terms of the gradient flow

鈴木博

日本物理学会第72回年次大会、2017年3月17日、大阪大学

格子上の核子系有効場理論と再加重法

原田恒司、佐々部悟、八尋正信

日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月22日、宮崎大学

格子上の核子系有効場理論と re-weighting 法

佐々部悟、原田恒司、八尋正信

第122回日本物理学会九州支部例会、2016年11月30日、福岡大学

Decay of false vacuum via fuzzy monopole in string theory

大河内豊

セミナー講演、2017年03月10日、慶應義塾大学

SU(5) 大統一理論におけるゲージ・ヒッグスの統一と対称性の自発的な破れのパターン

小島健太郎、竹永和典、山下敏史

日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月24日、宮崎大学

Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor gauge theories: a conformal bootstrap approach

牧野広樹

日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月22日、宮崎大学

グラディエントフローを用いた格子場の理論におけるエネルギー・運動量テンソルの構成

牧野広樹

日本物理学会第 72 回年次大会、第 11 回日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演、2017 年 3 月 17 日、大阪大学

Remark on the dilaton mass relation

笠井彩

第 122 回日本物理学会九州支部例会、2016 年 12 月 10 日、福岡大学

Remark on the dilaton mass relation

笠井彩

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 19 日、大阪大学

Lorentz symmetry violation in the fermion number anomaly with the chiral overlap operator

森川億人

KEK Theory Workshop 2016、2016 年 12 月 7 日、高エネルギー加速器研究機構

カイラル・オーバーラップ演算子を用いたフェルミオン数アノマリーのローレンツ対称性の破れ

森川億人

第 122 回物理学会九州支部例会、2016 年 12 月 10 日、福岡大学

Lorentz symmetry violation in the fermion number anomaly with the chiral overlap operator

森川億人

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日、大阪大学

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、基盤 B（一般）

格子場の理論における時空対称性の実現

研究代表者：鈴木博

科学研究費補助金、基盤 C (一般)

格子上の核子系有効場理論による低温高密度系の研究

研究代表者：原田恒司

科学研究費補助金、若手 B

真空の安定性と軽い粒子からの弦理論への制限

研究代表者：大河内豊

科学研究費補助金、新学術領域 (研究領域提案型)

ニュートリノで探る素粒子の起源と宇宙の構造

研究代表者：北野龍一郎

研究分担者：大河内豊

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

教育研究プログラム・研究拠点形成プロジェクト (P&P) 特別枠・つばさプロジェクト

現代物理学における時間論の哲学的解釈

研究代表者：森田邦久

研究分担者：大河内豊

他大学での研究と教育

鈴木博：2016年9月12-14日、筑波大学におけるサマースクール「Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories」に参加し、集中講義「Gradient flow の基礎と応用」を行った。

鈴木博：2016年11月8-10日、東京大学駒場キャンパスにおいて大学院集中講義「グラディエント・フローとその格子ゲージ理論への応用」を行った。

鈴木博：2017年1月31日、金沢大学において大学院集中講義「グラディエントフローの基礎と応用」を行った。

学部4年生卒業研究

河野泰弦：(指導教員、奥村健一)：超弦理論の研究
下条昂礼：(指導教員、奥村健一)：超弦理論の研究
仲原英駿：(指導教員、奥村健一)：超弦理論の研究
橋本奨平：(指導教員、奥村健一)：超弦理論の研究
神里華澄：(指導教員、奥村健一)：超弦理論の研究

修士論文

稗田健治：(指導教員、鈴木博)：勾配流を用いた複合演算子の構成

学外での学会活動

鈴木博：

日本物理学会第71～72期代議員

理化学研究所仁科加速器研究センター初田量子ハドロン研究室客員研究員

ポスト「京」重点課題9諮問委員会委員

京都大学基礎物理学研究所共同利用運営委員会委員

日本物理学会素粒子理論領域領域副代表

The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2016) International Advisory Committee

The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2017) International Advisory Committee

大河内豊：

国際研究会 YITP Workshop 「Strings and Fields 2016」 2016年8月8-12日 世話人
(連絡責任者)

小島健太郎：

日本物理教育学会九州支部理事

第3回日本物理教育学会九州支部研究大会実行委員

日本物理学会九州支部幹事

第122回日本物理学会九州支部例会実行委員

その他の活動と成果

小島健太郎：

出前授業：福岡県修猷館高等学校にて、「シンメトリーを通して見る自然と物理」という出前講義を行った。

牧野広樹：

「グラディエントフローを用いた、格子場の理論におけるエネルギー・運動量テンソルの構成」の研究業績に関して「第11回（2017年）日本物理学会若手奨励賞」受賞

理論核物理

研究室構成員

八尋 正信 教授

清水 良文 准教授

松本 琢磨 助教

《 大学院 博士課程 》

石井 優大 佐々部 悟 豊川 将一 管野 淳平

宮原 昌久

《 大学院 修士課程 》

戸川 秀一 鳥越 悠平 開田 丈寛 牛谷 征貴

堀ノ内 亮

《 学部 卒業研究生 》

本宮 弘喜 井上 大司 小川 翔也 鳥丸 達郎

辻 直希 山田 悠真

担当授業

量子力学 I・同演習 (清水良文・松本琢磨)、物理数学 II(清水良文)、量子力学 III(清水良文)、理論核物理学 (清水良文・松本琢磨)、物理学ゼミナール (松本琢磨)、物理学特別研究 I(八尋正信・清水良文・松本琢磨)、物理学特別研究 II(八尋正信・清水良文・松本琢磨)

研究・教育目標と成果

中間子極質量の温度依存性に対する有効模型を用いた予言 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、石井優大 (D3))

中間子質量は量子色力学 (QCD) の真空に対して本質的な物理量である。中間子質量の温度 T 依存性から QCD 真空の変質をみることができる。有限 T では時間方向と空間方向に対して、それぞれ質量を定義できる。極質量 M_{pole} (遮蔽質量 M_{scr}) は、時間(空間)方向に対する中間子伝播関数の漸近形から決定される。重イオン衝突実験で観測できる質量は M_{pole} であるため、 M_{pole} の T 依存性を QCD の第一原理計算 (格子 QCD 計算) から決定することが重要である。しかし、有限 T の格子 QCD 計算では M_{pole} の

計算に困難があり、代わりに M_{scr} が盛んに研究されている。一方、有効模型では M_{pole} と M_{scr} のどちらも計算可能である。そこで本研究では、 M_{scr} に対する格子 QCD 計算結果を再現するように有効模型を構築し、その模型を用いて M_{pole} の T 依存性を予言した。さらに予言の結果と重イオン衝突実験の結果とを比較した。

Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio (PNJL) 模型を用いて $\pi, K, \eta_{\bar{s}s}, a_0, \kappa, \sigma_{\bar{s}s}$ 中間子に対する M_{scr} の T 依存性を解析した。まず、カイラル凝縮と π, a_0 中間子遮蔽質量に対する格子 QCD 計算結果から PNJL 模型のパラメータを決定した。次に、 $K, \kappa, \eta_{\bar{s}s}, \sigma_{\bar{s}s}$ 中間子の遮蔽質量に対して、格子 QCD 計算の結果と有効模型の結果とを比較すると、両者はよく整合した。このような信頼性の高い有効模型を用いて η' 中間子極質量の T 依存性を計算し、重イオン衝突実験の結果と比較したところ、誤差の範囲で一致が見られた。さらに PNJL 模型に基づき極質量と遮蔽質量との間に近似的な関係式が成り立つことを見出した。異なる二つの中間子をそれぞれ ξ, ξ' とすると、遮蔽質量の比と極質量の比に対して $M_{\xi}^{\text{scr}}/M_{\xi'}^{\text{scr}} \approx M_{\xi}^{\text{pole}}/M_{\xi'}^{\text{pole}}$ が成り立ち、遮蔽質量と極質量の差に対して $M_{\xi}^{\text{scr}} - M_{\xi}^{\text{pole}} \approx M_{\xi'}^{\text{scr}} - M_{\xi'}^{\text{pole}}$ が成り立つことを明らかにした。これらの関係式を仮定することで、格子 QCD 計算のみから極質量の予言が可能になると期待される。

この成果を論文にまとめ、現在 Physical Review D 誌に投稿中である。本研究は石井氏を中心に推進され、博士論文としてまとめられた。

格子 QCD と中性子星観測によるハドロン・クォーク相転移線の決定 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、管野淳平 (D2))

量子色力学 (QCD) はクォーク・グルーオン間にはたらく強い相互作用を記述する SU(3) 非可換ゲージ理論である。QCD はその非可換性のために漸近自由性をもち、高エネルギー領域では摂動的取り扱いが可能になる一方、低エネルギー領域では強い非摂動性を示す。漸近自由性から、温度 T やバリオン数化学ポテンシャル μ_B を大きくしていくとゲージ結合定数が小さくなることが予想される。低エネルギー領域ではハドロンが基本的自由度であるが、上記の予想は高エネルギー領域ではクォークやグルーオンが基本的自由度となることを示唆している。そこで T - μ_B 平面を考えると、低温・低バリオン数化学ポテンシャル領域にはハドロンが、高温・高バリオン数化学ポテンシャル領域にはクォーク・グルーオンが存在する領域が広がっていることになる。ハドロン・クォーク相転移線とは、 T - μ_B 平面において、ハドロンとクォーク・グルーオンが存在する領域の境界線である。

天体物理学においては、低温・高バリオン数化学ポテンシャル領域におけるハドロン・クォーク相転移線の位置が重要となる。この領域には中性子星が存在しており、もし中性子星内部にクォーク・グルーオンが存在すると冷却プロセスや最大質量が大き

影響を受けるからである。理論的には、QCDの第一原理計算である格子QCDシミュレーションで相転移線を決定することが望ましい。しかし、有限 μ_B 領域で発生する符号問題によりシミュレーションを実行することが難しい。

以上のような背景のもとに、本研究では2相模型を用いてハドロン・クォーク相転移線を解析した。2相模型においてはハドロン、クォーク・グルーオン自由度を別々の模型で記述する必要がある、今回は相対論的平均場理論(RMF)とentanglement Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio (EPNJL) 模型を用いた。我々はそれぞれの模型に含まれるパラメータを、中性子星観測・核物質の飽和性・低バリオン数化学ポテンシャル領域で行われた格子QCDシミュレーションの結果と整合するように決めた。その結果、EPNJL模型に含まれるベクトル相互作用の強さを決定でき、RMFに関しては2つのパラメータセットを得た。以上のセットアップに加え、2倍太陽質量を持つ中性子星内部にはクォーク・グルーオンが存在する、と仮定したうえでハドロン・クォーク相転移線を描いた。上記仮定を満たすには相転移線の下限が存在しなければならず、計算結果より低温・高バリオン数化学ポテンシャル領域においては、相転移線の位置の下限がRMFのパラメータセットにほとんど依存しないことを明らかにし、その位置を決定した。

本研究は管野氏を中心に推進された。その成果は論文として纏められ、Physical Review D誌に掲載された。

純虚数化学ポテンシャル領域における2+1フレーバーQCDの性質: 模型によるアプローチ (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、管野淳平 (D2))

有限温度 T ・有限クォーク化学ポテンシャル μ_q におけるクォーク・グルーオン多体系の性質を理解することは、宇宙進化とそれに伴う物質形成、中性子星の内部構造を理解するうえで必須の課題である。この課題に取り組むなかで、量子色力学(QCD)の分配関数や、物理量の熱力学的期待値を評価する必要がある。経路積分表示に従うと、グルーオン場の汎関数積分を実行できればQCD分配関数や物理量の期待値を得ることができる。しかし、グルーオン場の積分が無次元であるため実行することは現状不可能である。

一方、連続理論であるQCDとは対照的に、格子QCDシミュレーションでは4次元ユークリッド時空を格子に区切ってその格子上にQCDを定義する。格子化に伴ってグルーオン場の積分が有限次元になることが重要で、QCD分配関数や物理量の期待値をモンテカルロ法を用いて数値的に評価することが可能になる。シミュレーションでは特別な近似を使わないので、QCDのダイナミクスを第一原理的に計算でき、統計力学的性質を理解するための強力な手法として確立している。しかし、有限 μ_q 領域においては符号問題が発生し、モンテカルロ法を適用する際に確率関数として解釈されるべき

量が一般に複素数になるためシミュレーションを実行することができなくなる。そこで、符号問題による困難を避けるために純虚数 μ_q 領域におけるシミュレーションが盛んに行われている。純虚数 μ_q 領域には符号問題が存在せず、また実数化学ポテンシャル領域の情報は解析接続により得ることができる。これまでに 2 フレーバー系へ盛んに応用がなされており、近年は 2+1 フレーバー系へも適用されている。

そこで本研究では格子 QCD シミュレーションへ有益な示唆を与えることを目的とし、有効模型を用いて 2+1 フレーバー系純虚数 μ_q 領域の性質を調べた。2+1 フレーバー系では 2 フレーバー系とは違い、 s クォークの化学ポテンシャルを新たに外部変数として考えることができる。我々は s クォークの化学ポテンシャルを軽クォークのものと同じにする (条件 1)、あるいは定数に固定する (条件 2) という設定のもとで QCD が持つ性質を研究した。特に着目したのが、一次の Roberge-Weiss (RW) 相転移が起こるかどうかである。

有効模型としては Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio (PNJL) 模型を使った。条件 1 と条件 2 それぞれを適用して解析を行った結果、条件 2 を採用した場合には、RW 相転移の発生が条件 1 に比べて遅れることがわかった。さらに、定数値をある値より小さくすると、RW 相転移が完全になくなることを示した。RW 相転移が起こると物理量が非解析的になるため解析接続に利用できる領域が狭くなってしまう。本研究の結果は、クォークの化学ポテンシャルをうまく調整することで、解析接続に利用できる領域が従来よりも広くなることを示唆している。

本研究は管野氏を中心に推進された。その成果は論文として纏められ、現在 Physical Review D 誌に投稿中である。

クォーク・ハドロン転移の有効模型による解析 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、石井優大 (D3)、管野淳平 (D2)、宮原昌久 (D1)、鳥越悠平 (M2))

量子色力学相図 (QCD 相図) の低密度領域におけるハドロン相とクォーク相間の遷移は、クロスオーバーであることが格子 QCD 計算によって確かめられている。このクロスオーバー転移の物理的機構を解明するにあたって、計算した物理量の物理的な解釈を容易に行うことが出来ることから有効模型による解析が盛んに行われている。

本研究では、ハドロン相を自由ガス模型 (hadron resonance gas 模型)、クォーク相をグルーオン背景場中をクォークが伝搬するという描像に基づいて構築された独立クォーク模型によって記述した。次に、その二つの模型を体積比因子を使って滑らかにつなぎ、ハイブリッド模型を構築した。そして、得られたハイブリッド模型に基づいて種々の熱力学量を解析した。特に着目したのは、格子 QCD 計算により得られた種々の感受率である。格子 QCD 計算の結果を解析し、ハイブリッド模型に含まれる体積比因子の化学ポテンシャル依存性についての情報を引き出すことができた。加えて、温度とバ

リオン数化学ポテンシャルに対するクォーク・ハドロン転移の解析を実行することができた。今後は、バリオン数化学ポテンシャル以外の化学ポテンシャルに対する解析を進める方針である。

本研究は宮原氏を中心に推進されている。

純虚数化学ポテンシャル領域における $2+1$ フレーバー系の QCD 相図 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、管野淳平 (D2)、戸川秀一 (M2))

原子核を構成する核子はクォークとグルーオンから構成されている。クォークとグルーオンは強い相互作用をし、この相互作用は量子色力学 (Quantum Chromodynamics; QCD) と呼ばれる理論により記述される。低エネルギー領域においては、QCD のもつ非摂動性のために、QCD の解析が困難なものとなっている。

横軸に実数クォーク数化学ポテンシャル μ 、縦軸に温度 T をとってクォークとグルーオンの状態を描いた図を、QCD 相図と呼ぶ。QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算は、 μ が有限の時に、符号問題という数値計算上の困難を持つ。一方、QCD 相図解明のもう一つの手段である有効模型は、相図の全領域で計算可能であるものの、パラメータによる不定性を持っている。そのため、信頼できる有効模型を構築するためには、格子 QCD 計算の実行可能な符号問題のない領域において、格子 QCD 計算の結果を再現するように有効模型のパラメータを定め、有効模型の不定性を抑えなければならない。ところが、実数 μ を考えたとき、符号問題が存在しないのは $\mu = 0$ の領域に限られる。一方、純虚数クォーク数化学ポテンシャル $\mu = i\theta T$ を考えると、この領域では符号問題はない。したがって、有限 θ 領域における格子 QCD 計算の結果は信頼できる有効模型の構築に際して非常に有益な情報である。u, d クォークに s クォークを加えた現実的な $2+1$ フレーバー系 QCD については、近年になって幾つかの格子 QCD 計算の結果が得られ始めている。

本研究では、2 フレーバー系で構築した信頼性の高い有効模型である Entangled Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio 模型を $2+1$ フレーバー系に拡張し、 $2+1$ フレーバー系の有限 θ 領域における QCD の相構造について予言を試みた。クォーク質量が縮退した N_f フレーバー系の有限 θ 領域においては、Roberge-Weiss 周期性 (θ に対する $2\pi/3$ の周期性) のような、興味深い特徴が存在する。クォーク質量の縮退していない $2+1$ フレーバー系 QCD におけるこの Roberge-Weiss 周期性の有無を、有効模型の範囲内で解析的に調べた後、数値計算で QCD 相図を描いて実際に確認した。

本研究は戸川氏を中心に推進され、戸川氏の修士論文として纏められた。

$2+1$ フレーバー系におけるハドロン・クォーク転移を記述する有効模型による QCD 相図の解明 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、管野淳平 (D2)、宮原昌久 (D1)、鳥越悠

平 (M2))

ハドロン物理学における最終目標の一つとして、有限温度 T ・有限バリオン化学ポテンシャル μ_B においてハドロンやクォークがどのような状態であるかを解明することが挙げられる。すなわち、これは QCD 相図を解明することを意味する。QCD 相図の解明の強力な手法として、第一原理計算である格子 QCD がある。格子 QCD 計算によって、 $\mu_B/T \sim 3$ までの領域では、ハドロン相 (閉じ込め相) からクォーク相 (非閉じ込め相) への転移がクロスオーバー転移であることが示されている。 $\mu_B/T > 3$ では符号問題が強くなるため、格子 QCD 計算の実行が困難である。一方、もう 1 つの有力な解析手段である有効模型は QCD 相図全域に原理的には適用できるが、クロスオーバー転移を記述する信頼できる有効模型はほとんど提案されていなかった。

そこで本研究では、クロスオーバー転移を記述する信頼できる有効模型を構築し、QCD 相図を解明することを目的とした。まず、 $\mu_B = 0$ MeV、 $T < 300$ MeV の領域における格子 QCD 計算の結果と整合する模型 (ハドロン・クォーク複合模型) を構築した。その際、低温をハドロンの自由ガス模型 (Hadron Resonance Gas 模型)、高温を独立クォーク模型で記述し、2 つの模型を滑らかにつなぐハドロン体積比因子 $f_H(T)$ を導入した。この模型を用いて、 $\mu_B = 0$ MeV、 $T < 300$ MeV における熱力学量の解析や転移温度の定義を行った。次に、この模型を $\mu_B = 300$ MeV、 $T < 300$ MeV の領域へ適応できるように拡張し、同様の解析を行った。最後に、定義した転移温度を用いてハドロン・クォーク転移線を描き、QCD 相図のハドロン相で核子が生成されるという現実と無矛盾な結果が得られた。この結果より信頼できる有効模型を構築できたと考えられる。

本研究は鳥越氏と宮原氏を中心に推進され、鳥越氏の修士論文として纏められた。

QCD における Z_3 対称性と符号問題の関係 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、高橋純一 (気象庁福航)、開田丈寛 (M2))

有限化学ポテンシャル領域では、フェルミオンの寄与を表すフェルミオン行列式が複素数となり、格子 QCD 計算で用いられるモンテカルロ計算に困難が生じる。この問題を符号問題と呼ぶ。格子 QCD 計算は QCD の第一原理計算であるため、有限化学ポテンシャル領域における格子 QCD の研究をすすめるためには、符号問題を解決することが必要不可欠となる。この問題に対して、reweighting 法や Taylor 展開法、複素ランジュバン法などの対処法が試みられているが、未だ完全な解決には至っていない。

低温・高密度領域における符号問題に対する新たな取組みとして、QCD に厳密な Z_3 対称性を取り入れた Z_3 -QCD を用いる方法がある。 Z_3 -QCD は、零温度極限で 3 フレーバー QCD に帰着し、有限化学ポテンシャル領域では通常の QCD よりも符号問題が緩やかになると期待されている。そこで本研究では、有限化学ポテンシャル領域の QCD

における Z_3 対称性と符号問題の関係について解析した。今回は、QCD の閉じ込め相転移を簡易的に記述する Potts 模型と、格子 QCD の有効理論である effective Polyakov line 模型 (EPLM) を用いて数値計算を行った。この数値計算によって、模型に Z_3 対称性を取り入れることで符号問題が生じる領域が格段に狭まり、符号問題が起こったとしてもその深刻度は非常に小さいことを示した。今後は EPLM による reweighting 法の改良を行い、また Z_3 -QCD の格子計算を実行して Z_3 対称性と符号問題の関係の解析を進める予定である。

本研究は開田氏を中心に推進され、Potts 模型による研究の成果は論文として纏められ、Physical Review D 誌に掲載された。加えて、上記の内容は修士論文に纏められた。

格子上の核子系有効場理論による核子系の統一的記述 (八尋正信、原田恒司 [九州大学基幹教育院]、佐々部悟 (D3))

微視的原子核理論に用いられる有効核力は安定核の情報に基づいて構築されており、不安定核に適用した際にその不定性が大きな問題となる。この不定性を排除するためには、有効核力の構築と核子多体系の記述とを同一の理論的枠組みで実行する必要がある。

そこで本研究では、QCD と低エネルギーで等価な核子系有効場理論を格子上で構築することでこれを実行する。しかし、原子核の典型的なスケールまで記述し得る有効場理論では符号問題のために計算を実行できないことが判明した。この困難を克服する方法として繰り込み群解析に基づいた再加重法を着想し、その実証のために必要な格子上での繰り込み群の解析を実行した。今年度は、その結果を用いて数値計算によって繰り込み群に基づいた再加重法の妥当性を検証し、繰り込み群解析に基づくことの有用性を明らかにした。

カイラル有効理論の核力に基づく有効相互作用の構築 (八尋正信、松本琢磨、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授]、河野通郎 [大阪大学核物理研究センター協同研究員]、蓑茂工将 [大阪大学核物理研究センター特任助教]、豊川将一 (D3))

2核子力や多核子力を系統的に決定できるカイラル有効理論に基づく核力は現代の核物理研究の中心的な役割を果たすようになってきた。カイラル有効理論に基づく核力は軽い原子核の第一原理計算や核物質に適用され、それらの系における3核子力効果が議論されてきた。本研究では、カイラル有効理論に基づく2核子力+3核子力を核反応に適用し、核反応における3核子力効果を解明するために Brückner 理論によりカイラル有効理論の核力から g 行列有効相互作用を導出する。そしてこの g 行列有効相互作用を畳み込み模型に適用することで弾性散乱の解析を系統的に行った。

「カイラル有効理論の核力+ Brückner 理論」の枠組みによって導出された g 行列有

効相互作用を用いることで、核子および $^3,^4\text{He}$ -原子核散乱をパラメタフリーに記述することに成功した。また弾性散乱における3核子力効果は特に $^3,^4\text{He}$ 散乱では散乱角後方で顕著であり、断面積を小さくし実験データの過大評価を改善することを確かめた。

本研究の成果は1本の論文がPhysical Review C誌に掲載され、一本の論文を現在Physical Review C誌に投稿中である。

核子-核および核-核散乱におけるアイコナル近似の有効性 (松本琢磨、堀ノ内亮 (M1)、豊川将一 (D3))

1980年代に中性子過剰領域でコア核のまわりを低密度の中性子が雲のようにとりまいている中性子ハロー核 (^{11}Li) が発見された。2007年には理化学研究所の不安定核ビーム施設 RIBF が稼働し、より重い核に中性子ハロー核 ($^{31}\text{Ne}, ^{37}\text{Mg}$) が見つかるなど中性子過剰核の研究が盛んに行われており、中性子ハロー核の安定核では見られない特異な構造の研究が注目されている。RIBFで行われるような高エネルギー入射核反応の解析には Glauber 模型がよく用いられる。Glauber 模型は原子核反応における入射核と標的核の密度分布を用いて断面積を計算する。そのため、Glauber 模型を用いると実験結果の断面積を再現するような密度分布を求めることができるとされるが、Glauber 模型で用いられている eikonal 近似と adiabatic 近似の有効性について検証する必要がある。本研究では eikonal 近似に注目し、核子-核および核-核散乱における eikonal 近似のエネルギー依存性および標的核依存性について調べた。

eikonal 近似を用いない量子力学的な計算結果と反応断面積の比較を行うことで eikonal 近似の有効性を検証した。p, n, ^4He , ^{12}C , ^{12}C の散乱に関しては、200 [MeV/A] で相対誤差が2%未満であったが、標的核を ^{208}Pb としたところ p- ^{208}Pb の相対誤差は200 [MeV/A] で6%となった。このことから、陽子と ^{208}Pb の散乱のような軽い核との反応において eikonal 近似を用いる場合、Coulomb 相互作用の取り扱いに注意が必要となることが分かった。

本研究は堀ノ内氏を中心に推進された。

$^{11}\text{Li}(p, p')$ 反応の微視的解析による ^{11}Li の共鳴状態の探索 (松本琢磨、田中順貴 [大阪大学核物理研究センター研究員]、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授])

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

解析では ^{11}Li をスピンを無視した $^9\text{Li}+n+n$ の三体模型で記述し、p 散乱における分解過程を離散化チャネル結合法により取り扱う。計算された、弾性散乱微分断面積、分

解断面積、励起エネルギースペクトルの実験値を定量的に再現できた。また共鳴状態の解析において、その構造が $^{10}\text{Li}+n$ として記述されることを示した。現在、この結果をまとめ Physical Review Letter に投稿予定である。

本研究は松本氏を中心に推進された。

正四面体変形した原子核の回転励起スペクトルの研究 (清水良文、Jerzy Dudek[Univ. Strassbourg]、田上真伍 (卒業生))

この数年来卒業生である田上真伍氏を中心にして、正四面体変形した原子核の研究を行ってきた。正四面体変形は高次の点群対称性を持っており、そのような変形を持った平均場中の独立粒子運動は高次対称性のために4重縮退が起こり、大きな殻効果エネルギーを稼いで安定化する可能性がある。ストラスブール大学の Dudek 氏達の研究により、いくつかの原子核（特に、正四面体変形の閉殻に対応した「魔法の数」に対応する原子核）においては、このような正四面体変形状態が低励起エネルギーに現れ、その観測の可能性が指摘されている。我々のグループでは、角運動量射影法を用いてこのような正四面体平均場が実現した時にどのようなスペクトルが現れるかをこれまで研究して来ており、いくつかの予言を行っている。

最近、正四面体変形「魔法の数」やそれに近い原子核である ^{160}Yb や ^{152}Sm で新しい実験が行われて、正四面体変形状態の探索が行われた。 ^{160}Yb 核では残念ながら、今の所正四面体変形状態の特徴を持つ状態群は発見されていないが、 ^{152}Sm 核においてこれまでの実験データを新たに分析した結果、1.5 MeV 以上の励起状態に正四面体変形した回転バンドの特徴をもった状態群と解釈可能な状態群を見出した。残念ながら今のところ、実験データは理論的予測の計算結果に比べてかなり大きな慣性能率を持っており、理論的予言と上手く合致しないが、もしこの状態群が正四面体変形に基づくものであることが確認出来れば、世界で初めての興味深い結果になる。この問題については引き続き分析を継続中である。

角速度混合した角運動量射影法によるバンド交差現象の研究 (清水良文、田上真伍 (卒業生)、嶋田充宏 (卒業生))

昨年度に博士論文で、嶋田充宏氏が信頼性の高い半現象論的有効核力である、Gogny D1S 相互作用を用いた角速度混合した角運動量射影法によって、中重核で観測されているイラスト回転バンドのバンド交差現象が自然に説明できることを確認した。この角速度混合した角運動量射影法により、中重核の基底状態回転バンド (g-band) については、その慣性能率の角速度依存性を含めた振る舞いを非常に精度良く記述出来ることが昨年度確かめられているが、この基底状態回転バンドとバンド交差を起こす2中性子回転整列励起バンド (s-band) については、定性的には上手く行くものの、慣性能

率の精度良い記述には成功していない。本年度は、この2中性子回転整列バンドを上手く記述する方法について引き続き研究を行って来たが、今の所最良と思われる方法は見つかっていない。この研究についても継続して研究を行っている。

角運動量射影法による高速回転する非軸対称変形核の研究 (清水良文、田上真伍 (卒業生)、嶋田充宏 (卒業生))

やはり、昨年度の博士論文で、嶋田充宏氏が非軸対称変形した原子核に特有の興味深い回転バンドを角運動量射影法によって微視的立場から分析した。通常の原子核は軸対称変形しており、基底状態回転バンドは対称軸に垂直な軸の回りに回転するただ一つの回転バンドになるが、非軸対称変形を起こすと、3つの異なる軸の回りに回転することが出来るようになり、これまでよく知られた基底状態回転バンドとは異なった回転状態群の出現が期待される。特に、巨視的模型で予言されたウォブリング回転バンドとカイラル2重項回転バンドについて、確かに巨視的模型で現れる特徴を持ち、これらの特徴的な回転バンドと解釈出来る状態群が出現することを完全に微視的立場から確かめることが出来た。本年度は更にウォブリング回転バンドについて、より深く研究を進めた。最近、Frauendorf-Dönauによって、high- j 軌道に対を組まない核子が存在する奇核の場合に、このhigh- j 軌道の角運動量の整列軸が最大の慣性主軸の場合と2番目の慣性主軸の場合の場合でウォブリング回転バンドの第一励起バンドの励起エネルギーの定性的振る舞いが異なることが指摘され、彼らは最大の慣性主軸の方向に整列している時を「縦ウォブリング (longitudinal wobbling)」、2番目の慣性主軸方向に整列している時を「横ウォブリング (transverse wobbling)」と名付けた。縦ウォブリングの場合は励起エネルギーは角運動量とともに単調増加するが、横ウォブリングの時は始め低スピンの増加してその後減少に転じる。最初にウォブリング回転バンドが発見された ^{163}Lu 核の場合は、角速度とともに減少するスペクトルが観測されており、横ウォブリングの状態が実現されていると解釈されている。

本年度は、クランキングの手法を用いて理論的に色々な回転整列を起こさせることによって、核子の回転整列を適切な軸方向に起こさせると、縦ウォブリングと横ウォブリングの両方が確かに起こることを微視的立場から示すことが出来た。特に、横ウォブリングの場合には励起エネルギーが減少するが、ある臨界角運動量で励起エネルギーがゼロを切ることが巨視的模型でも我々の微視的計算でも見られる。第一ウォブリング励起状態がイラスト状態と縮退を起こす時何が起きているかを調べてみると、始め核子の回転整列のために2番目の慣性主軸方向に向いていた角運動量ベクトルが、大きな集団的回転運動のために最大の慣性主軸の方向に向きを変化させ、励起エネルギーがゼロを切る角運動量のところで、それぞれの主軸方向の角運動量の成分の大きさが同じになることが分かった。一般に基底状態の縮退 (ソフトモードの励起エネルギー

がゼロとなる)は何らかの意味の「相転移」に対応しているが、この場合は、原子核の角運動量の物体固定系での向きがどの主軸の方向を向くかという、回転整列軸の変化に対応するある種の相転移に対応しており、それが励起スペクトルに反映するということは大変興味深い。この仕事については論文としてまとめる予定である。

発表論文

《原著論文》

Determination of hadron-quark phase transition line from lattice QCD and two-solar-mass neutron star observations:

Junpei Sugano, Hiroaki Kouno, and Masanobu Yahiro,
Physical Review D **94** (2016) pp. 014024-1-9.

Equation of state and transition temperatures in the quark-hadron hybrid model:

Akihisa Miyahara, Yuhei Torigoe, Hiroaki Kouno, and Masanobu Yahiro,
Physical Review D **94** (2016) pp. 016003-1-10.

Interplay between sign problem and Z_3 symmetry in three-dimensional Potts models:

Takehiro Hirakida, Hiroaki Kouno, Junichi Takahashi, and Masanobu Yahiro,
Physical Review D **94** (2016) pp. 014011-1-13.

Numerical study of renormalization group flows of nuclear effective field theory without pions on a lattice:

Koji Harada, Satoru Sasabe and Masanobu Yahiro
Physical Review C **94** (2016) pp. 024004-1–13.

Proposal of a directly measurable parameter quantifying the halo nature of one-neutron halo nuclei:

Masanobu Yahiro, Shin Watanabe, Masakazu Toyokawa, and Takuma Matsumoto
Physical Review C **93** (2016) pp. 064609-1–10.

Simultaneous analysis of matter radii, transition probabilities, and excitation energies of Mg isotopes by angular-momentum-projected configuration-mixing calculations:

M. Shimada, S. Watanabe, S. Tagami, T. Matsumoto, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro, Phys. Rev. C **93**, 064314 (2016).

Quantal rotation and its coupling to intrinsic motion in nuclei:

T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuzaki, and Y. R. Shimizu, Physica Scripta **91**, 073008 (2016).

《Proceedings》

Z_3 対称性と符号問題: 開田丈寛, 河野宏明, 高橋純一, 八尋正信,
原子核研究, Vol.61, Supplement 1 (2017) pp.85–86.

カイラル有効理論の核力による核反応の記述:

豊川将一, 八尋正信, 松本琢磨, 河野通郎
原子核研究, Volume 61, Supplement 1 (2016) pp. 44–45.

Microscopic effective reaction theory for direct nuclear reactions:

K. Ogata, K. Minomo, M. Toyokawa, M. Kohno, T. Matsumoto, M. Yahiro, Y. Kikuchi,
T. Fukui, K. Yoshida, and K. Mizuyama
EPJ Web of Conferences **122**, (2016) pp. 06003-1–9.

Fully microscopic description of elastic and inelastic scattering at intermediate incident energies:

K. Minomo, M. Kohno, M. Toyokawa, M. Yahiro, and K. Ogata
EPJ Web of Conferences **122**, (2016) pp. 07001-1–6.

講演

《海外での講演》

Study of one- and two-neutron removal reactions with core + n + n model:

T. Matsumoto, S. Watababe, T. Toyokawa, and M. Yahiro,
Direct Reactions with Exotic Beams (DREB) 2016, July 11-14, Halifax, Canada

Study of halo nature via reaction and neutron removal cross sections:

T. Matsumoto, S. Watababe, and M. Yahiro,
International Nuclear Physics Conference (INPC) 2016, September 12, 15, Adelaide,
Australia

以下、ポスター発表.

Effects of three-nucleon force from chiral effective field theory on nucleon-nucleus and
nucleus-nucleus elastic scattering:

M. Toyokawa, M. Yahiro, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Kohno,
Direct Reactions with Exotic Beams (DREB) 2016, July 11-14, Halifax, Canada

Microscopic analysis of elastic scattering based on chiral two- and three-nucleon forces:

M. Toyokawa, M. Yahiro, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Kohno,
International Nuclear Physics Conference (INPC) 2016, September 12, 15, Adelaide,
Australia

《 国内での講演 》

有限アイソスピン化学ポテンシャル領域から探るカイラル・閉じ込め転移間の相関:

管野淳平、河野宏明、八尋正信

第 122 回日本物理学会九州支部例会、2016 年 12 月 10 日、福岡大学

ハドロン相からクォーク相へのクロスオーバー相転移有効モデルによる解析 2:

宮原昌久、鳥越悠平、管野淳平、石井優大、河野宏明、八尋正信

日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 23 日、宮崎大学

クォーク・ハドロンハイブリッドモデルによる格子 QCD 計算の解析 III:

宮原昌久、鳥越悠平、河野宏明、八尋正信

第 122 回日本物理学会九州支部例会、2016 年 12 月 10 日、福岡大学

クォーク・ハドロン・ハイブリッドモデルの有限温度・有限密度領域への適用:

宮原昌久、鳥越悠平、河野宏明、八尋正信

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学

Z_3 対称性と符号問題:

開田丈寛、河野宏明、高橋純一、八尋正信

2016年原子核三者若手夏の学校、2016年8月4日、黒姫ライジングサンホテル (長野県)

Z_3 対称性と符号問題:

開田丈寛、河野宏明、高橋純一、八尋正信

日本物理学会秋季大会、2016年9月23日、宮崎大学

Z_3 対称性と符号問題 II:

開田丈寛、河野宏明、高橋純一、八尋正信

日本物理学会第72回年次大会、2017年3月18日、大阪大学

格子上の核子系有効場理論と Re-weighting 法:

佐々部悟, 原田恒司, 八尋正信,

第122回日本物理学会九州支部例会, 2016年12月10日, 福岡大学

カイラル有効理論の核力による核反応の記述:

豊川将一, 八尋正信, 松本琢磨, 河野通郎

2016年度原子核三者若手夏の学校, 2016年8月1日, 黒姫ライジングサンホテル

core+n+n 模型による中性子剥離断面積の計算:

松本琢磨, 渡邊慎, 豊川将一, 八尋正信

日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月21日, 宮崎大学

カイラル有効理論の核力を用いた弾性散乱の解析と3核子力効果:

豊川将一, 八尋正信, 松本琢磨, 河野通郎

日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月21日, 宮崎大学

核子-核および核-核散乱におけるアイコナル近似の有効性:

堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨,

第122回日本物理学会九州支部例会, 2016年12月10日, 福岡大学

CDCC study of halo nuclei via reaction and neutron removal cross section:

松本琢磨

First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure

and dynamics, 2016 年 12 月 12 日, 理研仁科センター

中性子剥離反応、分解反応によるハロー構造の研究:

松本琢磨

クラスター・平均場の両側面からみる原子核構造の多様性とそのダイナミクス, 2017 年
1 月 19 日, 大阪市立大

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文科省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

カイラル有効理論に基づく微視的多体理論の構築と 3 核子力効果

研究代表者: 八尋正信

文科省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

信頼性の高い有効モデルの構築とそれを用いた QCD 物性の解明

研究代表者: 石井優大

文科省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

有効モデルと格子 QCD 計算に基づいた QCD 相図の高密度領域の解明

研究代表者: 管野淳平

文科省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

核力に立脚した微視的理論による不安定核の静的および動的性質の系統的解明

研究代表者: 佐々部悟

文科省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

カイラル有効理論に基づく核反応・核構造の統一的記述

研究代表者: 豊川将一

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

石井優大、日本学術振興会特別研究員 (DC2)

菅野淳平、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

佐々部悟、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

豊川将一、日本学術振興会特別研究員 (DC2)

学部4年生卒業研究

【前期】井上 大司、小川 翔也、辻 直希、烏丸 達郎、山田 悠真 (担当: 松本)
コンピュータを用いた原子核研究超入門

【前期】小川 翔也、辻 直希、烏丸 達郎、山田 悠真 (担当: 八尋、清水、松本)
場の量子論、核反応論、核構造論の輪講・研究

修士論文

戸川秀一: (指導教員、八尋正信): 純虚数化学ポテンシャル領域における $2+1$ フレーバー系の QCD 相図

鳥越悠平: (指導教員、八尋正信): 閉じ込め相から非閉じ込め相へのクロスオーバー転移を記述する有効モデルの提案

開田丈寛: (指導教員、八尋正信): QCD における Z_3 対称性と符号問題の関係

博士論文

石井優大: (指導教員、八尋正信): Effective model for meson screening and pole masses at finite temperature (有限温度での中間子遮蔽質量と極質量に対する有効モデル) [2017年3月授与]

佐々部悟: (指導教員、原田浩司): Reweighting method for nuclear effective field theory on a lattice on the basis of renormalization group analysis (格子上の核子系有効場理論に対する繰り込み群解析に基づいた再加重法) [2017年3月授与]

豊川将一: (指導教員、八尋正信、松本琢磨): Microscopic approach to nucleon and ${}^3,4\text{He}$ elastic scattering (核子および ${}^3,4\text{He}$ 弾性散乱への微視的アプローチ) [2017年3月]

授与]

その他の活動と成果

宇宙物理理論

研究室構成員

橋本 正章 教授

町田 真美 助教 小野 勝臣 (H28年9月まで) 助教

《テクニカルスタッフ》

E. P. B. A. Thushari 松尾 康秀

《大学院 博士課程》

一政 遼太郎 福田 遼平

《大学院 修士課程》

米田 知司 有村 幸大 大村 匠 酒見 はる香

中尾 美穂 長野 源生

《学部 卒業研究生》

山田 龍王 大小田 結貴 荒井 滉矢 小岩井 光

《訪問研究者》

中村 理央

担当授業

- 橋本正章
一般相対論 (前期), 宇宙物理学 (後期), 基幹物理学IB(後期), 物理ゼミナール (後期)
- 町田真美
基幹物理学IB 演習 (後期), 物理ゼミナール (後期)
- 小野勝臣
電磁気学I・同演習 (前期)

研究・教育目標と成果

渦状銀河シミュレーションの観測的可視化 (町田真美)

天の川銀河を含む渦状銀河は、密度渦状構造と相関する形で大局的には磁場も渦状構造をとる事が知られており、平均で数 μG の磁場を持つ。しかし、最近の観測から、渦状腕と渦状腕

の間も、同程度の磁場がある事が指摘されており、その起源や維持機構について注目が集まっている。磁場の生成・維持機構と大局的な構造形成を明らかにする目的で行われた3次元磁気流体数値実験の結果を用いて、観測量を導出する事で、実際の物理量と観測量との比較、形成原因の特定を行った。センチ波からメートル波の偏波強度や偏波角などを、数値計算から得た物理量で導出した所、5GHzよりも高い周波数は、銀河面の磁場分布を反映する結果が得られるが、そのよりも低い周波数帯では、偏波解消という、偏波率の減光によって、磁場強度の強い領域ではなく、ガス密度の低いハロー磁場構造が観測される事がわかった。更に、領域の平均放射強度以上の領域のみを可視化する事で、実際の観測でおきるような観測限界の効果を取り入れた可視化を行った。その結果、円盤を真上から見る Face-on の場合には、渦状構造がはっきりと現れ、また渦状腕に沿った鉛直方向磁場の反転が見られた。この構造は、IC342 銀河でも発見されており、銀河ガス円盤からパーカー不安定性によって浮上する磁気ループ構造が成因であると考えられる。

3次元流体数値実験に基づく超新星残骸の理論モデルの構築 (小野勝臣)

Cassiopeia A (Cas A) に代表される若い超新星残骸からの熱的 X 線放射の観測等から超新星爆発放出元素の空間分布の詳細が推定されている。特に Cas A ではその分布が極めて非球対称であるがその原因は分かっていない。超新星残骸の理論的研究では球対称な爆発が仮定されてきたが不十分である。観測の3次元イメージと直接比較できる理論モデルを構築するため、超新星残骸の進化に重要な物理過程を考慮した3次元の流体の数値計算コードの開発を行った。

超新星残骸からの熱的 X 線放射を評価するには各元素の電離度、電子密度や電子温度が必要である。本研究では、流体の並列計算コード FLASH をベースに、これまで超新星残骸の理論計算で取り入れられてきた近似よりも厳密な方法で非平衡電離計算を組み込み込んだ。今後は非球対称な超新星爆発モデルを初期条件として3次元超新星残骸の数値実験を行い、Cas A、超新星 1987A などをターゲットに観測から示唆される非球対称性の原因を調べる。非球対称な爆発から超新星残骸へ至る進化を調べる研究の第一段階として、Orland 氏 (パレルモ天文台) との共同研究も開始した。更に、超新星残骸の衝撃波付近で起こると考えられている粒子加速に重要な磁場の増幅過程を調べるため、3次元の磁気流体計算コードの開発も行った。前年度までに問題となっていた、数値的に $\text{div}\mathbf{B} = 0$ を保証するためにベクトルポテンシャルを用いる方法を導入してこの問題を解決した。今後、レイリー・テイラー不安定性等の流体不安定性に起因する磁場増幅について調べる。

Constraining a variable dark energy model from the redshift-luminosity distance relations of gamma-ray bursts and type Ia Supernovae (橋本正章, E. P. B. A. Thushari)

Among many dark energy models we have investigated an equation of state (EOS) for dark energy which varies as a function of time. To examine the present acceleration of the universe and to investigate the features of dark energy, wide range of redshift from the type Ia Supernovae (SNIa) and Gamma-Ray bursts ($1 < (z + 1) < 10$) have been used. These observations are used to constrain the inherent parameters of the EOS model. The Hubble constant and the present matter energy density parameter is consistent with the Planck 2015 results. The energy density of dark energy is slightly affected from the model parameters at the early stage of the universe. Therefore, still cosmological constant problem becomes fine tuning since the value of effective EOS may be increased by some unknown mechanism.

降着中性子星の観測からの核物理への制限と X 線バーストシミュレーション (橋本正章, 町田真美, 松尾康秀, H. Liu)

降着中性子星には暗い quiescent 期と明るい outburst 期がある。Quiescent 期では中性子星

への質量降着率はあまりにも小さく、重力エネルギーの解放ではほとんど輝くことができない。しかし質量降着率が高い outburst 期に起こった crust heating の熱をゆっくりと放出して輝いていると考えられる。このとき、中性子星のコアからニュートリノも同時に放射されるため、観測された X 線光度と理論を比べることでニュートリノ放射に対する制限を行うことができる。これを行った結果、pion 凝縮によるニュートリノ放射過程でも観測を再現しうることを示した。これは先行研究とは異なる結果であった。さらに解析したところ、先行研究で使用された pion 凝縮によるニュートリノ放射率が、我々が採用したものと比べて小さかったため、先行研究と異なる結果が得られたことが分かった。ただし、今回の我々の結果は光度の高い天体を説明できていないため、今後核子の超流動の効果を取り入れた計算が必要である。

また降着中性子星ではしばしば I 型 X 線バーストと呼ばれる突発的な X 線増光現象が起こる。これは中性子星表面での降着物質の不安定核燃焼が原因と考えられている。特に、燃焼する降着物質が水素を豊富に含む場合は水素・ヘリウム混合バーストと呼ばれる。水素・ヘリウム混合バーストでは速い陽子捕獲過程と β 崩壊を繰り返す *rp*-process が重要となる。One-zone モデルでのバーストシミュレーションにより、*rp*-process によって質量数が最大 107 程度まで元素が生成されることが分かっている。近年では、バースト中に起こる対流の効果を取り入れた中性子星のコア・クラストの構造を解かない multi-zone モデルを用いてより詳細なシミュレーションも行われている。しかし中性子星の内部構造を考慮せずに得られた結果が正しいかどうか自明なことではない。従って、中性子星の内部構造も考慮した X 線バーストシミュレーションが必要となる。今年度はそのために必要な核反応近似ネットワークを構築した。これは質量数が $A = 112$ までの核種を考慮しており、one-zone モデルでは水素が多い環境であれば、近似しない核反応ネットワークの結果を再現できることが分かった。また水素が少ない環境であっても、点火圧力が低い場合は問題がないことが分かった。今後はこれを中性子星内部も含めた multi-zone モデルでの X 線バーストシミュレーションを行い、結果の妥当性を検証する必要がある。

Quiescent Light Curve of Accreting Neutron Star MAXI J0556-332 (橋本正章, H. Liu, 松尾康秀)

降着中性子星の中には明るい outburst 期から quiescent 期へ移行する際の中性子星の表面温度が観測されている。その中でも MAXI J0556-332 は最も表面温度が高い天体である。この天体の温度進化を説明するために、先行研究では shallow heating と呼ばれる熱源を人工的に入れる必要があった。この熱源は $Q > 6$ MeV/nucleon ほど入れる必要があるが、その起源は全く分かっていない。先行研究のシミュレーションでは中性子星のクラストのみを考慮したものであったため、本研究では中性子星中心から表面までを考慮したシミュレーションを行い、MAXI J0556-332 の温度の観測の再現を試みた。その結果、熱源としてクラストヒーティングに加えて、compressional heating や HCNO サイクルによる加熱を考慮すると、shallow heating を考慮せずとも観測を説明できることが分かった。また先行研究によると、MAXI J0556-332 だけでなく、KS 1731-260 や MXB 1656-29 なども shallow heating が必要とされているが、今後はこれらの天体についても再現できるか調査する必要がある。

相互作用するダークエネルギーモデルに対するビッグバン元素合成からの制限 (橋本正章, 一政遼太郎)

標準宇宙論によると、宇宙背景放射の温度と赤方偏移の間には線形な関係があることがよく知られている。非標準モデルにはこれを破るような温度進化をするモデルもいくつか存在するが、現象論的には $T_{\text{CMB}}(z) = T_{\text{CMB},0}(1+z)^{1-\beta}$ という関数がしばしば用いられる。先行研究によって β が非ゼロの値をとることが示唆されている (Luzzi et al. 2015)。本研究では、この関係を再現するため光子とダークエネルギー間の相互作用を仮定するモデルを提案する。次に、このモデルを宇宙初期にまで適用すると、宇宙初期においてダークエネルギーのエネルギー密

度が無視できなくなるようなパラメータ β が存在しうることが明らかとなった。そこで、宇宙初期に起こる軽元素合成であるビッグバン元素合成に与える影響の調査とパラメータに対する制限を行った。この影響として、1つめにダークエネルギーと光子の間に正の相互作用項が存在する場合、時間進化に伴い、ダークエネルギーから光子にエネルギーが流入するため、温度低下が遅くなること。2つめにダークエネルギーが宇宙の密度の一部を占めることによって宇宙の膨張が標準的なモデルよりも早くなること。最後に宇宙の膨張が変化するため、宇宙初期元素合成の起こるときのバリオンの密度が変化することが明らかとなった。特に、最初の2つはパラメータの正負に依らず温度変化の速度に対して互いに反対の影響を与えあう。また、正の相互作用項によって元素合成期のバリオンの数密度が標準モデルよりも小さくなる事が明らかとなった。

Collapsarの降着円盤からのアウトフローにおける重元素合成 (橋本正章, 小野勝臣, 福田遼平)

鉄より重い元素の合成過程の一つである r -process の起源天体は未だ解明されていない。本研究では、その候補として collapsar と呼ばれる、星の重力崩壊メカニズムに着目した。collapsar とは、 $25 M_{\odot}$ を超える星のうち高速で回転しているものが重力崩壊を起こした時に、ブラックホールと降着円盤の系を作るというものである。この円盤内は高温・高密度になるため、電子捕獲によって r -process に有利とされる中性子過剰な状態が実現する可能性がある。これまでに、一部の r -process 元素の再現に成功したが、ニュートリノ輸送や核反応熱といった物理過程に不十分な点がある。したがって、FLASH と呼ばれる流体コードにより上記のような物理の導入に加え、高解像度の計算が実現できるように改良を加えている。現在までに、自己重力と核物質の状態方程式を加えたシミュレーションを行った。今後、回転や粘性も導入し collapsar のシミュレーションを行う。

X線天文衛星アーカイブデータを用いたX線天体の研究 (米田知司, 山岡均 (国立天文台))

全天X線観測装置 MAXI は、90分毎に一回の割合で全天を走査し、天球の各点からのX線強度を記録し続けている。運用が始まって8年になり、公開アーカイブデータは非常に大量となっている。このデータから興味深い天体を探索するために、機械学習を取り入れた方法を模索し、X線トランジェントの増光を検出するのに適した方法を見いだした。この結果を修士論文としてまとめた。本研究を遂行するため、米田は国立天文台特別共同利用研究員(受託院生)として採用された(平成28年度後期)。

近赤外線による分子雲ループの偏波観測 (町田真美, 有村幸大)

天の川銀河の中心領域に巨大な一酸化炭素分子雲のループと呼ばれる半円の雲の構造が発見されている。ループは銀河中心に異常な速度分散と高温を引き起こしている。しかしループの起源は未だによくわかっていない。ループの起源を説明する仮説にパーカー不安定性がある。磁場に沿った分子雲があり、磁場が揺らぎによって少し浮き上がると分子雲が磁場から滑り落ちる。分子雲が磁場から滑り落ちると磁場に浮力が掛かり、さらに磁場が浮上する。このようにして、だんだんと磁場が浮き上がっていくのがパーカー不安定性である。パーカー不安定性が磁場による浮上であることから、ループの起源がパーカー不安定性によるものかを確かめるためには磁場の情報が不可欠である。しかし、これまでの観測からはループの磁場に関する直接的な情報は得られていない。そこで銀河中心領域の磁場構造解析に重大な成果を上げた近赤外線を用いた偏波観測の手法で分子雲ループ領域の観測を行い、ループに付随する磁場の情報を調べている。今年度は、偏波の情報を得るための解析の準備として天体画像の1次処理を行った。今後はこの一次処理を行った画像を用い解析を行っていく。

二温度磁気流体コード開発とジェット構造解析 (町田真美, 大村匠)

コンパクト天体には、その強い重力によって落ち込むガスにより降着円盤が形成される。ブ

ブラックホール X 線連星 (BHXBs) や活動銀河核 (AGNs) は、降着円盤から開放される重力エネルギーが活動性の起源となっている。降着円盤の降着流は、円盤への質量降着率によって状態が変化する。降着率が低い場合、光学的に薄い放射非効率な円盤 (ADAF) となる。放射が非効率的であるため、ガスが冷やされずブラックホール近傍で 10^{12} K にまで達する。ガス温度が低い場合、電子温度と陽子温度はクーロン衝突の効果によって同じ温度となる。そのため、ガスは一流体プラズマとして流体計算を行うことができる。しかし、ADAF のような高温降着流においては、ガス温度が電子の静止エネルギー ($T_e \sim 10^{9.5}$ K) を超えるため、二温度分布を形成する。ゆえに、電子と陽子は同じ速度で動くが、互いにエネルギーのやりとりを行う一流体二温度プラズマとして計算を行う必要がある。また、質量降着率が増加するとともに、ガス密度が増加し、放射冷却が重要となる。電子温度を正確に取り扱うことで放射をより正確に取り扱うことができる。よって、研究目的である、Sgr A* や Low/Hard 状態の BHXBs の観測結果を数値計算で再現するためには、二温度プラズマの磁気流体計算を行う必要がある。

ADAF の二温度を取り入れた流体計算は、先行研究として二次元の一般相対論的放射二温度磁気流体計算 (Sadowski et al. 2016) が行われている。先行研究は、複雑な物理を扱っているため、正確だが我々の目的である長時間の円盤の発展を追うことは難しい。そのため私は、CANS+ の HLLD 法の磁気流体計算に電子のエントロピー保存則を加えることで、非相対論的二温度磁気流体計算コードの開発を行った。また、そのテスト計算として、二次元円筒座標系を用いての Hard 状態からのジェット伝搬計算を行った。今後は、クーロンカップリングや放射冷却といったさらなる物理をコードに組み込む必要がある。

W50/SS433 の相互作用領域の偏波解析 (町田真美, 酒見はる香)

星雲 W50 とマイクロクエーサー SS433 のジェットは相互作用していることが知られている。その相互作用領域の詳細な磁場構造はこれまでに明らかにされていなかった。そこで、ATCA で広帯域・多周波数で観測したデータを用いて偏波解析を行った。結果、W50 東端のジェット先端領域の磁場構造を明らかにし、ジェット先端に特徴的に見られる構造を同定した。そのうち、ターミナルショックと思われる構造の一部についてファラデートモグラフィを行い、磁場を持つような成分が視線方向、あるいはビーム内に複数存在していることが分かった。過去の研究では、W50 東側に巻きつくらせん構造が同定されており、この構造がジェットに関係しているということが示唆されていた。そこで、このらせん構造の一部の偏波解析も行った。この解析により、らせん構造に付随する磁場の概形を得ることができた。

Leakage 法を用いてニュートリノ輸送を考慮した collapsar による *r*-process 元素合成 (橋本正章, 小野勝臣, 長野源生)

金やウランなど鉄より重い元素を作る過程に *r*-process という中性子捕獲過程がある。この過程によって鉄より重い元素の約半分を作ることができるが、まだ *r*-process の起源天体は確定されていない。その起源としてたとえば、親星に強磁場・高速回転を仮定した磁気回転型超新星爆発 (Winterler et al. 2012) や超新星爆発の後にできる中性子星同士の合体 (Winterler et al. 2012) などのシミュレーションが考えられている。しかし、これらには問題点が多く、*r*-process の起源として新たなシナリオを考える必要があると言える。そこで、我々はその起源として、非常に重く高速回転する星が重力崩壊に伴ってブラックホールと降着円盤の系を形成し爆発する collapsar の可能性を探る。今後、Leakage 法を用いてニュートリノ輸送を考えた collapsar のモデルを作り、*r*-process 元素合成シミュレーションを行いこのモデルがその起源として成り立つか検証する。

発表論文

《原著論文》

- Raio broadband visualization of spiral galaxies simulated on global three-dimensional magneto-hydrodynamics: M. Machida, T. Akahori, Y. Morita, K. E. Nakamura, H. Nakanishi, submitted to Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.
- The energy spectrum of cosmic rays above $10^{17.2}$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years: R. U. Abbasi, . . ., M. Ono (67th), . . ., Z. Zundel (123rd), *Astroparticle Physics*, 2016, 80, pp. 131-140.
- Quiescent light curve of accreting neutron star MAXI J0556-332: H. Liu, Y. Matsuo, M. Hashimoto, T. Noda, M. Y. Fujimoto, submitted to *Journal of the Physical Society of Japan*.

《Proceedings》

- Investigating magnetic activity in the galactic centre by global MHD simulation: T. Suzuki, Y. Fukui, K. Torii, M. Machida, R. Matsumoto, K. Kakiuchi, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, 2017, 322, pp. 137-140.
- Vertical flows and structures excited by magnetic activity in the galactic center region: K. Kakiuchi, T. K. Suzuki, Y. Fukui, K. Torii, M. Machida, R. Matsumoto, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, 2017, 322, pp. 220-221.
- Constraints from supernovae and gamma-ray bursts on the variable dark energy density model: R. Ichimasa, E. P. B. A. Thushari, M. Hashimoto, *Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016)*, 2017, 14, article id. 020107 (3 pp.).
- Production of Li and B in inhomogeneous Big-Bang nucleosynthesis: R. Nakamura, and M. Hashimoto, *Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016)*, 2017, 14, article id. 020108 (3 pp.).
- Nucleosynthesis in asymmetric, core-collapse supernovae of massive stars: S. Fujimoto, M. Ono, M. Hashimoto, and K. Kotake, *Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016)*, 2017, 14, article id. 020621 (3 pp.).
- Neutron star cooling with various superfluid and superconducting states: T. Noda, M. Hashimoto, Y. Matsuo, N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, *Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016)*, 2017, 14, article id. 020805 (3 pp.).

《その他の論文》

- 女子高生と理学研究院女性教員の懇談のための「女子高校生と女性教員の交流会」開催報告：松島綾美，町田真美，ポリモルフィアに寄稿

著書

- なし

講演

《 海外での講演 》

- Investigating magnetic activity in the galactic centre by global MHD simulations: T. K. Suzuki, Y. Fukui, K. Torii, M. Machida, R. Matsumoto, K. Kakiuchi, IAU322 The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Australia, 2016年7月18日-22日
- Vertical flows and structures excited by magnetic activity in the galactic center region: K. Kakiuchi, T. K. Suzuki, Y. Fukui, K. Torii, M. Machida, R. Matsumoto, IAU322 The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Australia, 2016年7月18日-22日

《 国内での講演 》

- 銀河の中心に住む超巨大ブラックホール：町田真美，宇宙を学べる大学 in 九州，くまもと森都心プラザ（熊本），2016年7月24日
- バー効果を考慮した銀河ガス円盤の磁気流体数値実験：町田真美，中村賢仁，松元亮治，日本天文学会2016年秋季年会，愛媛大学，2016年9月14日-16日
- 渦状銀河の3次元磁気流体数値実験：町田真美，赤堀卓也，中村賢仁，中西裕之，日本SKA合同サイエンス会議，ルーセントタカミヤ（山形），2016年10月27日-29日
- 銀河磁場の起源と活動性：町田真美，第6回DTAシンポジウム 星形成を軸に俯瞰する磁場の役割とその観測的検証，三鷹（招待講演），2016年11月24日-25日
- Multi-dimensional numerical modeling of supernova remnants: 小野勝臣，An informal workshop, RIKEN-RESCUE Joint Seminars 2016, 東京大学，2016年6月26日
- 近似ネットワークを用いた Type I X 線バーストシミュレーション：松尾康秀，橋本正章，町田真美，野田常雄，藤本正行日本天文学会2016年秋季大会，愛媛大学，2016年9月14日-16日
- 新しい近似ネットワークを用いた X 線バーストシミュレーション：松尾康秀，橋本正章，町田真美，野田常雄第122回日本物理学会九州支部例会，福岡大学，2016年12月9日
- Constraints from supernovae and gamma-ray bursts on the variable dark energy density model: 一政遼太郎，E.P.B.A. Thushari，橋本正章，14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV，朱鷺メッセ（新潟），2016年6月19日-24日

- VLA の電波観測に基づくマイクロクエーサー SS433 のジェットの偏波解析：酒見はる香，第 46 回天文・天体物理若手夏の学校，信州・戸倉上山田温泉 ホテル圓山荘（長野），2016 年 7 月 26 日-29 日
- ATCA の電波観測に基づく W50/SS433 の偏波解析及びトモグラフィー：酒見はる香，町田真美，赤堀卓也，中西裕之，赤松弘規，藏原昂平，Jamie Farnes,, 日本 SKA 合同サイエンス会議，ルーセントタカミヤ（山形），2016 年 10 月 27 日-29 日
- ATCA の電波観測に基づく W50/SS433 の偏波解析：酒見はる香，町田真美，赤堀卓也，中西裕之，赤松弘規，藏原昂平，Jamie Farnes，日本天文学会 2017 年春季年会，九州大学，2017 年 3 月 15 日-18 日
- 放射冷却を取り入れたブラックホール降着円盤：大村匠，第 46 回天文・天体物理若手夏の学校，信州・戸倉上山田温泉 ホテル圓山荘（長野），2016 年 7 月 26 日-29 日
- HLLD 法によるニ温度磁気流体計算コードの開発：大村匠，町田真美，中村賢仁,, 日本天文学会 2017 年春季年会，九州大学，2017 年 3 月 15 日-18 日
- Production of Li and B in inhomogeneous Big-Bang nucleosynthesis: 中村理央，橋本正章，14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV，朱鷺メッセ（新潟），2016 年 6 月 19 日-24 日
- Nucleosynthesis in asymmetric, core-collapse supernovae of massive stars: 藤本信一郎，小野勝臣，橋本正章，固武慶，14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV，朱鷺メッセ（新潟），2016 年 6 月 19 日-24 日
- Neutron star cooling with various superfluid and superconducting states: 野田常雄，橋本正章，松尾康秀，安武伸俊，丸山敏毅，巽敏隆，14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV，朱鷺メッセ（新潟），2016 年 6 月 19 日-24 日
- 2SC カラー超伝導を考慮した高密度星の冷却：野田常雄，安武伸俊，橋本正章，松尾康秀，丸山敏毅，巽敏隆，藤本正行，日本天文学会 2016 年秋季大会，愛媛大学，2016 年 9 月 14 日-16 日
- クォークの 2SC カラー超伝導と核子の超流動を考慮した高密度星の冷却計算：野田常雄，安武伸俊，橋本正章，松尾康秀，丸山敏毅，巽敏隆，藤本正行，日本天文学会 2017 年春季年会，九州大学，2017 年 3 月 15 日-18 日

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

- 基盤研究 (C)
「X 線バーストシミュレーションによる中性子星内部構造の解明」(H27-H29)
研究代表者：橋本正章
- 基盤研究 (B)
「巨大ブラックホール降着流における X 線放射領域の形成と時間変動機構の解明」
(H28-H30)
研究分担者:町田真美

- 若手研究 (B)
「超新星爆発から超新星残骸進化の 3 次元流体数値実験, 重元素の起源と X 線放射の解明」 (H26-H28)
研究代表者: 小野勝臣

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

- 平成 28 年度国立天文台研究集会助成
日本 SKA 合同サイエンス会議「宇宙磁場: 銀河系内現象から大規模構造へ」
代表者: 町田真美

他大学での研究と教育

- 町田 真美: 中村学園大学にて「地学」, 西南学院大学にて「自然科学概論」の講義を行った。
- 一政 遼太郎: 久留米工業高等専門学校にて、「応用物理 II」の講義を行った。
- 福田 遼平: 久留米工業高等専門学校にて、「応用物理 II」の講義を行った。

学部 4 年生卒業研究

- 大小田 結貴 (指導教員: 町田真美): 原始星ジェットの磁気流体数値シミュレーション
- 山田 龍王 (指導教員: 橋本正章): TOV 方程式による星の構造解析
- 荒井 滉矢 (指導教員: 町田真美): 中性子星理論合体の周期解析
- 小岩井 光 (指導教員: 橋本正章, 町田真美): ATCA の電波観測の結果を用いた W50 の偏波解析

修士論文

- 米田 知司: (指導教員: 橋本正章, 山岡均 (国立天文台))
全天 X 線監視装置 MAXI データを用いた X 線トランジェントの増光の自動検出
平成 28 年度 3 月

博士論文

- 松尾 康秀: (指導教員: 橋本正章, 主査: 橋本正章, 副査: 清水良文, 町田正博)
「Nuclear Processes and X-ray Bursts in Accreting Neutron Stars」
平成 28 年度 3 月

- 一政 遼太郎：(指導教員：橋本正章，主査：橋本正章，副査：寺西高，成清修)
「Big Bang Nucleosynthesis and Evolution of Dark Energy」
平成 28 年度 3 月

学外での学会活動

- 町田 真美：日本天文学会 男女共同参画委員
- 町田 真美：日本天文学会 2017 年春季年会 開催地実行委員
- 町田 真美：日本 SKA サイエンスワーキンググループ 宇宙磁場班の班長を務めた。

その他の活動と成果

- 町田 真美：宇宙を学べる大学 in 九州 にて一般向け講演，及び研究室紹介を行った。
- 町田 真美：日本 SKA 合同サイエンス会議 「宇宙磁場：銀河系内現象から大規模構造へ」を主催した。
- 町田 真美：オープンキャンパスにて、「女性教員と女子高生の懇談会」を主催した。

実験核物理

研究室構成員

野呂哲夫 教授 森田浩介 教授
若狭智嗣 准教授 寺西高 准教授
藤田訓裕 助教 坂口聡志 助教
岩村龍典 技術職員

《 大学院 博士課程 》

山口祐幸 安田淳平 田中泰貴

《 大学院 修士課程 》

秋山陽平 河野晟之 榮大輔 畑口俊也
福多貴大 山野裕貴 渡辺健友 上野熊紀
岡祥平 庭瀬暁隆 平野剛 光岡駿

《 学部 卒業研究生 》

入部弘太郎 大城久典 岡田智香 後藤秀兵
松野雅樹 真部健太 密本普治 綿部愛 齋藤堯夫 吉田郭治 坂東
慶伍

担当授業

物理学概論 A(寺西高)、最先端物理学(坂口聡志)、基幹物理学 IB(野呂哲夫)、自然科学総合実験(坂口聡志)、力学・同演習(若狭智嗣)、電磁気学 I(森田浩介・野呂哲夫)、物理学総合実験(若狭智嗣、寺西高、藤田訓裕、坂口聡志)、最先端物理学(寺西高)、原子核物理学(野呂哲夫)、物理学ゼミナール(野呂哲夫、坂口聡志)、原子核・高エネルギー実験学(寺西高)

研究・教育目標と成果

超重元素の合成研究(田中泰貴、山野裕貴、渡辺健友、庭瀬暁隆、光岡駿、平野剛、藤田訓裕、森田浩介)

理研において ^{208}Pb や ^{209}Bi のように非常に安定な標的を用いた融合反応(冷たい融合反応)を用いて行われてきた超重元素の合成は、113番元素までの超重元素を合成し得たが、原子番号の増加と共に急速に減少する融合確率のため113より大きな原子番

号の超重元素を合成することは現在の技術では不可能とされている。さらに大きな原子番号の超重核を合成するために、アクチノイド標的を用い⁴⁸Caをビームとして用いる融合反応(熱い融合反応)によって、112番から118番までの超重元素の合成が報告されている。原子番号118を超える原子核の合成はいまだ報告されていない。理研では⁵¹V($Z=23$)や⁵²Cr($Z=24$)ビームと²⁴⁸Cm($Z=96$)標的を用いて原子番号119, 120番元素の合成をめざした実験が進行中であり、標的やビームの開発を行っている。

現在は118番元素を従来用いられてきた⁴⁸Caビームを使わずに合成し、別の同位体生成も試みる事を目指して $Z=22$ の⁵⁰Tiをビームとして $Z=96$ の²⁴⁸Cmに照射する実験を計画している。

重イオン融合反応の研究(山野裕貴、渡辺健友、藤田訓裕、森田浩介)

超重元素の合成には融合反応が用いられるが入射エネルギーは標的とビームのクーロン障壁近傍に設定されることが多い。反応系のクーロン障壁の分布を実験的に知るため180度方向の準弾性散乱断面積の励起関数(エネルギー依存性)を用いることができる。

118番、119番元素を合成する系である、²⁴⁸Cm+⁵⁰Ti, ²⁴⁸Cm+⁵¹V、およびDbを合成する系である²⁰⁸Pb+⁵¹Vについて、理研リニアック加速器と反跳分離器(GARIS)を用いた実験を行い、180度方向に散乱される⁵⁰Tiや⁵¹V粒子を検出する代わりに、0度方向に反跳する²⁴⁸Cm, ²⁰⁸Pb粒子をGARISを用いて測定した。実験結果はチャンネル結合計算と比較され重イオン反応のクーロン障壁分布に関する新たな知見を得た。

超重元素核の質量測定(庭瀬暁隆)

現在計画されている119番以降の新元素探索においては、検出データの信頼性を向上させることが1つの大きな目標である。従来用いられてきた新元素からの α 崩壊を測定し、既知核へのつながりを証明するという方法は、今後は該当する既知核が存在しなくなる可能性があるため、それに代わる方法として原子核の質量を精密測定する方法が提案されている。多重反射型飛行時間測定器(MR-TOF)を使用することで質量欠損の値から原子番号を直接同定する事が可能となれば、十分な信頼性を得ることが出来る。

現在はMd($Z=101$), No($Z=102$)を始めとする重元素の質量測定を行うと共に、従来の質量精密測定に加えて α 崩壊も同時測定出来るようにシステムを改良中である。

中間エネルギー領域での($p, 2N$)反応(野呂哲夫、若狭智嗣、緒方一介[阪大RCNP])

3名の共著でレビュー論文を書くことになり、九大/阪大RCNPグループで取得した標記反応の実験データ及び世界のデータを用いて総合的な解析を行なった。その結果、分光学的な応用面では、入射陽子エネルギーが200–500MeVの領域で概ね15%の確か

さで分光学的因子 (S -factor) を導けることが示せた。また、理論面での検討を行い、(核反応の種類を問わず)10%より良い精度で S -factor を実測するには、核反応理論 (模型) の改善が必須であることもわかった。さらに、この反応に寄与する原子核領域定量的評価の手法確立、 $(p, 2p)$ 反応と (p, pn) 反応の比較の重要性の確認など、媒質効果の理解を深めるという視点での進展もあった。

加速器質量分析系の開発 (河野晟之、畑口俊也、野呂哲夫、坂口聡志)

昨年度に引き続き、伊都キャンパスの新加速器施設を用いての AMS システムの構築に取り組んだ。入射系における逐次入射システム (バウンシング装置) の導入、全系のイオン工学的パラメータの最適化、M90 分析磁石系焦点へのオフセットファラデーカップの実装とテスト、最終焦点への ^{14}C 検出器系 (位置感応型 Si 検出器+粒子識別ディグレーダ) の設置と進めた。1月に標準試料を用いての $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比測定の実験テストを試みたところ、測定値として試料作製元の報告値より 14% 小さな値 (種々の補正を行なった後の差は 3%) が得られた。その後予定していたビームタイムがタンデム加速器高電圧が不安定であったために実施できず、これ以上の改善はできなかったが、総合テスト実施時にはビームラインパラメータの調整が不十分な箇所があったことがわかっており、慎重に調整と測定を行えば十分に実用的な測定ができると考えている。

逆運動学 ^{132}Sn 反応によるスピン応答の研究 (安田淳平、若狭智嗣)

原子核は陽子と中性子から構成される 2 成分有限量子多体系であり、スピンとアイソスピンという 2 つの内部自由度を有する。量子多体系に現れる特徴的な現象として、構成要素が協調的に運動する集団励起状態がある。その中でもガモフ・テラー (GT) 型はスピンアイソスピン両方の自由度が関与する、原子核固有の最も基本的な励起状態である。今回の研究対象である ^{132}Sn は不安定核であるため、標的として利用することが出来ない。そこで、 ^{238}U ビームの入射核破砕反応により 2 次ビームとして生成し、水素を標的とすることにより、 $^{132}\text{Sn}(p, n)$ 反応を逆運動学にて測定した。また、WINDS と呼ばれる中性子検出器群を整備し、実験室系で 14° から 122° の 広範囲での測定を時間分解能 63 ps という高分解能で実現した。さらに、 (p, n) 反応後の残留核を SAMURAI 磁気分析装置を用いて同時測定することによりバックグラウンドを削減する事に成功した。

得られた断面積は、GT 型以外の励起モードの影響を含む。そこで、多重極展開法により断面積データを軌道角運動量毎に分離し、GT 型のみを抽出した。その結果、励起エネルギー 16.3 ± 0.3 MeV、半値幅 4.6 ± 0.8 MeV の GT 巨大共鳴を確認した。励起エネルギーから斥力相互作用の大きさを表すランダウ・ミグダル・パラメータ g'_{NN} の値として 0.68 ± 0.07 という値が求められた。この値は、安定核である ^{208}Pb の場合の 0.64 と同等であり、不安定核においても斥力相互作用の大きさが安定核と同程度であ

ることが実験的に初めて示された。

核子ロックアウト反応による原子核多体効果のアイソスピン依存性の研究 (安田淳平、若狭智嗣)

本研究では、反応機構が最も単純になる入射エネルギー 296 MeV において、 ^2H , ^6Li , ^{12}C を標的とした (p, np) 反応の断面積と偏極分解能を測定した。 $1p$ 及び $1s$ 軌道からの反応の分離に成功し、断面積の反跳運動量分布が軌道角運動量 l に強く依存する事を確認した。得られたデータは自由空間での核力に基づくインパルス近似計算 (DWIA) と比較した。断面積の角度分布の再現には成功し、 ^6Li の $1p$ 軌道からの反応において、クラスタ構造に伴う有意な S 波の寄与も認められた。他方、中性子の S -因子は対応する陽子の S -因子に比べて有意に大きい事が分かった。この事は、 (p, np) 反応と対応する $(p, 2p)$ 反応において、アイソスピン依存性により 3 体力の寄与が異なることを示唆している。

偏極分解能に関しては、 $(p, 2p)$ 反応の場合と異なり、今回得られた (p, np) 反応の結果は DWIA 計算により再現された。このことは (p, np) 反応と $(p, 2p)$ 反応で原子核媒質効果の現れ方が異なることを示唆している。このアイソスピン依存性の一部は、相対論的効果による核媒質中における核子の有効質量の変化として理解できることが分かった。

飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による重陽子分解反応および陽子移行反応の研究 (大城久典、岡田智香、後藤秀兵、松野雅樹、密本晋治、坂口聡志、若狭智嗣)

重陽子は核子あたりの結合エネルギーが他の原子核に比べ小さい。そのため重陽子ビームを標的に照射すると容易に分解するため、重陽子分解反応は中性子源として期待されている。

本研究では、阪大 RCNP において、 $^{\text{nat}}\text{C}-^{197}\text{Au}$ の 6 標的を用い、重陽子分解 (d, n) 反応を測定した。中性子のエネルギーは、飛行距離 60 m の飛行時間測定法により測定した。2階微分散乱断面積は、そのピーク断面積が質量数 A に対しておよそ $A^{2/3}$ に比例することが分かった。また、ピークエネルギーは A の増加に対して減少する結果が得られ、クーロンポテンシャルによる重陽子の減速として理解された。これらの結果は、先行研究である (d, p) 反応の結果と無矛盾であり、重陽子分解反応は統一的で理解可能であることが示された。同時に測定した炭素標的に対する陽子移行反応 $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ においては、3つの状態 (ピーク) が観測され、状態ごとに異なる角度分布を得た。角度分布は各状態の軌道角運動量 l に特徴的であり、 l を同定することが可能であることが確かめられた。

$^9\text{C} + p$ 共鳴散乱による ^{10}N 共鳴状態の探索 (坂口聡志、寺西高)

本研究は ${}^9\text{C}+p$ 共鳴散乱により未知の原子核 ${}^{10}\text{N}$ の共鳴状態を探索し、やはりまだ完全には明らかにされていないミラー核 ${}^{10}\text{Li}$ の準位との対応関係を明らかにし、これらの核構造に関する知見を得ることを目的としている。今年度は、昨年度理研において実施した ${}^9\text{C}+p$ 共鳴散乱テスト実験の解析を進めた。 R -matrix フィッティングにより、スペクトル中に複数の ${}^{10}\text{N}$ 共鳴状態の寄与が現れていることが確認できた。

タンデム加速器による簡易的 RI ビーム生成技術の開発 (栄大輔、寺西高)

マクロな量の三重水素は放射性物質として取り扱いに規制がかけられており、通常の原子核実験用の加速器施設では、イオン源から三重水素イオンを引き出して加速することはできない。本研究では、 $d(d,t)p$ 反応により放出される三重陽子(t)を電磁石により分離しそのまま極低強度の二次粒子線として得る方法の試験を行った。タンデム加速器による 10 MeV の d ビームを重水素ガス標的に照射し、前方に放出される約 12 MeV の t 二次粒子を単一の双極電磁石からなる単純な分析系により分離した。一次ビーム強度 1 nA あたりの二次粒子強度は約 100 個/秒であり、純度は約 90%であった。将来 1 μA の 1 次ビームを使用した場合、 10^5 個/秒の強度を持つ t ビームが得られる見込みがあり、検出器テスト、共鳴散乱や中性子移行反応の実験に利用できる可能性がある。

RI ビーム実験のための反跳陽子検出器の開発 (秋山陽平、福多貴大、寺西高)

RI ビームを用いた逆運動学実験における反跳陽子検出器として、以下の 2 つの開発に取り組み、それぞれタンデム加速器によるエネルギーの定まった陽子および重陽子線を用いて試験した。1) 有感面積 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 、一層目の厚さ約 $48 \mu\text{m}$ 、二層目の厚さ約 $1500 \mu\text{m}$ の ΔE - E 型シリコン半導体検出器テレスコープを構築した。各層の読み出し電極はそれぞれ 16 ストリップに分割されており、検出位置 (散乱角度) の決定が可能である。エネルギー分解能および ΔE - E 法による粒子識別能力は、想定している陽子共鳴散乱実験には十分であることが確認できた。2) 小型 ($5.5 \times 5.5 \times 5.5 \text{ mm}^3$) の CsI(Tl) シンチレーター単体での陽子識別の試験を行った。シンチレーション光検出器として用いた MPPC の信号波形をデジタルオシロスコープによりイベントごとに読み取り総発光量からエネルギーを、早い成分と遅い成分の強度比から粒子識別を行った。陽子エネルギー 5–10 MeV の範囲で、陽子と重陽子の識別が十分可能であることが確認できた。

不安定核 ${}^6\text{He}$ – 陽子間のスピン軌道相互作用の研究 (坂口聡志)

近年、不安定核におけるテンソル力・スピン軌道力・三体力などのスピン依存相互作用の働きが注目を集めている。本年度は、ぼやけた密度分布を持つ不安定核 ${}^6\text{He}$ と陽子の散乱におけるスピン軌道結合の情報を抽出するため、 ${}^6\text{He}$ – 偏極陽子弾性散乱の

偏極分解能測定を行った。鍵となる装置として、不安定核ビーム実験のための世界で唯一の偏極陽子標的を用いた。

実験は理研 RI ビームファクトリーにおいて、6日間の期間、国内外 14 機関 62 名で遂行した。 ${}^6\text{He}$ ビームは、二次ビーム生成分離装置 BigRIPS を注意深く設定し、さらに三重陽子を分離装置内でシールドすることで 90% 以上の高い純度・最大 1 MHz の高レートで生成された。直径 24 mm に大型化した偏極陽子固体標的を SAMURAI 磁気分析器の上流に設置し、理研光量子制御技術開発チームと共同開発した新波長レーザー (556 nm) からのパルス光を空間伝送、マイクロ波と共に照射してスピン偏極を生成した。既存の ESPRI 陽子検出システムを 2 組に再構成し、反跳陽子を左右で検出した。また、磁気分析器の大型真空槽 (10 m³) 内を He ガスで置換することで、設計上最大の角度アクセプタンスを確保した。散乱 ${}^6\text{He}$ は、新規構築された極小セルのドリフトチューンバーで角度測定した後、運動量を測定した。現在データ解析を進めている。

また、SAMURAI を軸としたコラボレーションの国際ワークショップを、九州大学にて開催した。運営を行うと共に、上記の実験の報告を行った。

箱崎加速器施設の廃止措置と伊都キャンパスタンデム加速器施設の立ち上げ (スタッフ全員)

2015 年 2 月付の廃止届提出で始まった箱崎の加速器施設の廃止措置は、実作業の大部分を 2016 年 3 月までに終了したが、一部の放射化物の処分や最終的な諸物品の処理、建物の汚染検査などが未完であったため、廃止措置期間の延長を申請し、本年度に作業が持ち越されていた。それらの残作業も 9 月末までに終了し、10 月に廃止措置完了届を規制庁に提出、年末に規制庁内での決裁が終わったとの連絡が入り、廃止措置は完了した。これに伴い箱崎キャンパスの原子核実験室は組織としても消滅させた。

一方、伊都キャンパスの加速器・ビーム応用科学センターでは、当グループがタンデム加速器系の整備と運用を担当しているが、2015 年度末に加速器の運転を停止してガストリッパー・カナルの大口径化工事を行なった。また、その工事に引き続いて種々の加速器本体メンテナンス作業や AMS での異価イオン逐次入射 (入射分析電磁石部への高電圧印加) のための入射ビームラインの改造などを行なった。7 月初旬に実施された 3 年生学生実験でのビームタイムに合わせて全系を再稼働させた後は、ほぼ定常的な利用になっている。なお、ガストリッパーの大口径化により、以前は 50-70% であった C イオンの加速効率は 100% に向上している。

発表論文

《原著論文》

Study of the Reaction $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{296}\text{Lv}^*$ at RIKEN-GARIS:

D. Kaji, K. Morita, K. Morimoto, H. Haba, M. Asai, K. Fujita, Z. Gan, H. Geissel, H. Hasebe, S. Hofmann, M. Huang, Y. Komori, L. Ma, J. Maurer, M. Murakami, M. Takeyama, F. Tokanai, T. Tanaka, Y. Wakabayashi, T. Yamaguchij, S. Yamaki, and A. Yoshida,

J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 034201 (2017).

119番,120番元素など「ニホニウム」の次の元素探索とは:

藤田訓裕,

Material Stage 2017年3月号.

First direct measurement of the $^{11}\text{C}(\alpha, p)^{14}\text{N}$ stellar reaction by an extended thick-target method:

S. Hayakawa, S. Kubono, D. Kahl, H. Yamaguchi, D.N. Binh, T. Hashimoto, Y. Wakabayashi, J.J. He, N. Iwasa, S. Kato, T. Komatsubara, Y.K. Kwon, and T. Teranishi, Phys. Rev. C **93**, 065802 (2016).

《Proceedings》

Deuteron Analyzing Powers for \vec{d} - p Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three-Nucleon Forces:

K. Sekiguchi, Y. Wada, A. Watanabe, D. Eto, T. Akieda, H. Kon, K. Miki, N. Sakamoto, H. Sakai, M. Sasano, Y. Shimizu, H. Suzuki, T. Uesaka, Y. Yanagisawa, M. Dozono, S. Kawase, Y. Kubota, C.S. Lee, K. Yako, Y. Maeda, S. Kawakami, T. Yamamoto, S. Sakaguchi, T. Wakasa, J. Yasuda, A. Ohkura, Y. Shindo, M. Tabata, E. Milman, S. Chebotaryov, H. Okamura, and T.L. Tang,

Few-Body Systems **58**, 48 (2017).

Study of Three-Nucleon Force Effect via Few-Nucleon Scattering:

Y. Wada, K. Sekiguchi, U. Gebauer, J. Miyazaki, T. Taguchi, M. Dozono, H. Sakai, N. Sakamoto, M. Sasano, Y. Shimizu, H. Suzuki, T. Uesaka, S. Kawase, Y. Kubota, C.S. Lee, T.L. Tang, K. Yako, Y. Maeda, K. Miki, H. Okamura, S. Sakaguchi, and T. Wakasa,

Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. **40**, 1660070 (2016).

Development of Neutron Polarization Measurement System for Studying NN interaction in Nuclear Medium:

J. Yasuda, T. Wakasa, M. Dozono, T. Fukunaga, S. Gotanda, K. Hatanaka, Y. Kanaya, Y. Maeda, Y. Maeda, K. Miki, Y. Nishio, T. Noro, K. Ohnaka, S. Sakaguchi, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, A. Tamii, T. Taguchi, and Y. Wada,
Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. **40**, 1660073 (2016).

Study of Gamow-Teller transitions from ^{132}Sn via the (p, n) reaction at 220 MeV/u in inverse kinematics:

M. Sasano, J. Yasuda, R.G.T. Zegers, H. Baba, W. Chao, M. Dozono, N. Fukuda, N. Inabe, T. Isobe, G. Jhang, D. Kamaeda, T. Kubo, M. Kurata-Nishimura, E. Milman, T. Motobayashi, H. Otsu, V. Panin, W. Powell, H. Sakai, M. Sako, H. Sato, Y. Shimizu, L. Stuhl, H. Suzuki, S. Tangwancharoen, H. Takeda, T. Uesaka, K. Yoneda, J. Zenihiro, T. Kobayashi, T. Sumikama, T. Tako, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Togano, M. Shikata, J. Tsubota, K. Yako, K. Shimoura, S. Ota, S. Kawase, Y. Kubota, M. Takaki, S. Michimasa, K. Kisamori, C.S. Lee, H. Tokieda, M. Kobayashi, S. Koyama, N. Kobayashi, T. Wakasa, S. Sakaguchi, A. Krasznahorkay, T. Murakami, N. Nakatsuka, M. Kaneko, Y. Matsuda, D. Mucher, S. Reichert, D. Bazin, and J.W. Lee,
EPJ Web of Conferences **107**, 06003 (2016).

Inverse kinematics reactions studies using the WINDS slow neutron detector and the SAMURAI spectrometer:

J. Yasuda, M. Sasano, R.G.T. Zegers, H. Baba, W. Chao, M. Dozono, N. Fukuda, N. Inabe, T. Isobe, G. Jhang, D. Kameda, T. Kubo, M. Kurata-Nishimura, E. Milman, T. Motobayashi, H. Otsu, V. Panin, W. Powell, H. Sakai, M. Sako, H. Sato, Y. Shimizu, L. Stuhl, H. Suzuki, S. Tangwancharoen, H. Takeda, T. Uesaka, K. Yoneda, J. Zenihiro, T. Kobayashi, T. Sumikama, T. Tako, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Togano, M. Shikata, J. Tsubota, K. Yako, S. Shimoura, S. Ota, S. Kawase, Y. Kubota, M. Takaki, S. Michimasa, K. Kisamori, C.S. Lee, H. Tokieda, M. Kobayashi, S. Koyama, N. Kobayashi, T. Wakasa, S. Sakaguchi, A. Krasznahorkay, T. Murakami, N. Nakatsuka, M. Kaneko, Y. Matsuda, D. Mucher, S. Reichert, D. Bazin, and J.W. Lee,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **376**, 393 (2016).

Studies of Unstable Nuclei with Spin-Polarized Proton Target:

S. Sakaguchi, T. Uesaka, T. Wakui, S. Chebotaryov, T. Kawahara, S. Kawase, E. Mil-

man, T.L. Tang, K. Tateishi, and T. Teranishi,
Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. **40**, 1660071 (2016).

The Spin Studies in Few-Body Systems at Nuclotron:

V.P. Ladygin, I. Dobrin, V.V. Fimushkin, D.A. Finogenov, S.G. Genchev, Yu. V. Gurchin, A.P. Ierusalimov, A.Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, E.V. Karpechev, J.-T. Karachuk, S.V. Khabarov, T. Kawabata, A.N. Khrenov, V.A. Krasnov, A.B. Kurepin, A.K. Kurilkin, P.K. Kurilkin, N.B. Ladygina, D. Lipchinski, A.N. Livanov, Y. Maeda, A.I. Malakhov, G. Martinska, S.M. Piyadin, J. Popovichi, A.N. Prokofichev, V.L. Rapatsky, A.I. Reshetin, S.G. Reznikov, P.A. Rukoyatkin, S.Sakaguchi, H. Sakai, Y. Sasamoto, K. Sekiguchi, Ya.G. Skhomenko, K. Suda, V.V. Syschenko, G. Tarjanyiova, A.A. Terekhin, T. Uesaka, J. Urban, T.A. Vasiliev, I.E. Vnukov, N.I. Zamiatin, and E.V. Zubarev,
Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. **40**, 1660074 (2016).

《その他の論文》

Dependence of spin-polarized proton target performance on microwave resonator thickness parameter and operation temperature:

S. Chebotaryov, S. Sakaguchi *et al.*,
RIKEN Accel. Prog. Rep. **49**, 174 (2016).

Production of low-energy 4.17 MeV/nucleon ^9C beam with polyethylene degrader at RIPS:

E. Milman, T. Teranishi, S. Sakaguchi *et al.*,
RIKEN Accel. Prog. Rep. **49**, 160 (2016).

Development of the He-filling system for the SAMURAI spectrometer:

V. Panin, S. Chebotaryov, S. Sakaguchi *et al.*,
RIKEN Accel. Prog. Rep. **49**, 168 (2016).

講演

《海外での講演》

Discovery of Element 113 and Future Research Direction at RIKEN:

K. Morita (invited),
Nobel Symposia, NS160: Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements,
May 29 to June 3, 2016, Scania, Sweden

Elastic scattering of neutron-rich ${}^6\text{He}$ nuclei from polarized protons at 200A MeV:
S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration,
22nd International Spin Symposium, 27 September 2016, University of Illinois

《 国内での講演 》

113 番元素発見への道のり:

森田浩介 (招待講演)

第 64 回日本化学療法学会総会, 2016 年 6 月 9 日, 神戸国際会議場

113 番元素の発見:

森田浩介 (特別講演)

日本原子力産業協会総会, 2016 年 6 月 21 日, 東京都港区

The discovery of super-heavy element of atomic number $Z=113$ and beyond:

K. Morita (invited)

Nuclei in the Cosmos XIV(NIC XIV), June 22, 2016, TokiMesse, Niigata

GARIS の現状と今後:

藤田訓裕 (招待講演)

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学

Ti-Cm, V-Cm の障壁分布の探索:

渡辺健友, 加治大哉, 庭瀬暁隆, 平野剛, 藤田訓裕, 山野裕貴, 光岡駿, 森本幸司

第 122 回日本物理学会九州支部例会, 2016 年 12 月 10 日, 福岡大学

${}^{208}\text{Pb}({}^{51}\text{V}, xn){}^{259-x}\text{Db}$ 反応における融合障壁分布の測定:

庭瀬暁隆, 山野裕貴, 渡辺健友, 森田浩介, 藤田訓裕, 平野剛, 光岡駿, 加治大哉, 森本幸司, 羽場宏光, B.J.P.Gall, Z.Asfari

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学

^{50}Ti , ^{51}V + ^{248}Cm 反応における融合障壁分布の測定:

山野裕貴, 森田浩介, 藤田訓裕, 渡辺健友, 庭瀬暁隆, 平野剛, 光岡駿, 森本幸司, 加治大哉, 羽場宏光

日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月20日, 大阪大学

九大タンデム加速器施設の現状報告— 箱崎施設の廃止措置と伊都施設の整備状況 —:

野呂哲夫, 寺西高, 森田浩介, 若狭智嗣, 藤田訓裕, 坂口聡志

第29回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会(企画講演)、2016年6月30日、筑波大学

1 GeV での物理:

若狭智嗣

大阪大学核物理研究センター将来計画検討委員会(2017年2月、大阪大学)

Resonant scattering experiments at CRIB and RIPS:

T. Teranishi

International Symposium on Modern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science (MOTO16), June 26, 2016, Rikkyo University.

九州大学タンデム加速器実験室の廃止:

寺西高, 野呂哲夫, 森田浩介, 若狭智嗣, 藤田訓裕, 坂口聡志

日本原子力学会 2016年秋の大会、2016年9月7日、久留米シティプラザ

RI ビーム実験のための陽子シンチレーション検出器の開発:

秋山陽平, 寺西高, 栄大輔, 福多貴大, 上野熊紀, 岡祥平, 入部弘太郎, 吉田郭治, 綿部愛

第122回日本物理学会九州支部例会、2016年12月10日、福岡大学

RI ビーム実験のための反跳粒子 ΔE - E 検出器の開発:

福多貴大, 寺西高, 秋山陽平, 栄大輔, 上野熊紀, 岡祥平, 入部弘太郎, 吉田郭治, 綿部愛

第122回日本物理学会九州支部例会、2016年12月10日、福岡大学

Polarized proton target at SAMURAI: Elastic scattering of ^6He from polarized proton:

S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration

SAMURAI International Collaboration Workshop 2016, 5 September 2016, Kyushu University

Status of data analysis from experiment on p - ${}^6\text{He}$ elastic scattering at 200 MeV/nucleon:
S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration
日本物理学会 第72回年次大会, 18 March 2017, Osaka University

Experiment on elastic scattering of polarized protons from neutron-rich ${}^6\text{He}$ isotopes at 200 MeV/nucleon:
S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration
日本物理学会 2016年秋季大会, 24 September 2016, Miyazaki University

Search for low-lying resonances in ${}^{10}\text{N}$ structure via ${}^9\text{C} + p$ resonant scattering:
E. Milman, T. Teranishi, S. Sakaguchi for RRC27 Collaboration
日本物理学会 2016年秋季大会, 23 September 2016, Miyazaki University

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

陽子・ヘリウム3散乱による三体力荷電スピン $T = 3/2$ 項の決定

研究分担者：若狭智嗣 (研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子)

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

スピン偏極を取り入れた非束縛核分光法の開発

研究代表者：寺西高

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

室温超偏極陽子を用いた新しい不安定核分光法の開発

研究代表者：坂口聡志

文部省科学研究費補助金、若手研究 (B)

低エネルギー不安定核ビーム実験用の薄膜偏極陽子標的の開発

研究代表者：坂口聡志

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)

安田淳平、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

学部4年生卒業研究

入部弘太郎：(指導教員、寺西高)： ^{10}N 共鳴状態研究のための標的の厚さ測定

大城久典：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による重陽子分解反応および陽子移行反応の研究

岡田智香：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による重陽子分解反応および陽子移行反応の研究

後藤秀兵：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による重陽子分解反応および陽子移行反応の研究

松野雅樹：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による重陽子分解反応および陽子移行反応の研究

真部健太：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)： $^7\text{Li} + ^{51}\text{V}$ 反応における融合障壁測定のための Li イオン源開発

密本普治：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による重陽子分解反応および陽子移行反応の研究

綿部愛：(指導教員、寺西高)：共鳴散乱実験のための標的の厚さ測定

齋藤堯夫：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)： $^7\text{Li} + ^{51}\text{V} \rightarrow ^{58}\text{Fe}^*$ 反応測定のためのイオンチェンバー開発

吉田郭治：(指導教員、寺西高)：NaI-Ge 検出器を用いた γ 線同時計測実験と Geant4 を用いたシミュレーションによる再現

坂東慶伍：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)： ${}^7\text{Li} + {}^{51}\text{V}$ 系の融合障壁測定のための SNICS イオン源開発

修士論文

秋山陽平：(指導教員、寺西高)：CsI(Tl) シンチレーターを用いた陽子検出器の開発

河野晟之：(指導教員、野呂哲夫・坂口聡志)：九大タンデム加速器を用いた炭素 14-加速器質量分析システムの構築

栄大輔：(指導教員、寺西高)：飛行分離法による三重陽子ビームの開発

畑口俊也：(指導教員、野呂哲夫・坂口聡志)：九大での加速器質量分析システムのための高速逐次入射機構の構築

福多貴大：(指導教員、寺西高)：RI ビーム実験のための反跳粒子 ΔE - E 検出器の開発

山野裕貴：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕・若狭智嗣)： ${}^{51}\text{V} + {}^{248}\text{Cm}$, ${}^{208}\text{Pb}$ 系の融合障壁分布の測定

渡辺健友：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕・若狭智嗣)： ${}^{50}\text{Ti} + {}^{248}\text{Cm}$ の融合障壁分布の研究

博士論文

安田淳平：(指導教員、若狭智嗣)：Study of Gamow-Teller transitions from ${}^{132}\text{Sn}$ via the (p, n) reaction in inverse kinematics (逆運動学 (p, n) 反応による ${}^{132}\text{Sn}$ のガモフ・テラー遷移の研究)

学外での学会活動

- 野呂哲夫： 物理学会若手奨励賞 (実験核物理領域)・原子核談話会新人賞
選考委員長
大阪大学核物理研究センター サイクロトロン施設高度化・技術諮問
委員会委員
J-PARC 放射線安全委員会委員
- 若狭智嗣： 大阪大学核物理研究センター研究計画検討専門委員会委員
同 実験課題審査専門委員会委員
- 坂口聡志： 国際ワークショップ “SAMURAI International Collaboration Workshop
2016” (九州大学伊都キャンパス、2016年9月5,6日) 世話人
日本の核物理の将来レポート 編集委員

その他の活動と成果

スーパーサイエンススクール, 福岡県立八幡高等学校, 新元素合成後「失敗してもあきらめないで」, 2016年6月16日 (森田浩介)

日本学術会議 113回サイエンスカフェ, 富山房インターナショナル, 113番元素発見と命名権獲得までの長い道のり, 2016年6月17日 (森田浩介)

講演, 朝日カルチャーセンター 福岡校, 「新発見の113番元素」, 2016年10月10日 (藤田訓裕)

出前講義, 下関西高校, 「新元素の探索」, 2016年10月21日 (藤田訓裕)

九州学士会講演, 九州大学西陣プラザ, 113番新元素『ニホニウム』発見, 2017年3月18日 (森田浩介)

体験入学・実験「身の回りの放射能体験」, 2017年3月28日 (藤田訓裕)

体験入学・実験「物質を透過する粒子線」, 2017年3月28日 (寺西高・坂口聡志)

素粒子実験研究室

研究室構成員

川越 清以 教授

東城 順治 准教授 吉岡 瑞樹 (RCAPP) 准教授

織田 勲 助教 音野 瑛俊 (RCAPP) 助教 末原 大幹 助教

《 博士研究員 》

山口 博史 (特任助教)

《 大学院 博士課程 》

大石 航 松本 悟 調 翔平 富田 龍彦

中居 勇樹 角 直幸 高田 秀佐

《 大学院 修士課程 》

野口 恭平 真玉 将豊 森下 彩 Darnajou Mathieu

伊藤 拓実 古賀 淳 斉藤 貴士 関谷 泉

山口 尚輝 山城 大知

《 学部 卒業研究生 》

上原 英晃 堤 裕樹 藤野 主一 三船 陵子

宮崎 祐太 森 涼介

担当授業

- 川越
基幹物理学 IA(前期)×2、基礎物理学実験・同実験 (後期)、素粒子実験 (大学院、後期)
- 東城
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)、素粒子実験 (大学院、後期)

- 末原
自然科学総合実験 (後期)、基礎物理実験学・同実験 (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、調 翔平、Darnajou Mathieu、山口 尚輝)

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、国際共同研究 ATLAS 実験を推進している。LHC 加速器では、2015 年から設計値に重心系エネルギー 13 TeV での運転を再開し、実験を継続している。今年度は、シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良、検出器データベースの管理、ヒッグス粒子の性質の研究、超対称性粒子の探索、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** (川越 清以、東城 順治、織田 勸、音野 瑛俊、調 翔平)
ビーム衝突点から発生する多数の荷電粒子の検出において、ATLAS 検出器最内層に配置した内部飛跡検出器が重要な役割を果たす。我々のグループは、内部飛跡検出器の 1 つであるシリコン半導体飛跡検出器 (Semiconductor Tracker : SCT) の運転に精力的に取り組んできた。SCT 検出器の運転に参加する国内研究機関の中で、九州大学は唯一スタッフが CERN に常駐する大学である。2013 年までは東城が国内研究機関が連携して研究を進める上での中心となり、それ以降は音野がその役割を引き継いでいる。音野は、2013 年 11 月より SCT data quality coordinator を務め、2015 年の LHC の運転開始以降、CERN に常駐をしている博士 2 年の調と共に、ビーム衝突時における SCT 検出器の性能評価を行い、順調なデータ取得を実現した。2016 年 2 月から、織田が SCT 検出器の offline software coordinator を務め、検出器ソフトウェア全般において責任を持っている。2016 年 6 月から音野は SCT 検出器の副運転責任者を務め、12 月までの LHC の運転期間において円滑なデータ取得を実現した。音野は 2017 年 1 月から運転責任者として 2017 年 5 月に再開する LHC の運転に向けた準備を進めている。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。
- **検出器の状態の情報を保持するデータベースの管理** (織田 勸)
ATLAS 実験はその汎用検出器を構成する各検出器の時間的に変化する状

態の情報を保持するために Conditions Database と呼ばれるデータベースを持っている。Conditions Database はデータの取得、再構成、モニタリングやシミュレーションに用いられる。Conditions Database の各検出器の情報の更新や管理は、各検出器の担当者に任されている。Conditions Database 全体の調整・管理役として、ATLAS 実験のデータ準備部門 (Data Preparation) に (Deputy) Conditions Coordinator という役職が置かれている。織田は 2016 年の 1 年間は Conditions Coordinator を務め、円滑なデータ準備に貢献した。2016 年に取得した重心エネルギー 13 TeV での陽子陽子衝突、重心エネルギー 5.02 TeV と 8.16 TeV での陽子鉛原子核衝突の実データとそれらに対応するシミュレーション、将来の重心エネルギー 14 TeV での陽子陽子衝突のシミュレーションに用いる Conditions Database の準備、運用を、大きな問題なく行うことができた。

- **ヒッグス粒子の性質の研究 (織田 勸)**

我々のグループは、ヒッグス粒子が Z 粒子対に崩壊し、各 Z 粒子がレプトン (l 、電子またはミューオン) 対に崩壊する、4レプトンチャンネル ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$) の解析を 2012 年から行っている。このチャンネルには背景事象が少なく、ヒッグス粒子を完全に再構成できるという利点がある。織田は DAOD と呼ばれる解析用データの作成を担当した。2016 年 7 月までに取得した積分ルミノシティ 14.8 fb^{-1} の重心系エネルギー 13 TeV のデータを用いた解析結果を 2016 年 8 月に結果を公表した。質量が約 125 GeV のヒッグス粒子の生成断面積は $81^{+18}_{-16} \text{ pb}$ であり、ヒッグス粒子を再発見することができた。生成過程ごとの生成断面積などのヒッグス粒子の性質は 2σ の不定性の範囲内で標準模型の予測と一致した。質量が 200 GeV 以上の未知のスカラー共鳴状態の探索も行ったが、得られた結果は標準模型と 2σ の不定性の範囲で一致するものであり、新しい共鳴状態は発見されなかった。2016 年 10 月までに積分ルミノシティ約 36 fb^{-1} のデータを取得し、その解析を進めた。

- **新粒子の探索 (音野 瑛俊、調 翔平)**

ヒッグス粒子の発見によって素粒子標準模型から未発見粒子は無くなったが、謎は依然として多く残されている。一例として、ダークマターは天体観測から存在が示唆されているが候補となる粒子は素粒子標準模型に無い。LHC ではダークマターを直接生成できる可能性があるため、ATLAS 実験はこれまでも精力的に探索を行ってきた。ただし、ATLAS 実験の標準的な物理解析はヒッグス粒子のようにビーム衝突点で生成後に即座に崩壊する粒子をターゲットとしている。そこで、我々のグループでは SCT の一層目のある 300

mm までを飛程とするような長寿命の新粒子の探索に 2014 年から取り組んでいる。音野は標準模型の枠組みにある粒子の超対称性パートナーが長寿命粒子となる可能性に着目した。Run1 の取得データを用いて探索したが新粒子発見の兆候は残念ながら得られなかった。並行して、長寿命粒子を生む新たなシナリオを理論研究者らと考案し、2015 年に論文誌に受理されている。2016 年はこれらのシナリオについて実際に Run2 の取得データを用いて探索を進め、完了させた。発見には至らなかったが、2017 年 3 月の国際学会で結果を公表している。また、調は右巻きニュートリノに着目し、探索を開始した。右巻きニュートリノもダークマターの候補となり、同時にニュートリノの質量や宇宙のバリオン非対称性に説明を与えることができる。特に質量領域 2 - 30 GeV の右巻きニュートリノは長寿命となる。音野らの探索とは異なる終状態を持つため独自の発展が必要ではあるが、2017 年 3 月の日本物理学会ではシミュレーションを用いた再構成効率の見積もりを報告し、着実に研究を進めている。

- **検出器アップグレード計画** (川越 清以、東城 順治、織田 勸、音野 瑛俊、Darnajou Mathieu、山口 尚輝)

現行の LHC 加速器は、2023 年まで運転して積分ルミノシティ 300 fb^{-1} を実験に提供する予定である。その後は、加速器改良により瞬間ルミノシティを $(5-7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に増強し、2026 年から高ルミノシティ LHC (HL-LHC) として稼働させ、エネルギーフロンティア物理をさらに推進する計画である。HL-LHC 計画に対応し、ATLAS 実験では検出器をアップグレードする計画を進めている。特に大規模な計画として、内部飛跡検出器全体を新型の高放射線耐性シリコン検出器にアップグレードする。我々のグループは、シリコン検出器のアップグレード計画に参画するため、開発設備である「次世代シリコン半導体検出器開発システム」を導入した。システムの導入により、アルミ線ワイヤーボンディング・センサーと読み出しチップのプロロービング・多チャンネル電気特性評価とデータ収集・電子回路シミュレーションと設計・有限要素法による力学的および熱的設計・事象シミュレーションが可能となり、一環した開発環境を整備した。今年度は、システムを稼働させ、特に $25 \mu\text{m}$ アルミ線ワイヤーの自動ボンディングを行えるように整備した。ピクセル検出器開発の一環として、読み出しチップに現状利用できる FE-I4 を採用し、FPGA を用いた読み出し試験を行った。読み出し試験の手法・環境を確保し、今後の検出器モジュールの開発に繋げる予定である。また、HL-LHC 計画における最重要課題の一つであるヒッグス粒子の自己結合の測定に向け

たシミュレーション研究を行った。

国際リニアコライダー計画 (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、関谷 泉、山城 大知)
次世代加速器実験計画「国際リニアコライダー」(ILC)のための物理と測定器の研究を行っている。測定器の開発においては、ILC電磁カロリメータで用いる読み出し回路の開発および新型センサーの開発、プロトタイプのビームテストを行った。物理においては、ヒッグス等の物理解析で重要となるジェットクラスタリング、ジェットフレーバー識別ソフトウェアの改良などを行った。

- **位置感度のあるシリコン検出器の開発研究** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山城 大知)

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。センサーにはシリコンパッドが提案されており、センサーの安定性や組み立てのしやすさなど多くの利点がある。このシリコンパッドに位置情報が得られるPSD機能を付与することで、飛来する光子の位置や方向を精度よく決める等画期的な機能を持ったカロリメータが実現できると考えられ、その研究を行っている。本年度は小型のテストPSDセンサーにレーザー光を入射し、得られる位置の再現性や位置歪みの測定を行い、PSD機能の実証に成功した。今後、さらに本格的な試作へと進む。

- **シリコン電磁カロリメータ読み出しASICの性能評価およびプロトタイプ試験** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、関谷 泉)

シリコン電磁カロリメータの読み出しシステムの開発をフランス(LLR, LAL研究所等)と共同で行っている。九州大学では主にカロリメータの読み出しのために開発されたSKIROC2というASICの評価を行っている。このASICの評価のための専用評価基板を用いて、疑似信号を入力した際のASICの信号雑音比の測定や時間分解能の測定などを行っている。本年度はSKIROC2の改良バージョンであるSKIROC2Aと従来型のASICの比較を行い、信号雑音比等の基礎特性において従来と同等の性能が得られることを示すとともに従来型の問題点としてあげられた、閾値コントロール機能の不備や信号入力後に偽信号が継続する現象について調べ、特に閾値コントロール機能が改善されたことを確認した。また、このASICを用いたプロトタイプ測定器の加速器ビームを用いた試験をフランスと共同で行った。本年度はハドロンカロリメータとの協調動作を目指し、統合システムの試験を行った。

- **ILCにおけるクォーク識別ソフトウェアの改良** (末原 大幹)

東京大学と高エネルギー加速器研究機構に所属する共同研究者と、ILCにおけるクォーク識別ソフトウェアの改良を行っている。このソフトウェアは、ILCで得られると考えられるヒッグス粒子等による物理事象に対し、シミュレートされた各測定器の信号を解析し、測定器信号から元の事象を再構成するソフトウェアの一部で、特に重要なジェットの再構成およびフレーバーの特定を担うものである。本年度は本ソフトウェアが使用するライブラリの仕様変更によってフレーバー識別機能の性能が低下する問題を発見し、ライブラリの変更に取り組むとともに、新しいジェット再構成アルゴリズムの導入を行い、性能向上を図った。

ミューオン・電子転換過程の探索 (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、山口 博史、大石 航、中居 勇樹、野口恭平、斉藤 貴士)

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。世界最高強度のパルスミューオンビームを生成するための実験施設は、建屋が完成し、専用ビームラインの建設が進んでいる。我々の研究グループは、ミューオン-電子転換過程を探索するための検出器の開発を行っている。COMET実験の第一段階(Phase-I)では、 $O(10^{-15})$ の発見感度での実験を計画しており、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。さらに、Phase-Iで初めて生成するミューオンビームの性質を詳細に調べることが不可欠であり、 $O(10^{-17})$ の発見感度を目指した第二段階(Phase-II)へ進むためにも重要である。Phase-Iにおけるミューオンビームの研究とPhase-IIにおける物理測定では、ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータを用いる計画である。

● Phase-I トリガー検出器の開発 (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、山口 博史、中居 勇樹)

Phase-Iの物理測定に用いるトリガー検出器の開発を進めている。電子をトリガーするため、UVアクリルをチェレンコフ輻射体とし、信号-背景比の向上とタイミング情報を得るため、プラスチックシンチレータを組み合わせる。光検出器としてファインメッシュ型光電子増倍管(FM-PMT)を用いたプロトタイプ検出器の開発を進めた。主要な開発要素として、FM-PMT後段に設置する前置増幅回路、放射線耐性、検出器筐体の設計がある。前置増幅回路の開発は、放射線耐性を残し、一定レベル完成した。放射線耐性については、実験で想定する中性子・ガンマ線量に対応して、検出器構成各部の性能の線量依存性を研究した。中性子は神戸大学のタンデム加速器、ガンマ線は九州大学の加速器・ビーム応用科学センターにあるガンマ線照射施設におい

て、性能試験を行った。特に、前置増幅回路に用いるレギュレータの放射線耐性が懸案であり、性能試験を継続している。検出器筐体の設計も進行した。トリガー検出器全体を配置・支持し、実験環境下における背景事象の対する遮蔽、円筒型ドリフトチェンバー部のヘリウムに対する遮蔽を兼ね備えるデザインの開発が進行中である。

● **電磁カロリメータの開発** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、山口 博史、大石 航、野口 恭平、斉藤 貴士)

Phase-I のミューオンビームの研究、及び、Phase-II の物理測定に用いる、電磁カロリメータの開発を進めている。電磁カロリメータは、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。昨年度の結晶選定後、実機を目指した試作機の開発を行なった。特に、検出器のモジュール構造の改良、APD 用測温抵抗の選定、校正モニタリング用 LED の選定、検出器構成要素の放射線損傷試験、真空フィードスルー回路の開発、前置増幅回路の改良を進めた。これらの要素を取り入れた試作機を製作し、東北大学電子光理学研究センターにおいてビーム試験を行った。ビーム試験は、ストローチューブ飛跡検出器の試作機も合わせて性能評価を行なった。そのため、荷電粒子の飛跡を検出するため、真空中で動作させるシンチレーションファイバー検出器の開発も行なった。データ解析の結果として、エネルギー分解能の向上を確認したが改良点も見出され、引き続き開発を進める予定である。

ミュー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、眞玉 将豊、伊藤 拓実)

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、ミュー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) を測定する実験 (J-PARC E34 実験) を国際共同研究で進めている。ミューオンの異常磁気モーメント ($g-2$) の測定は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E821 実験が 0.54 ppm の精度で素粒子標準模型 (SM) から 3.3σ のずれを発表し、SM を超える物理 (BSM) の探索において重要な位置を占めている。また、電気双極子モーメント (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。本実験は、極冷ミューオンビームを生成・加速し、収束電場を用いずに超高精度磁場中にミューオンを蓄積することにより、 $g-2$ を

0.1 ppm の精度で、EDM を $10^{-21} e \cdot cm$ の感度で、それぞれを分離して測定し、BMS を探索する野心的な計画である。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を開発している。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 1.2 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。

- **シリコンストリップ検出器用読み出しチップの開発** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、眞玉 将豊、伊藤 拓実)

シリコンストリップ検出器に用いる読み出しチップの開発を進めている。昨年度まで、64 チャンネルを有するアナログチップである Slit2013 の開発をしてきた。その後、Slit2013 の後継機として、アナログ部 Slit2014 とデジタル部 GM2DV2 を備えた混載チップの Slit128A を開発した。1 チップあたり 128 チャンネルを有し、実機仕様を目指して開発を行った。FPGA を搭載した評価基板を開発し、性能評価をした。この過程では、基板開発に加え、ベアチップを基板に実装し、「次世代シリコン半導体検出器開発システム」の自動式アルミ線ワイヤーボンダーを用いて $25 \mu m$ 径のアルミ線ワイヤーボンディングを行っている。その結果、信号-雑音比・ゲイン・ノイズ・ダイナミックレンジにおいて要求を満たすが、パルス幅とタイムウォークでは要求を満たさなかった。そのため、改良を加えた TEG を設計・製作し、実機仕様を目指した次期チップを開発する計画である。

- **シリコンストリップ検出器用センサーの開発** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、伊藤 拓実)

シリコンストリップ検出器に用いるシリコンセンサーの開発を進めている。今年度は、実機仕様のシリコンセンサーの設計と製作を行った。センサーは、*p-in-n* 型の AC 結合で、6 インチウエハ上の最大面積を利用した。ピッチは $190 \mu m$ 、ストリップ数は 1024 本である。一つのデザインで二方向の読み出し、検出器モジュールのデザインと整合性を保つため、ダブルメタル手法を用いて読み出しパッドをセンサー外縁部に配置した。そのため、センサーを 90° 回転した場合も読み出しパッドの位置は同一である。センサーのデザインを完了後、その製作を行い、基礎的な性能評価を行った。性能評価では、「次世代シリコン半導体検出器開発システム」のプロバーを用いて、センサー背面にチャックから高電圧を印加し、プローブによる直接接触により漏れ電流・静電容量を測定し、良好な結果を得た。今後、全ストリップを検査をするための測定系の開発を行い、より詳細な性能評価とセンサーの大量生

産・検査に向けた準備を行う予定である。

中性子を用いた基礎物理 (吉岡 瑞樹、松本 悟、富田龍彦、角直幸、高田秀佐、森下彩、古賀淳)

- **高精度中性子崩壊寿命測定実験** (吉岡瑞樹、富田龍彦、角直幸、森下彩、古賀淳)

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中性子のフラックスと β 崩壊の量を知る必要があるが、これまで行われてきた実験では中性子と壁との相互作用やフラックスの系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験ではフラックスと β 崩壊電子を TPC 検出器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。本年度は新たにデータ収集を行い、その取得データの解析を行った。その結果、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た。ガス起因事象を定量的に評価するため、LiF の (n, γ) 反応事象のデータ収集を行い、解析を行った。また、ガス起因事象削減のため、新型検出器の開発および導入後の効果をモンテカルロシミュレーションにより評価した。新検出器の作製を行い、実機への導入作業を行った。

- **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、昨年度難点があることが明らかになったデータ収集系の改良を行った。また、データ解析に必要となるモンテカルロシミュレーションの開発を引き続き行った。また、標的核候補の一つであるスズを用いて予備データの取得を行い、必要な統計量を見積もった。
- **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、松本悟)

我々は低エネルギーの中性子と希ガス原子の散乱によりナノメートルスケールで未知の相互作用を探索する実験計画を立案している。実験装置は全て J-PARC/MLF/BL05 に設置済みであり、昨年度3月に初のデータ収集を行った。本年度はデータ収集を引き続き行い、従来の400倍のデータを取得できた。取得データの詳細な解析は現在進行中である。また、データ解析に必要なモンテカルロシミュレーションの開発を引き続きインディアナ大学と共同で行った。

発表論文

《原著論文》

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC,” *Nature Phys.* **13**, 852 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top quark spin observables in $t\bar{t}$ events using dilepton final states in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **1703**, 113 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair to Z -boson cross-section ratios at $\sqrt{s} = 13, 8, 7$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1702**, 117 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the prompt J/ψ pair production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 76 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 195 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**,

144 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $\psi(2S)$ and $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1701**, 117 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of charge and CP asymmetries in b -hadron decays using top-quark events collected by the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” JHEP **1702**, 071 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ZZ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\ell'^-\ell'^+$ and $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\nu\bar{\nu}$ channels with the ATLAS detector,” JHEP **1701**, 099 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for triboson $W^\pm W^\pm W^\mp$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 141 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W boson angular distributions in events with high transverse momentum jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 132 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for anomalous electroweak production of WW/WZ in association with a high-mass dijet system in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **95**, 032001 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to b -quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 11 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of material in the ATLAS tracker using secondary hadronic interactions in 7 TeV pp collisions,” JINST **11**, P11020 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ produc-

tion cross sections in multilepton final states using 3.2 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 40 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 653 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^+W^- production in association with one jet in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 114 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 251 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of hard double-parton scattering in four-jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment,” *JHEP* **1611**, 110 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Minimal Supersymmetric Standard Model Higgs bosons H/A and for a Z' boson in the $\tau\tau$ final state produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 585 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dark matter interpretations of ATLAS searches for the electroweak production of supersymmetric particles in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions,” *JHEP* **1609**, 175 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of the calorimeter response to single hadrons and determination of the jet energy scale uncertainty using LHC Run-1 pp -collision data with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 26 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $b\bar{b}$ dijet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 670 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in different-

flavour high-mass dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 541 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of top quark pair differential cross-sections in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **94**, 092003 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 158 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a Z boson and a photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **764**, 11 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in events with hadronically decaying tau leptons, jets and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV recorded with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 683 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell^+\ell^-b\bar{b}$, $\ell\nu b\bar{b}$, and $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ channels with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **765**, 32 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of exclusive $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ production and search for exclusive Higgs boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032011 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass new phenomena in the dilepton final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 372 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs and Z Boson Decays to $\phi\gamma$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **117**, 111802 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity in top quark events using the $e\mu$ final state with two b -tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1609**, 074 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in a final state containing two photons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions at the LHC using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 517 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom squark pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 547 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson produced in association with a W boson and decaying to four b -quarks via two spin-zero particles in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 605 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “The performance of the jet trigger for the ATLAS detector during 2011 data taking,” Eur. Phys. J. C **76**, 526 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived charged R -hadrons with the ATLAS detector in 3.2 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Lett. B **760**, 647 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for heavy diboson resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1609**, 173 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 052002 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $W^\pm Z$ boson pair-production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” Phys. Lett. B **762**, 1 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in events with

one lepton and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **762**, 334 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 052009 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in diphoton events at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1609**, 001 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section using $e\mu$ events with b-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **761**, 136 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross Section at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector at the LHC,” Phys. Rev. Lett. **117**, 182002 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV,” JHEP **1608**, 045 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for TeV-scale gravity signatures in high-mass final states with leptons and jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Lett. B **760**, 520 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson produced by vector-boson fusion and decaying to bottom quarks in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1611**, 112 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data,” Phys. Lett. B **761**, 350 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the photon identification

efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run-1 data,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 666 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the double-differential high-mass Drell-Yan cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 009 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions at low transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 502 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the angular coefficients in Z -boson events using electron and muon pairs from data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 159 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of gluinos decaying via stop and sbottom in events with b -jets and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032003 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the relative width difference of the B^0 - \bar{B}^0 system with the ATLAS detector,” *JHEP* **1606**, 081 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum, rapidity, and centrality dependence of inclusive charged-particle production in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV $p + \text{Pb}$ collisions measured by the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **763**, 313 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *New J. Phys.* **18**, 093016 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 565 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final

states with jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 392 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 005 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032005 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavour-violating decays of the Higgs and Z bosons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 70 (2017).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the charge asymmetry in top-quark pair production in the dilepton final state at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032006 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $Z\gamma$ and $Z\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 112002 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for metastable heavy charged particles with large ionization energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **93**, 112015 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 into muon pairs from data collected during the LHC Run 1 with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 513 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson decaying into $b\bar{b}$ produced in association with top quarks decaying hadronically in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1605**, 160 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial differential cross sections of gluon-fusion production of Higgs bosons decaying to $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ with the

ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” JHEP **1608**, 104 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 059 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm and Z -boson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 601 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons produced in association with a top quark and decaying via $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ using pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV by the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 555 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Beam-induced and cosmic-ray backgrounds observed in the ATLAS detector during the LHC 2012 proton-proton running period,” JINST **11**, P05013 (2016).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in the mass distribution of jet pairs with one or two jets identified as b -jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 229 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **76**, 292 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of high transverse momentum top quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 093 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1,” Eur. Phys. J. C **77**, 490 (2017).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in pp interactions at $\sqrt{s} = 8$ TeV measured with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 403 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $W^\pm Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings,” *Phys. Rev. D* **93**, 092004 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of total and differential W^+W^- production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple-gauge-boson couplings,” *JHEP* **1609**, 029 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 13$ TeV in final states with jets and two same-sign leptons or three leptons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 259 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of event-shape observables in $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 375 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions,” *Phys. Lett. B* **757**, 334 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of a vector-like quark via a heavy gluon in the $4b$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *Phys. Lett. B* **758**, 249 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 442 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP Invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson using the Optimal Observable method in the ditau decay channel with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 658 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in $\sqrt{s} = 13$ TeV

pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B* **758**, 67 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charged-particle multiplicity inside jets from $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 322 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for top squarks with R-parity-violating decays to all-hadronic final states with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions,” *JHEP* **1606**, 067 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for an excited muon decaying to a muon and two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *New J. Phys.* **18**, 073021 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing lepton flavour violation via neutrinoless $\tau \rightarrow 3\mu$ decays with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 232 (2016).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP-violating phase ϕ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS,” *JHEP* **1608**, 147 (2016).

H. Fukuda, N. Nagata, H. Otono, S. Shirai, “Higgsino Dark Matter or Not: Role of Disappearing Track Searches at the LHC and Future Colliders,” arXiv:1703.09675.

H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata, H. Otono, “Extending the LHC Reach for New Physics with Sub-Millimeter Displaced Vertices,” arXiv:1702.08613.

N. Nagata, H. Otono, S. Shirai, “Cornering compressed gluino at the LHC,” *JHEP* **1703**, 025 (2017).

B. Freund *et al.* [CALICE Collaboration], “DHCAL with Minimal Absorber: Measurements with Positrons”, 2016 JINST **11** P05008.

G. Eigen *et al.* [CALICE Collaboration], “Hadron shower decomposition in the highly

granular CALICE analogue hadron calorimeter”, 2016 JINST **11** P06013.

Z. Deng *et al.* [CALICE Collaboration], “Resistive Plate Chamber Digitization in a Hadronic Shower Environment”, 2016 JINST **11** P06014.

Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Sudo Yuji, Hiroki Sumida, “Performance evaluation of PSD for silicon ECAL”, Proc. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), arXiv:1703.08091

I. Sekiya, H. Hirai, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe, “Performance study of SKIROC2 and SKIROC2A with BGA testboard”, Proc. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), arXiv:1703.08105

H. Nishiguchi, K. Noguchi, K. Oishi, S. Tanaka, J. Tojo *et al.*, “Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum - The COMET straw tracker system”, Nucl. Instrum. Meth. A **845**, 269-272 (2017).

H. Otono, “LiNA - Lifetime of neutron apparatus with time projection chamber and solenoid coil”, Nucl. Instrum. Meth. A **845**, 278-280 (2017).

《Proceedings》

講演

《海外での講演》

Couplings and mass with 13 TeV data :

Susumu Oda on behalf of the ATLAS and CMS Collaborations

52nd Rencontres de Moriond EW 2017, March 2017, La Thuile, Italy

Towards a Technological Prototype for a High-granularity Electromagnetic Calorimeter for Future Lepton Colliders :

Taikan Suehara on behalf of ILD SiW-ECAL group

CALOR2016, May 2016, Deagu, Korea

ILD :

K. Kawagoe

ECFA Linear Collider Workshop, May-June 2016, Santander, Spain (招待講演).

CALICE DAQ Status and plans :

Taikan Suehara

ECFA LC2016, June 2016, Santander, Spain

LCFIPlus: Status & Plans :

T. Suehara, T. Tanabe, M. Kurata, J. Strube

ECFA LC2016, June 2016, Santander, Spain

Study of Direct top Yukawa Coupling Measurement at the ILC with $\sqrt{s} = 500$ GeV :

Y. Sudo, T. Suehara

TopLC2016, July 2016, DESY, Hamburg, Germany

Discussion on common DAQ :

Taikan Suehara

CALICE Collaboration meeting, September 2016, Arlington, Texas, United States

Performance evaluation of PSD for silicon ECAL :

Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Sudo Yuji,
Hiroki Sumida

International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), December 2016,
Morioka, Japan

Performance study of SKIROC2 and SKIROC2A with BGA testboard :

I. Sekiya, H. Hirai, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe

International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), December 2016,
Morioka, Japan

Silicon sensor studies in Kyushu :

T. Suehara, I. Sekiya, H. Yamashiro, T. Yoshioka, K. Kawagoe

CALICE Collaboration meeting, September 2016, Arlington, Texas, United States

Physics and Detectors at Future Linear Colliders :

K. Kawagoe

XXII DAE-BRNS High Energy Physics Symposium, December 2016, Delhi, India (招待講演).

Study on Position Sensitive Detector :

H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe

CALICE Collaboration meeting, March 2017, LLR, Palaiseau, France

SKIROC2/2A study in Kyushu :

I. Sekiya, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe

CALICE Collaboration meeting, March 2017, LLR, Palaiseau, France

Development of Straw Tube Tracker and Electromagnetic Calorimeter for The COMET Experiment :

Kou Oishi on behalf of the COMET Collaboration

International workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Measurement of muon $g-2$ /EDM at J-PARC :

Tamaki Yoshioka for the J-PARC E34 Collaboration

9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA), January 2017, Kyoto, Japan

Muon $g-2$ /EDM Measurement with a Ultra-Cold Muon Beam :

Junji Tojo for the J-PARC E34 Collaboration

CPAD Instrumentation Frontier 2016 : New Technologies for Discovery II, October 2016, California Institute of Technology, California, US

The status report of detector upgrade for Neutron Lifetime Measurement at J-PARC :

Tatsuhiko Tomita

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Precise neutron lifetime measurement with solenoid coil :

Naoyuki Sumi

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Study of Neutron Capture Gamma Rays for Precise Measurement of Neutron Lifetime
:

Jun Koga

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Resonance parameters of compound nucleus for T-violation search :

Shusuke Takada

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Neutron Lifetime Measurement at J-PARC/MLF/BL05 :

Tatsuhiko Tomita

PSI2016, October 2016, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland

Measurement of Resonance Parameter in the (n, γ) Reaction for T-violation search :

Shusuke Takada

International Nuclear Physics Conference, September 2016, Adelaide Convention Centre, Australia

NEUTRON LIFETIME MEASUREMENT AT J-PARC :

Naoyuki Sumi

14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, June 2016, Toki Messe, Niigata, Japan

Measurement of neutron lifetime with pulsed cold neutron beams at J-PARC: Analysis and Result :

Naoyuki Sumi

International Workshop; Probing Fundamental Symmetries and Interactions with UCN, April 2016, Waldthausen Castle, JGU Mainz, Germany

《国内での講演》

LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの発見感度の研究
調翔平

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

2016 年 LHC 13 TeV 実験：実験状況と SM/Higgs 測定
織田 勸

日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、宮崎大学

LHC における SUSY ダークマターの新しい探索提案
音野瑛俊

日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、宮崎大学

ダークマターの正体を探れ - 地上実験による直接探索 -
末原大幹

自然科学研究機構シンポジウム「現代天文学のフロンティア—第二の地球とダークな宇宙」、2017 年 3 月、東京

シリコン電磁カロリメーターの読み出し ASIC、SKIROC2 と SKIROC2A の性能評価
関谷泉

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

まとめと展望

素粒子実験領域・素粒子論領域合同シンポジウム 主題：電子陽電子衝突実験 (ILC と SuperKEKB) の物理と展望 - LHC 13TeV の結果を受けて -

川越清以

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

COMET 実験に用いるトリガー検出器の開発

中居勇樹

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

COMET 実験におけるビーム試験用シンチレーションファイバー検出器の開発

斉藤貴士

日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

COMET 実験用電磁カロリメータ試作機の開発

山口博史

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学

COMET 実験のための電磁カロリメータ試作機の性能評価

野口恭平

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学

COMET 実験のためのストロー飛跡検出器および電磁カロリメータの開発

大石航

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学

COMET 実験電磁カロリメータ試作機の性能評価

野口恭平

日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学

COMET 実験のためのビーム測定における粒子識別性能の研究

大石航

日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験 : シリコンストリップセンサー量産にむけた性能評価および品質検査手法開発

伊藤拓実

日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験 : シリコンストリップ検出器用読み出し ASIC の性能評価

真玉将豊

日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学

The status report of detector upgrade for Neutron Lifetime Measurement at J-PARC : Tatsuhiko Tomita

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Precise neutron lifetime measurement with solenoid coil :

Naoyuki Sumi

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Study of Neutron Capture Gamma Rays for Precise Measurement of Neutron Lifetime

:

Jun Koga

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Resonance parameters of compound nucleus for T-violation search :

Shusuke Takada

International workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), December 2016, Tokai, Japan

Neutron Lifetime Measurement at J-PARC/MLF/BL05 :

Tatsuhiko Tomita

PSI2016, October 2016, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland

Measurement of Resonance Parameter in the (n, γ) Reaction for T-violation search :

Shusuke Takada

International Nuclear Physics Conference, September 2016, Adelaide Convention Centre, Australia

NEUTRON LIFETIME MEASUREMENT AT J-PARC :

Naoyuki Sumi

14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, June 2016, Toki Messe, Niigata, Japan

Measurement of neutron lifetime with pulsed cold neutron beams at J-PARC: Analysis and Result :

Naoyuki Sumi

International Workshop; Probing Fundamental Symmetries and Interactions with UCN,

April 2016, Waldthausen Castle, JGU Mainz, Germany

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

荷電レプトンフレーバー非保存探索実験の革新的検出器開発による新展開

研究代表者 川越清以

文部省科学研究費補助金、特別推進研究

最高強度ミュオンビームによるミュオン・レプトンフレーバー非保存探索の新展開

研究分担者 東城順治 (研究代表者 大阪大学 久野良孝)

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (A)

LHC 実験の新局面における素粒子標準模型を超える物理の研究

研究代表者 東城順治

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究

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)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (S)

ミュオン異常磁気能率の精密測定による新物理法則の探索

研究分担者 吉岡瑞樹 (研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 齊藤直人)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (A))

J-PARC 大強度パルス中性子を用いた中性子寿命の精密測定

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 三島賢二)

住友財団基礎科学研究助成

世界最高精度での中性子寿命測定実験のための新型ガス検出器の開発

研究代表者 吉岡瑞樹

文部科学省研究費補助金、若手研究 (B)

ヒッグス粒子の性質測定による新物理の探索

研究代表者 織田勸

文部科学省研究費補助金、若手研究(B)

ATLAS 検出器を用いた長寿命グルイーノの探索

研究代表者 音野瑛俊

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

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—高エネルギー加速器研究機構の連携による加速器科学推進のための若手研究者育成

事業代表者 川越清以

学部4年生卒業研究

藤野 圭一、宮崎 祐太、森 涼介：(指導教員、川越清以)：オルソポジトロニウムの寿命測定

上原 英晃、堤 裕樹、三船 陵子：(指導教員、川越清以)：MPPCを用いてのミューオンの寿命測定

修士論文

- 野口 恭平：(指導教員、川越清以)：COMET 実験に用いる電磁カロリメータの開発
- 森下 彩：(指導教員、吉岡瑞樹)：J-PARCにおける中性子寿命測定実験の高精度化に向けた研究
- Darnajou Mathieu：(指導教員、東城順治)：Development of the Pixel Detector for the ATLAS Detector Upgrade

学外での学会活動

- 川越

文部科学省 国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議 体制及び
マネジメントの在り方検証作業部会委員 (3月から)

日本物理学会：代議員

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：大型シミュレーション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 detector group：Deputy Spokesperson

- 東城

日本物理学会：素粒子実験領域、領域運営委員

- 吉岡

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

高エネルギー物理学研究者会議：将来計画検討委員

物性理論研究室

研究室構成員

松井淳 助教

《 大学院 博士課程 》

野口慎平 井上雅郎 山北知史

《 大学院 修士課程 》

酒井雄太 小池貴之

《 学部 卒業研究生 》

大楠茂幸 時松幹

担当授業

量子統計力学、基幹物理学 IB 演習、物理数学演習

研究・教育目標と成果

自己平均性の破れた系の線形応答 (野口慎平)

ポリヤの壺モデルにおいて、ある条件を満たすパラメーターのときに自己平均性が破れる。二体の壺モデルをN体に拡張し、さらにバランスしていない条件でも自己平均性が破れることを示した。線形と非線形に拡張された壺モデルの両方で摂動解析を用い、自己平均性の破れが時間領域でどのような影響をもたらすか調べた。

マイクロレオロジーにおける粒子間相互作用の効果 (井上雅郎)

コロイド溶液のマイクロレオロジーでは、試料溶液中に分散させたプローブ粒子が周りの溶液から受ける抵抗力を測定する。本研究では、コロイド粒子間の相互作用がこの抵抗力に及ぼす影響を理論的に解明する。そこで、密度汎関数理論を二流体モデルに応用して、ソフトコアプローブ粒子がコロイド粒子から受ける抵抗力を数値的に求めた。その結果、コロイド粒子間の剛体球相互作用によって、抵抗力が減少することが分かった。

溶媒の粒子性を考慮したときのアインシュタインの粘度式の拡張 (山北知史)

溶質周りの溶媒和効果を考慮した場合の溶液の粘度の理論を定式化した。この理論では、溶媒和効果の影響は、流体力学方程式の境界条件として取り込まれる。また、動

的密度汎関数理論を数値計算することにより、溶媒が2種類ある場合の混み合い効果が溶液の粘度に及ぼす影響を調べた。

過冷却液体の異常拡散 (松井淳、酒井雄太)

シリンダー容器に1つの楕円体粒子とたくさんの剛体球を詰め、上下に加振させる。楕円体の大きさ、アスペクト比を変化させ、楕円体粒子が上昇していく様子を計算機シミュレーションを用いて解析した。

スモールネットワークのクラスター係数 (松井淳、大楠茂幸)

シリンダー容器に1つの楕円体粒子とたくさんの剛体球を詰め、上下に加振させる。楕円体の大きさ、アスペクト比を変化させ、楕円体粒子が上昇していく様子を計算機シミュレーションを用いて解析した。

針のパーコレーション (松井淳、時松幹)

シリンダー容器に1つの楕円体粒子とたくさんの剛体球を詰め、上下に加振させる。楕円体の大きさ、アスペクト比を変化させ、楕円体粒子が上昇していく様子を計算機シミュレーションを用いて解析した。

発表論文

《 原著論文 》

Dynamics of the entropic insertion of a large sphere into a cylindrical vessel:
Ryohei Hara, Ken-ichi Amano, Masahiro Kinoshita, and Akira Yoshimori,
J. Chem. Phys. 144, 105103 (2016)

講演

《 国内での講演 》

Combination of density functional theory with the two-fluid model:
井上雅郎, 吉森明
The 10th Mini-Symposium on Liquids (2016年10月, Okayama Univ.)

密度汎関数理論密度汎関数理論密度汎関数理論の二流体二流体モデルモデルへの
応用:
井上雅郎, 吉森明
日本物理学会 第72回年次大会 (2017年3月, 大阪大学)

楢田体のブラジルナッツ効果:

正岡直起, 松井淳

日本物理学会 第72回年次大会 (2017年3月, 大阪大学)

学部4年生卒業研究

大楠茂幸 : (指導教員、松井淳) : スモールネットワークの再考

時松幹 : (指導教員、松井淳) : 曲がった針のパーコレーション

修士論文

酒井雄太 : (指導教員、松井淳) : ガラス転移近傍の異常拡散

博士論文

原諒平 : (指導教員、吉森明) : Effect of a Density Structure of Solvent Particles on Solute Dynamics

山田一雄 : (指導教員、吉森明) : Violation of the Fluctuation-Response Relation for the Langevin model in the Non-equilibrium Steady State

学外での学会活動

日本物理教育学会第32回物理教育研究大会実行委員 (松井淳)

その他の活動と成果

体験入学での実験演習「エントロピー」を担当 (2017年3月)

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 御手洗菜美子 客員准教授

坂上 貴洋 助教

《 大学院 修士課程 》

案納 桂子 磯山 貴一 宇土 毅 椎葉 力哉

向 大樹 佐藤 俊之 相場 信孝 佐々木 雅人

《 学部 卒業研究生 》

西村 和真 林原 就斗 八尋 黎明 辻 恭平

金子 甲二郎 守屋 俊志

《 研究生 》

近藤 洋一郎

《 訪問研究者 》

早瀬 友美乃

担当授業

中西： 基幹物理学 II、相転移の統計力学、統計物理学 I・同演習、レトリック I

野村： 基幹物理学 II、物性物理学 II、量子統計物理学 (大学院)

坂上： 基幹物理学 IA 演習、物理学基礎演習

研究・教育目標と成果

1. ラトルバックのダイナミクス (近藤、中西) : ラトルバックという半楕円体状の玩具の運動を解析した。ラトルバックはコマのように回転(スピン)させると振動モードが成長し、スピンの減衰し、やがて反転するという挙動を示す。我々は、ラトルバックの運動を特徴付ける量としてスピンの反転にかかる時間(反転時間)に注目した。反転時間がラトルバックの曲率、主慣性モーメント等のパラメータにどう依存するかについて、滑り及び散逸がなくスピンや振動が小さい条件のもとで理論解析をおこない、先行研究よりも簡潔な

反転時間の表式を得た。さらに、運動方程式のシミュレーションによって、反転時間の表式が典型的なラトルバックのパラメータ領域で成り立つことを示し、振動やスピンの大ききときにシミュレーションが理論式からどのようにずれていくかを調べた。

2. 染色体の能動ダイナミクス (坂上) : 近年、細胞核内における染色体の動態解明に向け、蛍光ラベルした遺伝子座の実時間観察が盛んに行われている。遺伝子座の運動は確率的であり、平均二乗変位が時間に比例しない「異常拡散」となることが知られるが、そのメカニズムについては十分にわかっていない。本研究では、核内染色体を非熱的な能動ノイズに駆動される粘弾性媒質中の鎖状分子としてモデル化し、そのダイナミクスの解析から遺伝子座の運動特性を議論した。(齋藤拓也博士 [東大地震研] との共同研究)
3. 高分子折り畳み過程における反応座標の非マルコフダイナミクス (坂上) : 生体高分子のような多自由度複雑系の解析における有用な概念に「反応座標」が挙げられる。しかしその微視的な定式化は通常容易でなく、反応座標の運動にはマルコフ的なダイナミクスが仮定されることが少なくない。本研究では、高分子の形態揺らぎが問題となる時間スケールでは、一般に鎖の連結性由来の記憶効果による非マルコフ的效果が重要となることを議論した。特に、低温で相補的部位が結合するモデル高分子を用いて、折り畳み転移温度で反応座標が示す異常拡散特性を定量的に評価した。(E. Carlon [KU Leuven], C.Vanderzande[Hasselt], J.C. Walter [Montpellier] との共同研究)
4. 高分子の細孔通過現象における弱駆動レジームの記述 (坂上) : 高分子鎖がナノスケールの細孔を通り抜ける現象 (polymer translocation) は、DNAのシーケンズ技術開発との関わりも含め、この20年程の間に幅広い関心を集めてきた。基礎研究の見地からは、張力伝播理論 (T. Sakaue, Phys. Rev. E 76, 021803 (2007)) を基軸として、外場により駆動される非平衡ダイナミクスについての理解が大きく進んだ。一方、駆動力が無い場合のダイナミクスについては、未だに不明瞭な部分も多い。本研究では、駆動力無しの場合のダイナミクスも張力伝播理論により定式化し、それに対する線形応答理論から弱駆動レジームを導入した。また、駆動力の増大と共に非線形性が重要となり、それに伴い従来の強駆動レジームへクロスオーバーすることを示した。
5. 速い拡散のモード解析記述 (坂上) : ソフトマターや生体系で見られる遅い拡散 (sub-diffusion) では、多くの場合、その背後に「協働運動領域の増大」

が隠れている。典型例は高分子鎖上のラベルモノマーの運動に見られ、その場合の協働運動様式は張力伝播に対応する。線形近似の枠内では、この協働運動はモード解析による数学的記述が可能である。本研究では、速い拡散 (super-diffusion) を記述するモード解析を提案した。このような視点で眺めると、遅い拡散と速い拡散の間には、ある種の相補的關係があることがわかる。興味深いことに、遅い拡散を記述するモード方程式が調和ポテンシャル中の過減衰ランジュバン方程式の形であるのに対し、速い拡散を記述するモード方程式は、「慣性項」を含むランジュバン方程式の形になることがわかった。(齋藤拓也博士 [東大地震研] との共同研究)

6. 離散的対称性と LSM の定理 (磯山, 野村) : Lieb-Schultz-Mattis(LSM) の定理で、1次元量子系で半整数スピンでは無限極限で基底状態と縮退する状態があることが証明されている。これまでの研究では、LSM の方法で構成された基底状態と縮退する状態の対称性について、並進対称性と対応する波数にのみ検討されており、これ以外の離散的対称性 (スピン反転対称性、空間反転対称性、時間反転対称性) については議論が不十分であった。我々は、LSM の手法で作られた複数の状態がどのような離散的対称性を持っているか、またそれら候補のいずれが基底状態と縮退しているかについて、状態の規格化という観点から議論した。
7. 電気粘性流体のレオロジー (宇土、坂上、中西) : 外部電場によって実効的な粘性が変化する流体を電気粘性流体という。本研究では、流体系の相分離現象のモデルであるモデル H に分極の効果を加えたモデルを用いて、2次元系と3次元系で数値実験を行った。平行な2枚の電極間に誘電率の異なる2つの流体を満たし、媒質に電場とせん断を加えて、生じる2相の構造と実効粘性の関係を調べた。その結果、2次元系では、せん断速度に対して電場が強い時には電場方向に沿ったコラム状の界面構造が流れ方向に傾いた状態で安定し、界面張力の効果で系の実効粘性が大きくなった。電場を弱くすると界面構造の不安定化し、実効粘性は小さくなった。3次元系では、流れ方向と電場方向のそれぞれに平行な界面構造が安定し、実効粘性は媒質の粘性と同程度であった。
8. 粘弾性乱流 (椎葉、坂上、中西) : 2次元高分子溶液の粘弾性流体の微視的モデルを構築し、それを用い Kolmogorov 流のシミュレーションを行った。粘弾性体の応力場の巨視的モデルとして知られる Oldroyd-B と安定性の比較し、微視的モデルの妥当性を確認した。また流速の空間パワースペクト

ルによって、Kolmogorov 流の乱流状態の性質を調べた。微視的モデルで低 Weissenberg 数での乱流は確認することができたが、高 Weissenberg 数の乱流を確認することはできなかった。

9. 結晶成長のシミュレーション (佐藤、坂上、中西) : 融液成長における結晶界面の成長は界面付近の潜熱の拡散と界面張力の効果が大きく影響し、樹枝状結晶のような複雑な結晶形が形成される。この樹枝状結晶を再現するためにフェーズフィールド模型を用いて融液成長の数値実験を行った。界面自由エネルギーの異方性と界面付近でのノイズを組み込んだ模型を用いることにより、樹枝状の結晶形を得た。
10. Majumdar-Gosh 模型近傍での縮退の解け方 (佐々木、野村) : 有限系では、いわゆる自発的対称性の破れは起こらず、通常、基底状態は縮退しない。しかし、Majumdar-Gosh 模型の基底状態はダイマー状態であり、有限系でも基底状態に縮退がある事が知られている。この基底状態の性質を調べるために、J1-J2 模型の次近接相互作用の係数を変化させ、Majumdar-Gosh 模型の近傍で数値計算を行い、基底状態の縮退の解け方を見た。その結果、生じたエネルギーギャップにサイズ依存性がある事を見出した。

発表論文

《 原著論文 》

1. Shin-ichiro Nagahiro and Hiizu Nakanishi, Phys. Rev. E 94, 062614 (2016), "Negative pressure in shear thickening bands of a dilatant Fluid"
2. T. Sakaue and C.H. Nakajima, "Miscibility phase diagram of ring-polymer blends: A topological effect" Phys. Rev. E 93, 042502:1-9 (2016)
3. K. Shitara and T. Sakaue "Shear modulus of structured electro-rheological fluid mixtures" Phys. Rev. E 93, 052603:1-7 (2016)
4. T. Sakaue "Dynamics of Polymer Translocation: A Short Review with an Introduction of Weakly-Driven Regime" Polymers 8, 424:1-12 (2016)
5. T. Sakaue and T. Saito "Active diffusion of model chromosomal loci driven by athermal noise" Soft Matter 13, 81-87 (2017)
6. T. Sakaue, J.C. Walter, E. Carlon and C. Vanderzande "Non-Markovian dynamics of reaction coordinate in polymer folding" Soft Matter, 2017, Advance Article (DOI: 10.1039/C7SM00395A)
7. T. Saito and T. Sakaue "Complementary mode analyses between sub-and super-diffusions" Phys. Rev. E, in press.

《Proceedings》

《その他の論文》

中西秀、市川正敏、日本物理学会誌, vol.71, No.7 (2016) 480–483. 「コーヒーの湯気：水面に浮遊する微小水滴のダイナミクス」

著書

講演

《海外での講演》

1. T. Sakaue, “Topological constraint on the phase behavior of ring polymer blends” (Invited talk) Polymers with spatial and mechanical constraints, 2016/7/7, Venice, Italy

《国内での講演》

1. 坂上貴洋 「染色体の能動ダイナミクスと異常拡散」(招待講演) 異常拡散現象をめぐる最近の進展 神奈川 2016年9月1日
2. 日本物理学会 2016年秋季大会 2016年9月13日～16日、於：金沢大学
 - (a) 近藤洋一郎, 中西秀, 「ラトルバックの反転時間」 13pAF-1
 - (b) 早瀬友美乃, 坂上貴洋, 中西秀, 「シリンダー内での高分子圧縮にみられるヒステリシス」 13pBE-14
 - (c) 向大樹, 野村清英, 「Ashkin-Teller 多重臨界点のひねり境界条件法による解析」 13aAF-6
 - (d) 坂上貴洋, 齋藤拓也, 「染色体の能動ダイナミクス」 15pBE-6
 - (e) 齋藤拓也, 坂上貴洋, 「速度一定条件下での高分子の伸長過程の揺らぎ」 16aPS-14
3. T. Sakaue, “Active diffusion of chromosomal loci driven by athermal noise” (Invited talk) Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science, 2016/11/3, Kagoshima, Japan
4. 第122回日本物理学会九州支部例会 2016年12月10日於：福岡大学
 - (a) 二相溶液の油気粘性流体のシミュレーション 宇土弘毅、中西秀、坂上貴洋
 - (b) 格子ボルツマン法を用いた弾性乱流のシミュレーション 椎葉力哉、中西秀、坂上貴洋
 - (c) 磯山貴一, 野村清英, 「離散的対称性と LSM の定理」
 - (d) 向大樹, 野村清英, 「Ashkin-Teller 多重臨界点のひねり境界条件法による解析— $S=1/2$ ボンド交代 XXZ スピン鎖—」

- (e) 野村清英、「Lieb-Schultz-Mattis の定理とひねり境界条件」
- 5. 第 72 回日本物理学会年次大会 2017 年 3 月 17 日～20 日、於：大阪大学
 - (a) 磯山貴一, 野村清英、「離散的対称性と Lieb-Schultz-Mattis の定理」19pB12-7
 - (b) 野村清英、「Lieb-Schultz-Mattis の定理とひねり境界条件」19pB12-8
 - (c) 向大樹, 野村清英、「Ashkin-Teller 多重臨界点のひねり境界条件法による解析」20aB11-11
 - (d) 坂上貴洋、「細胞スケール空間での DNA の混合・分離挙動」18pC35-1

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

1. 中西秀、萌芽、「水面上の微小水滴の生成・浮遊機構とその集団運動：コーヒーの湯気の物理学」（研究代表）
2. 中西秀、基盤 (C)、「ダイラタント流体の二種類の異なるずり粘化メカニズムの解明」（分担者、代表者：永弘 進一郎 (仙台大専))
3. 野村 清英, 基盤 (C)、「パイロクロア格子が創出する新奇スピン液体相の物性研究」（連携研究者、代表：大塚 博巳 (首都大学東京))
4. 坂上貴洋、基盤 (B) 「非相溶性ブレンドの電気粘性効果」（研究代表）
5. 坂上貴洋, 新学術領域研究 (ゆらぎと構造の協奏) 公募研究、「負の相関に起因する異常拡散現象とその周辺」（研究代表）

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

坂上貴洋 JST さきがけ (理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築)、「高分子物質のトポロジカル構造解析による新規物性の探索と設計」

学部 4 年生卒業研究

1. 金子 甲二郎 「2次元系の棒状自己駆動粒子 (SPR) の MD simulation」
2. 守屋 俊志 「Ashkin-Teller モデルの多重臨界点とひねり境界条件」
3. 辻 恭平 「サイトパーコレーションの臨界指数」
4. 西村 和真 「カオスのしくみ 散逸系と保存系」
5. 林原 就斗 「一列縦隊拡散の平均二乗変位の粒子数密度依存性」
6. 八尋 黎明 「量子ホール効果と TKNN の公式」

修士論文

1. 磯山 貴一「Lieb-Schultz-Mattis の定理と離散的対称性」
2. 宇土 弘毅「二相溶液の電気粘性流体の界面構造と実効粘性」
3. 椎葉 力哉「粘弾性コルモゴロフ流の安定性」
4. 向 大樹「Ashkin-Teller 多重臨界点のひねり境界条件法による解析— $S = 1/2$ ボンド交代 XXZ スピン鎖 —」

学外での学会活動

1. 中西秀、日本物理学会 代議員、
2. 野村清英、日本物理学会 会誌編集委員

凝縮系理論

研究室構成員

河合伸 准教授 成清修 准教授

《 大学院 修士課程 》

渡邊大悟 坂井俊宏 市田大生

《 学部 卒業研究生 》

明代浩 池田萌 井上大司 (後期)

担当授業

身の回りの物理学 (河合伸)、物理数学I(河合伸)、最先端物理学 (まとめ係り担当 : 河合伸)

統計力学 II(成清修)、特殊相対性理論・電気力学 (成清修)、非平衡物理学 (成清修)

研究・教育目標と成果

Ge(111) 表面 $c(2\times 8)$ 原子空孔 (河合伸、坂井俊宏)

Ge(111) 表面 $c(2\times 8)$ 原子空孔の拡散過程における準安定状態を第一原理計算によりもとめた。実験で観測される特異な STM像を説明し、その出現頻度を明らかにした。

Si(111)Sn 表面 Si 置換欠陥 (河合伸、井上大司)

Si(111)Sn 表面で観測される Si 置換欠陥の構造を第一原理計算によりもとめた。STMで観測される Si 置換欠陥周囲の Sn 原子の構造と電荷状態を理論的に再現した。さらに、電子線回折で報告されているストリーク構造も理論的に説明した。

高温超伝導体の正常相はインコヒーレントな金属である (成清修)

高温超伝導体の正常相は、コヒーレントな金属に対する標準理論である Fermi 流体論では記述することができず、近年、インコヒーレントな金属としてとらえるべきとする議論が増えてきている。標準理論の観点からは、Hall 効果の実験結果は長年の疑問であったが、インコヒーレントな金属としてスペクトル関数法によって計算してみ

ると理解可能であることがわかった。[原著論文]

単純でないオブジェクトに対して Ward 恒等式を完成させた (成清修)

Ward 恒等式は多体問題において最も基本的な関係式であるが、通常は基本的な粒子状態について議論されていて、非粒子状態やひろがりをもつ束縛状態についての議論は未完であった。また、粒子的電流に関する Ward 恒等式はよく知られているが、熱流に関する Ward 恒等式には不備があった。これらの未完ないし不備の部分無くした。

[その他の論文]

Fermi 流体における輸送理論の混乱を整理した (成清修)

異方的 Fermi 流体の輸送現象の理論は複雑であるが、結果は Boltzmann 方程式に基づいた解析と等価である。まず、このことをしっかりと確認した。高温超伝導体などに見られる異常な輸送現象の説明が、FLEX 近似を用いた Fermi 流体論の枠組みで可能であると喧伝されてきたが、それは、Boltzmann 方程式による結果と矛盾し、近似の不備に過ぎないことを示した。[その他の論文]

トリ言語は文法なしに進化する (福之上未来、成清修)

現在のヒトが文法構造をもつ言語を駆使していることに異論はないが、もっと原始的な生物が言語を使用する場面を想像すると文法の存在は怪しくなる。近年、岡ノ谷たちはトリの言語の解析や理論化を進めており、相互分節化仮説を提唱している。しかし、彼らの理論においても、かなり賢いエージェントの存在を前提しており、もっと原始的な言語が進化の途上で使われていた可能性がある。そこで、我々は集団的模倣ゲーム理論に基づいて、文法なしの原始言語の可能性をシミュレーションを用いて探った。[その他の論文]

発表論文

《 原著論文 》

Spectral function method for Hall conductivity of incoherent metals:

Osamu Narikiyo

International Journal of Modern Physics B

(doi: 10.1142/S0217979217501120)(Published: 28 February 2017).

《 その他の論文 》

Ward identities for charge and heat currents of particle-particle and particle-hole pairs:
Osamu Narikiyo
arXiv:1703.04409.

A diagrammer's note on DC conductivity of anisotropic Fermi liquids for beginners
- Maebashi-Fukuyama formula and Taylor formula:
Osamu Narikiyo
arXiv:1607.04705.

Early Evolution of Bird-Type Language without Grammar - Duplication and Mutation:
Miki Fukunoue, Osamu Narikiyo
arXiv:1611.03327.

学部4年生卒業研究

明代浩：(指導教員、成清修)：圏論的量子場理論における局所ゲージ不変性

池田萌：(指導教員、成清修)：ホログラフィー原理による量子情報と重力理論の対応

井上大司：(指導教員、河合伸)：Sn吸着Si(111)表面Si置換原子が誘起する
構造・電荷状態の変形

修士論文

渡邊大悟：(指導教員、成清修)：量子測定における誤差と擾乱のトレードオフ関係

その他の活動と成果

磁性物理学

研究室構成員

和田裕文 教授

光田暁弘 准教授

《 大学院 修士課程 》

大山耕平 林田愛希羅 平嶋将大 前山聖哉

後藤政男 田邊巧祐 鳩山慎太郎 福田光祐

《 学部 卒業研究生 》

兼田基希 下迫龍一

《 訪問研究者 》

大山 研司 教授 (茨城大学大学院理工学研究科)

水戸 毅 准教授 (兵庫県立大学大学院物質理学研究科)

担当授業

熱力学 (和田裕文)、素励起物理学 (和田裕文)、物理学総論 (和田裕文)、物性物理学 I(光田暁弘)、基幹物理学 IB(光田暁弘)

研究・教育目標と成果

巨大磁気熱量効果を示す Mn 化合物を用いた磁気冷凍作業物質の開発 (和田裕文、平嶋将太、前山聖哉、福田光祐)

Fe₂P 型を持つ (Mn,Fe)₂(P,Si) 化合物は巨大磁気熱量効果を示す。この物質をベースとした磁気冷凍材料の開発とその物理を調べている。今年度はアーク炉による妖怪とその後の熱処理によって、バルク材料の強度が大幅に向上することを見出した。また磁場中で測定できる DSC 装置を作製し、(Mn,Fe,Ru)₂(P,Si) 試料の磁気熱量効果を測定することに成功した。これによりこれまで SQUID で測定していた物理量を我々の研究室でも測定できるようになった。また熱伝導度は磁気冷凍材料の開発にとっても重要なパラメータであるので、現在熱伝導度の温度変化を測定できる装置を作製している。

磁場中伝導現象の研究 (和田裕文、林田愛希羅、田邊巧祐、鳩山慎太郎)

最近、磁気抵抗やホール効果といった磁場中での伝導現象に興味を持ち、研究を進め

ている。今年度は遍歴電子メタ磁性体である $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ や RCO_2 ($\text{R}=\text{Er}, \text{Lu}$) のホール効果の磁場依存性について測定した。両物質とも磁場で常磁性から強磁性に転移するときに正常ホール係数が大きく変化することを見出した。また前者の物質は異常ホール効果が極めて大きいことも見出した。

価数秩序物質 YbPd の価数測定 (光田暁弘、大山耕平、和田裕文)

立方晶 CsCl 型構造をもつ YbPd は金属的な電気伝導を示しながら価数秩序を示す特異な物質である。価数秩序後、磁性的な Yb^{3+} と非磁性的な $\text{Yb}^{2.6+}$ が秩序配列し、磁性的な Yb^{3+} は更に低温で磁気秩序を示す。本年度は、従来から報告されている価数の温度依存性が本質的でないと予想し、新たに合成した歪みを含まない粉末試料を用いて価数測定を行った。測定は SPring-8 の BL01B1 で行った。その結果、価数秩序転移である $T_1 = 105$ K, 構造相転移である $T_2 = 125$ K において、それぞれ 0.01 程度の価数変化が明らかになり、更に T_2 から室温にかけて 0.04 程度価数変化することが明らかになった。これまでの温度依存性がないという報告とは大きく異なる新しい結果である。今後、この新しい結果を踏まえて YbPd の価数秩序の振舞について再検討していく。

逐次価数転移を示す EuTX 系の圧力効果 (光田暁弘、後藤政男、和田裕文)

層状六方晶化合物 EuTX ($\text{T}=\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ni}$, $\text{X}=\text{P}, \text{As}$) は価数転移および価数秩序転移を示し、それらが逐次的に起こる物質群として興味を持たれている。本年度は EuNiP の単結晶試料の作製に成功し、圧力下で磁化測定を行った。その結果、常圧下で $T = 100$ K 付近で観測される価数転移が圧力と共に高温側へシフトすることが明らかになった。更に $T = 5$ K における飽和磁化が圧力と共に大きく減少することが明らかになった。圧力によって非磁性的な Eu^{3+} の方向へ価数変化していることを示唆する結果を得た。今後、より高い圧力の振舞を電気抵抗測定から調べて行く。また、同じ物質群の 1 つである EuPtP について高圧・低温下で粉末 X 線回折を行い構造変化を調べた。測定は SPring-8 の BL10XU で行った。その結果、圧力によって価数転移を示し、新しい価数秩序相が出現していることが明らかになった。c 面内に Eu^{2+} または Eu^{3+} が並び、これらが c 軸方向に $\dots-(2+)-(3+)-(3+)-(2+)-(3+)-(3+)-\dots$ の順番で積層している。これは従来から指摘されている $(2 + 4/6)$ 価の平均価数 (δ 相) に対応している。 δ 相の価数秩序構造を直接的に初めて観測した。

発表論文

《 原著論文 》

High-field transport properties of itinerant electron metamagnetic $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$:
Hirofumi Wada, Yoshiro Maekawa, Daichi Kawasaki

Journal of Science: Advanced Materials and Devices vol. **1** (2016) 179-184.

Magnetocaloric properties of $(\text{MnFeRu})_2(\text{PSi})$ as magnetic refrigerants near room temperature:

Takayuki Ohnishi, Kei Soejima, Keiichiro Yamashita and Hirofumi Wada

Magnetochemistry vol. **3** (2017) 6 (8 pages).

Large Magnetoresistance and Volume Expansion Associated with Valence Transition in $\text{Eu}(\text{Rh}_{1-x}\text{Ir}_x)_2\text{Si}_2$:

A. Mitsuda, T. Fujimoto, E. Kishaba, S. Hamano, A. Kondo, K. Kindo, H. Wada

J. Phys. Soc. Jpn. Vol. **85** (2016) 124703-1-6.

《Proceedings》

Magnetocaloric properties of $(\text{MnFe})_2\text{PGe}$ and $(\text{MnFe})_2\text{PSi}$ compounds fabricated by a melting method:

M. Hirashima and H. Wada

AIP Conference Proceedings vol. **1763** (2016) 020004.

《その他の論文》

固体の熱量効果による冷却技術

I. タケウチ, K. サンデマン 著, 和田裕文 訳

パリティ (丸善) 11月号, (2016) 4-12.

講演

《国内での講演》

磁気熱量効果と磁気冷凍 —材料の立場から (基調講演) :

和田 裕文

2016年度日本冷凍空調学会年次大会

神戸大学 2016年9月7日

希土類化合物 REPd_2Si_2 の RE 価数と ^{105}Pd -NQR 周波数の相関:

濱端良輔, 江見直哉, 中山大將, 丸山丈博, 三ツ森雄大, 小山岳秀, 上田光一, 水戸毅, 辻

井直人, 光田暁弘

日本物理学会 2016 年秋季大会

バルク Eu 3d 内殻スペクトルから見た EuPd_2Si_2 の温度誘起価数転移:

三村功次郎, 魚住孝幸, 佐藤仁, 上田茂典, 光田暁弘, 田口幸広, 島田賢也, 生天目博文,
谷口雅樹

日本物理学会 2016 年秋季大会

硬 X 線光電子分光による $\text{Eu}(\text{Rh}_{1-x}\text{Ir}_x)_2\text{Si}_2$ の温度誘起価数転移の研究:

松本孝之, 市木勝也, 安齋太陽, 阿部晃大, 石原涼奈, 竹下遼平, 魚住孝幸, 佐藤仁, A.
Rousuli, 上田茂典, 田口幸広, 藤本巧, 喜舎場英吾, 光田暁弘, 和田裕文, 三村功次郎

日本物理学会 2016 年秋季大会

価数揺動系 EuNi_2X_2 ($\text{X}=\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, P) の超強磁場磁化測定 II:

市川俊和, 池田暁彦, 松田康弘, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会 2016 年秋季大会

遍歴電子メタ磁性体 $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ の磁気抵抗:

林田愛希羅, 和田裕文

第 122 回日本物理学会九州支部例会

巨大磁気熱量効果を示す Mn 化合物の磁性:

和田裕文

中性子産業利用推進協議会等主催平成 28 年度磁性材料研究会

東京エッサム神田ホール 2017 年 1 月 19 日

ErCo_2 の高圧下のホール効果:

鳩山慎太郎, 和田裕文, 光田暁弘

日本物理学会第 72 回年次大会

ホール効果と磁気抵抗から見た EuNi_2Ge_2 の圧力下価数転移:

和田裕文, 合木悠祐, 光田暁弘

日本物理学会第 72 回年次大会

価数揺動系 EuNi_2X_2 ($\text{X}=\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, P) の超強磁場磁化測定 III:

市川俊和, 池田暁彦, 松田康弘, 松尾晶, 金道浩一, 光田暁弘, 和田裕文
日本物理学会第 72 回年次大会

EuPtP の高圧・低温下の粉末 X 線回折:
光田暁弘, 後藤政男, 平尾直久, 水牧仁一朗, 大石泰生, 和田裕文
日本物理学会第 72 回年次大会

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》
文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)
巨大磁気熱量効果を示す一次相転移磁性体の熱伝導度研究
研究代表者：和田裕文

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》
JST ALCA
階層構造磁気蓄熱再生器を持つ磁気ヒートポンプの開発
研究代表者:川南 剛

学部 4 年生卒業研究

兼田基希：(指導教員、光田暁弘)：交換バイアス型スピンバルブ素子における GMR
効果の圧力依存性
下迫龍一：(指導教員、和田裕文)：(MnFe)₂(PSi) の磁性に対する Sb 置換効果

修士論文

大山耕平：(指導教員、光田暁弘)：価数秩序物質 YbPd の精密価数測定及び磁気構造
解析
林田愛希羅：(指導教員、和田裕文)：遍歴電子メタ磁性体 La(Fe_xSi_{1-x})₁₃ の磁場中伝導
現象
平嶋将大：(指導教員、和田裕文)：(Mn,Fe)₂(P,Si) 系化合物のバルク化についての研究

前山聖哉：(指導教員、和田裕文)：磁場中示差走査熱量計 (DSC) の作製と磁気熱量効果の測定

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副研究院長

量子微小物性 A,B

研究室構成員

渡部行男 (量子微小物性 A) 教授

荒井毅 (量子微小物性 B) 准助教

担当授業

————— 量子微小物性 A 渡部 —————
物性物理学 III (週 1 コマ)
原子分子の量子力学 (週 1 コマ)
電磁気学 II (週 1 コマ)
最先端物理学 (オムニバス方式の分担者)
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。
物理学科教授による講義参観を受けた (事前予告無し延べ 4 件)。即ち、物理学科の他
教員の授業参観 (23 年に 1 件、事前予告有) の約 10 倍を受けた。これは 2011 年度以降
毎年ほぼ同様。

担当講義は、例年他学科から聴講生が参加する。半導体物理学 (大学院) は工学部か
ら 2 名、電磁気学 II は地球惑星科学科から数名、原子分子の量子力学は、単位不要で
聴講のみで工学部から 1 名で、全員最後まで聴講。

————— 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、公式の組織上は独立互いに独立している。

(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。)

———— 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。

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

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

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

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

これに関し、渡部は、強誘電体のバンドギャップが有限であることを考慮すると、巨大な反電場の下では、強誘電体は自ら、表面に電子層・ホール層を形成することを理論的に示し、これにより、従来考えられ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 143 回 (ISI 108 回) 等

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 189 回 (ISI 130 回)

Y. Watanabe, 米国特許, U.S. Patent No. 5418389 (1995)

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 110 回 (ISI 86 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 161 回 (ISI 130 回)

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 57,R5563(1999) 被引用 94 回 (ISI 73 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 637 回 (ISI 421 回)

MRS Bulletin 26 (7) 489 (2001) に解説

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

Y.Watanabe,Ferroelectrics349,190-209(2007)(自己論文の解説) 被引用 43 回 (ISI 34 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、移転後は、渡部の実験室が2スパンの部屋一室(元の広さの1/3)になった。装置を狭い新部屋に入れるため、部屋を3次元的に効率よく使う配置を考案した。これにより、多くの装置の性能または効率を従来より高めることができた。

昨年度(H27年度)の移転後、動作が回復しない装置の回復を図り、全て終了したのはH291月になった。その間、使える装置で順次、科研費の研究を遂行した。この残った復旧作業がなかなか進まないため、設定と立会いに多くの時間を費やした

このため、PCを用いる研究(第一原理計算)を、進展させることが主にし、一部可能な実験を学内と学外で行った。

(1) 強誘電体酸化物の相転移での伝導異常の解明:

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

(2) 強誘電体酸化物の表面電子層の確定:

BaTiO₃単結晶の表面伝導: 酸化物強誘電体は、反電場の影響は、極薄化すると甚大で、応用上も重要な問題である。我々は、このような巨大な電界があると、強誘電体の

最表面は単純な絶縁体と見なせないと提案し、初期検証として高真空中で BaTiO₃ の表面伝導を測定し、支持する結果を得ている。

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

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

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

(3) 超高真空 AFM による表面研究：

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

第一原理計算は、LAPW 法 (Linear Augmented Plane Wave 法) と擬ポテンシャル法 (PAW を含む) で行ってきた。これまでは、計算機の処理速度の制限のため、典型的物質のバルク (無限に大きなもの) での計算のみであった。

今年度は、PC 環境を整備し、並列計算の整備や CPU のさらなる高速化と GPU を用いた超並列計算を可能にした。

これにより、PAW 法を用いて様々な条件で計算を行った。

特に、超高真空 AFM による表面の実験は、BaTiO₃ で行っているが、それをモデル化した第一原理計算を行い、実験結果と対比できるレベルになってきた。

(4) 表面によらないバルク伝導のみによる整流現象の発見と理論：

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を検討した。

また、本研究に関して 1 件の特許を登録した。

(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

講演

《 海外での講演 》

国際会議

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

渡部 行男 代表 (共同研究者無し), 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

挑戦的萌芽研究 課題番号 26600087, 平成 26 年度～平成 29 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

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

国立マレーシア大学外部評価委員

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) : 設定と補助

九州大学世界に羽ばたく未来創成科学者育成プロジェクト (FC-S P) 「知的探求型プログラム (ESS P)」 (JST の委託事業) 委員

教員免許更新のための講義と試験 (物理部門責任者兼講義担当)

渡部、加来、金属化合物を含むヘテロ接合を有する構造体 特許登録

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

石間 美香 技術職員

《 大学院 博士課程 》

山野井 一人 野村 竜也 Nagarjuna Asam

《 大学院 修士課程 》

坂本 美智子 植松 銀河 横谷 有紀 岡部 京太

小川 俊幸 日高 洋平 中野 陽介 岡出 康太郎

石瀧 真之

《 学部 卒業研究生 》

西山 幸太

担当授業

物理実験学 (木村崇)、基幹物理学 I A (木村崇)、基幹物理学 IB (木村崇)、物理学総合実験 (山田和正)、物理学基礎実験 (大西紘平)、自然科学総合実験 (大西紘平)

研究・教育目標と成果

横型スピバルブ素子を用いたスピン流の研究 (小川俊幸・植松銀河・野村竜也・西山幸太・木村崇)

スピン流のもつ諸特性 (生成・伝導・吸収) について調査した。スピン流生成特性においては、CoFe 系合金を用いた場合、熱励起起因のスピン生成量の材料組成依存性が、スレーター・ポーリング曲線に従うことを発見した。スピン流伝導特性においては、系が曲がりを持つ場合、スピン緩和機構が、曲がりの影響を受けることを発見した。スピン流吸収特性においては、スピン吸収体に温度勾配が存在する場合、スピン吸収効率が增大することを発見した。さらに、横型スピバルブ素子の、スピンチャンネル層を CoFeAl/Cu の 2 層膜構造にすることで、従来素子構造よりも、明瞭で大きなスピン吸収効率の変調技術を確立した。これらの成果の一つとして、スピン流を利用した磁

Nb層の一部をミリングを行って、ギャップを作成したものを利用した。Nb/Cu/Ni-Feの方がNb/Cuよりもギャップ部の転移温度が低く、また磁場を細線に垂直に印加するとさらに低くなることが観測された。これはクーパー対の漏れ磁場による変調を示唆した。Nb/Ni-Feの細線構造において、磁壁を利用することでクーパー対の変調を試みた。Ni-Fe細線に切れ込みをいれ、そこにNb細線を2本配置した構造を用いた。Nb細線間のNi-Fe部の抵抗が転移温度以下で磁壁が導入されている方がされていない方よりも低かった結果が得られた。磁壁周辺の非一様な方向の磁化によってクーパー対が変調された可能性が示された。

発表論文

《原著論文》

S. Hu, X. Cui, T. Nomura, T. Min and T. Kimura:

Nonreciprocity of electrically excited thermal spin signals in CoFeAl-Cu-Py lateral spin valves,

Phys. Rev. B (Rapid Comm.) **95**, 100403 (2017).

T. Nomura, K. Ohnishi, and T. Kimura:

Geometrical dependence of spin current absorption into a ferromagnetic nanodot.

J. Appl. Phys. **120**, 142121 (2016).

T. Nomura, K. Ohnishi, and T. Kimura:

Large spin current injection in nano-pillar-based lateral spin valve.

AIP Conf. Proc. **1763**, 020011 (2016).

S. Hu, T. Nomura, G. Uematsu, N. Asam, and T. Kimura:

First- and second-harmonic detection of spin accumulation in a multiterminal lateral spin valve under high-bias ac current.

Phys. Rev. B **94**, 014416 (2016).

講演

《 海外での講演 》

. Ohnishi, Y. Ono, M. Ishitaki, and T. Kimura:

Phase modulation of supercurrent in the multi-layer-based lateral Josephson junction.
9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena
in Solids (PASPS9), Kobe, JAPAN (October 2016).

T. Kimura:

Efficient Thermal Spin Injection and Its Application.

International Union of Materials Research Societies-International Conference on Elec-
tronic Materials (IUMRS-ICEM) 2016, Suntec, SINGAPORE (July 2016).

K. Yamanoi, K. Okade, and T. Kimura:

Correlation between FMR heating and damping constant in amorphous magnetic thin
films.

International Union of Materials Research Societies-International Conference on Elec-
tronic Materials (IUMRS-ICEM) 2016, Suntec, SINGAPORE (July 2016).

N. Asam, S. Hu, and T. Kimura:

Field-like spin torque in CoFeAl/Cu/NiFe trilayers under ferromagnetic resonance.

9th International Symposium on Metallic Multilayers, Uppsala, SWEDEN (June 2016).

K. Yamanoi, Y. Nakano, and T. Kimura:

Contribution of thermal spin injection in dynamical spin injection in FM/NM bilayer
system.

9th International Symposium on Metallic Multilayers, Uppsala, SWEDEN (June 2016).

T. Nomura, S. Hu, G. Uematsu, and T. Kimura:

Indirect detection of magnetization direction using thermal spin injection.

9th International Symposium on Metallic Multilayers, Uppsala, SWEDEN (June 2016).

Y. Nakano, K. Okabe, M. Kawakita, K. Yamanoi, and T. Kimura:

”Modulation of exchange anisotropy due to pure spin current injection into antiferro-
magnet.

9th International Symposium on Metallic Multilayers, Uppsala, SWEDEN (June 2016).

M. Ishitaki, K. Ohnishi, and T. Kimura:

”Superconducting properties in ferromagnet/superconductor hybrid nano-structures.
9th International Symposium on Metallic Multilayers, Uppsala, SWEDEN (June 2016)

《 国内での講演 》

強磁性薄膜における磁性加熱効果を用いたスピン波の検出

山野井一人, 木村崇:

日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

ナノピラー型面内スピンバルブ素子におけるスピン伝導と熱伝導

野村竜也, 植松銀河, 木村崇:

日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

横型スピンバルブ素子中のスピン拡散における熱流の影響

有木大晟, 野村竜也, 木村崇:

日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

磁性金属酸化物へのスピン注入による抵抗スイッチング現象と交換磁気異方性の変化

中野陽介, 岡部京太, 山野井一人, 木村崇:

日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

スピン注入による Nb/Cu/Nb ジョセフソン接合の超伝導特性制御

石瀧真之, 大西紘平, 木村崇:

日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

強磁性共鳴による熱励起スピン注入の高効率化

山野井一人, 横谷有紀, 木村崇:

日本磁気学会 第 40 回学術講演会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

CoFeAl 薄膜の熱伝導特性と高効率熱スピン注入

野村竜也, 有木大晟, 植松銀河, 木村崇:

日本磁気学会 第 40 回学術講演会, 金沢大学 (2016 年 9 月).

Synchronized ferromagnetic resonance in NiFe/NiO/CoFeB trilayer system.

木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Modulation of Josephson current by ferromagnetic layer in Nb/Cu/NiFe multi-layer structure.

大西紘平, 小野雄馬, 坂本美智子, 石瀧真之, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Effective dynamical spin injection induced by FMR heating in amorphous magnetic thin film.

山野井一人, 冢形諭, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Sensitive detection of dynamical motion of magnetic vortices in magnetically coupled systems.

日高洋平, 山野井一人, 横谷有紀, 野村竜也, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Indirect detection of magnetization direction using thermal spin injection.

野村竜也, 胡少杰, 植松銀河, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Superconducting properties in ferromagnet/superconductor hybrid nano-structures.

石瀧真之, 小野雄馬, 大西紘平, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Modulation of exchange anisotropy due to pure spin current injection into antiferromagnet.

中野陽介, 岡部京太, 川北直史, 山野井一人, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Hanle effect in a curved nonmagnetic wire.

有木大晟, 高以來優, 野村竜也, 大西紘平, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月).

Field-like spin torque in CoFeAl/Cu/NiFe trilayers under ferromagnetic resonance.

Nagarjuna Asam, 胡少杰, 木村崇:

ナノスピン変換科学 A01 班 班内研究会, 九大 (2016 年 4 月)

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤 S

純スピン流注入による磁気相転移の選択的制御と革新的ナノスピンドバイスへの応用

研究代表者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究

巨大純スピン流を用いた超高性能多端子スピントルク発振器

研究代表者：木村 崇

修士論文

岡部京太：(指導教員、木村崇)：交換結合 NiO/CoFeB 薄膜における磁気輸送特性の電場変調に関する研究

小川俊幸：(指導教員、木村崇)：強磁性/非磁性二層膜における特異なスピン流伝導特性に関する研究

植松銀河：(指導教員、木村崇)：強磁性 CoFe 系合金薄膜におけるスピン流の熱生成と伝搬に関する研究

坂本美智子：(指導教員、木村崇・大西紘平)：スピン注入による Cu/Nb 二層膜の超伝導特性変調に関する研究

横谷有紀：(指導教員、木村崇)：高強度不均一磁場を用いた非線形スピンドイナミクスに関する研究

博士論文

山野井 一人：(指導教員、木村崇)：Study on interplay between heat and spin dynamics in ferromagnetic metal thin films

光物性

研究室構成員

佐藤 琢哉 准教授

《 博士研究員 》

Pritam Khan

《 大学院 修士課程 》

中垣内 啓太 姫野 滉盛 土田 孝三

《 学部 卒業研究生 》

金丸 将孝 松本 慧大

担当授業

物理学総合演習 (佐藤琢哉)、基礎物理学実験 (佐藤琢哉)、物理学入門 II(佐藤琢哉)、物理学ゼミナール (佐藤琢哉)

研究・教育目標と成果

フェムト秒パルスを用いたスピン波の生成と時間分解イメージング (姫野滉盛、松本慧大、佐藤琢哉)

スピン波は磁気秩序を持つ物質中を伝播する波であり、電子の電荷が移動しないためにジュール熱が生じないという特徴を持つ。そのため、スピン波は消費電力が少ない情報処理技術に応用されることが期待されている。本研究では、光パルスで非熱的に生成されたスピン波の2次元波形を時間分解して測定するイメージング手法を開発し、実際にスピン波の時間分解イメージングを行うことを目的とした。円偏光フェムト秒光パルスを希土類鉄ガーネット試料に照射することで逆ファラデー効果によってスピン波を生成し、その伝播をイメージングすることに成功した。また、交換共鳴モードを観測することができた。

光誘起スピン波透過現象の数値シミュレーション (中垣内啓太、姫野滉盛、松本慧大、佐藤琢哉)

光パルスによって生成されるスピン波は、その波長が光のスポット径に依存し、磁気双極子相互作用が支配的な静磁波である。本研究では、光によって生成した静磁波

が空間ギャップを透過して伝播する様子を Green 関数を用いた数値計算、およびマイクロマグネティックシミュレーションによって求めた。その結果は、実験的に観測されたスピン波透過の波形をよく再現することがわかった。

フェムト秒光パルスを用いたフェリ磁性体における THz 振動の観測 (Pritam Khan、金丸将孝、佐藤琢哉)

フェリ磁性体は複数の副格子磁化を持ち、GHz 帯の磁気共鳴のほかに THz 帯の交換共鳴モードをもつことが理論的に示唆されている。本研究では、高時間分解能をもつポンプ・プローブ測定系を構築し、希土類鉄ガーネット試料における THz 帯の振動モードを観測した。今後はモードの同定を行う予定である。

マグノン・ラマン散乱測定システムの構築 (土田孝三、佐藤琢哉)

ラマン散乱測定と時間分解ポンプ・プローブ測定はそれぞれ周波数領域・時間領域における測定であり、相補的な関係となっている。マグノンの周波数は通常 GHz~THz であり、フォノンと比べると数桁低いため、マグノン・ラマン散乱測定システムの構築は容易ではない。本研究では、マグノン・ラマン散乱測定システムの構築をめざし、構成要素の自動制御を行うことを目的とした。今後は構成要素を実際にくみ上げていく予定である。

発表論文

《原著論文》

All-optical observation and reconstruction of spin wave dispersion:

Y. Hashimoto, S. Daimon, R. Iguchi, Y. Oikawa, K. Shen, K. Sato, D. Bossini, Y. Tabuchi, T. Satoh, B. Hillebrands, G. E. W. Bauer, T. H. Johansen, A. Kirilyuk, Th. Rasing, and E. Saitoh,

Nature Communications (accepted)

Ultrafast optical excitation of coherent magnons in antiferromagnetic NiO:

C. Tzschaschel, K. Otani, R. Iida, T. Shimura, H. Ueda, S. Günther, M. Fiebig, and T. Satoh,

Phys. Rev. B (accepted)

講演

《 海外での講演 》

Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited):

T. Satoh,

The Sir Martin Wood Prize Lecture, May 30, 2016 (Max-Planck-Institute for solid state research, Germany)

Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited):

T. Satoh,

The Sir Martin Wood Prize Lecture, Jun. 1, 2016 (University of Oxford, UK)

Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited):

T. Satoh,

The Sir Martin Wood Prize Lecture, Jun. 2, 2016 (University of Exeter, UK)

Generation and control of magnetic excitations by polarized light in antiferromagnets and ferrimagnets (invited):

T. Satoh,

The Sir Martin Wood Prize Lecture, Jun. 3, 2016 (University of York, UK)

Ultrafast excitation of coherent magnons by circularly and linearly polarized light pulses in antiferromagnetic NiO:

C. Tzschaschel, K. Otani, R. Iida, T. Shimura, H. Ueda, S. Günther, M. Fiebig, and T. Satoh,

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG), MA 23.3, Mar. 19–24, 2017 (Dresden, Germany)

《 国内での講演 》

Writing and reading of an optical polarization state in hexagonal YMnO₃ (invited):

T. Satoh

13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF)-International Workshop on Relaxer Ferroelectrics (IWRf), Invite18, Jun. 19–23, 2016 (Matsue, Japan)

フェムト秒光パルスによるスピン波の初期位相制御:

吉峯功, 田中嘉人, 志村努, 佐藤琢哉

第41回光学シンポジウム, 19, June 23–24, 2016 (東京大学生産技術研究所)

光で誘起したスピン波トンネル効果の時間分解イメージング (invited):

佐藤琢哉

電気学会 A 部門大会, 5-B-a2-1, Sep. 5–6, 2016 (九州工業大学戸畑キャンパス)

Time-resolved imaging of spin wave transmission through an air gap (invited):

T. Satoh, I. Yoshimine, T. Shimura

第40回日本磁気学会学術講演会, 6pC-8, Symposium "Advance and development of photo magnonics", Sep. 5–8, 2016 (金沢大学角間キャンパス)

スピン波伝播の時間分解磁気光学イメージング:

姫野滉盛, 松本慧大, 吉峯功, 佐藤琢哉

日本物理学会「2016年秋季大会」, 15pPSA-64, Sep. 13–16, 2016 (金沢大学角間キャンパス)

逆ファラデー効果による超高速磁化制御 (invited):

佐藤琢哉

CMRC 研究会「量子ビームを用いた多自由度強相関物質における動的交差相関物性の解明」と PF 研究会「共鳴軟 X 線散乱を用いた構造物性研究の進展」の合同ワークショップ, Sep. 20–21, 2016 (KEK つくばキャンパス)

Opto-Magnonics: Spin-Wave Manipulation by Light Pulses (invited):

T. Satoh

The 222nd Special CMSM seminar, Sep. 21, 2016 (NIMS)

Time-resolved imaging of spin wave transmission:

T. Satoh

International Workshop on Nano Spin Conversion Science (NSCS) & Quantum Spin

Dynamics QSD, N-25, Oct. 12–15, 2016 (The University of Tokyo, Japan)

光誘起後進体積静磁波，交換共鳴モードの時間分解イメージング:

松本慧大, 姫野滉盛, 吉峯功, 佐藤琢哉

電気情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, Oct. 20–21, 2016 (九州大学西新プラザ)

Opto-magnonics: Spin-wave generation and detection by light (invited):

T. Satoh

International workshop on novel photo induced phenomena and applications, Nov. 11–12, 2016 (Nihon University, Japan)

Spin wave propagation in rare-earth iron garnet:

K. Himeno, K. Matsumoto, T. Satoh

International workshop on novel photo induced phenomena and applications, P-2, Nov. 11–12, 2016 (Nihon University, Japan)

Magnon Raman spectroscopy in antiferromagnetic CoO:

K. Tsuchida, Y. Fujii, A. Koreeda, T. Satoh

International workshop on novel photo induced phenomena and applications, P-3, Nov. 11–12, 2016 (Nihon University, Japan)

Time- and space-resolved spin wave transmission through an air gap (invited):

T. Satoh

4th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices", Nov. 19–20, 2016 (Tohoku University, Japan)

反強磁性体 CoO のマグノン・ラマン分光測定:

土田孝三, 佐藤琢哉, 藤井康裕, 是枝聡肇

第122回日本物理学会九州支部例会, B-9, Dec. 10, 2016 (福岡大学)

希土類鉄ガーネットにおけるスピン波伝播:

姫野滉盛, 松本慧大, 佐藤琢哉

第122回日本物理学会九州支部例会, B-10, Dec. 10, 2016 (福岡大学)

Optical excitation of coupled spin-orbit dynamics in antiferromagnetic CoO (invited):
T. Satoh

Korea-Japan Spin-Orbit Workshop, Dec. 15–16, 2016 (Fukuoka Recent Hotel)

Detection of exchange resonance mode in rare-earth iron garnet:

P. Khan, K. Himeno, K. Matsumoto, M. Kanamaru and T. Satoh

International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, P-62, Dec. 16–17, 2016
(Fukuoka Recent Hotel)

Magnon Raman spectroscopy in antiferromagnetic CoO:

K. Tsuchida, Y. Fujii, A. Koreeda and T. Satoh

International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, P-63, Dec. 16–17, 2016
(Fukuoka Recent Hotel)

逆ファラデー効果を用いたマグノン生成と伝播制御 (invited):

佐藤琢哉

ATIスピントロニクス研究会「多様な光学的スピン変換現象」, Feb. 17, 2017 (TKP
ガーデンシティお茶の水)

時間分解スピン波イメージングとトンネル現象 (invited):

佐藤琢哉

顕微ナノ・表面科学合同シンポジウム, Mar. 2–3, 2017 (東京理科大学葛飾キャンパス)

反強磁性体 CoO のマグノン・顕微ラマン分光測定:

土田孝三, 藤井康裕, 是枝聡肇, 佐藤琢哉

日本物理学会「第72回年次大会」, 19pK-PS-18, Mar. 17–20, 2017 (大阪大学豊中キャンパス)

外部資金

《文部省科学研究費補助金》

科学研究費補助金、若手研究(A)

逆磁気光学効果による磁化のベクトル制御と磁気相転移の検証

研究代表者：佐藤琢哉

科学研究費補助金、新学術領域研究(研究領域提案型)(ナノスピン変換科学)
光学的スピン変換
研究分担者：佐藤琢哉

科学研究費補助金、特別研究員奨励費
磁気-プラズモンナノ構造における光-物質相互作用
受入研究者：佐藤琢哉

《文部省科学研究費補助金以外の外部資金》
三菱財団研究助成
光パルスによって生成したスピン波の高感度時間分解イメージング
研究代表者：佐藤琢哉

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

他大学での研究と教育

佐藤琢哉：集中講義@横浜国立大学
佐藤琢哉：研究員@東京大学生産技術研究所

学部4年生卒業研究

金丸将孝：(指導教員、佐藤琢哉)：フェリ磁性面直磁化膜における THz 振動の時間分解測定
松本慧大：(指導教員、佐藤琢哉)：スピン波伝播のマイクロマグネティックシミュレーションと実験的検証

修士論文

中垣内啓太：(指導教員、佐藤琢哉)：エアーギャップを透過するスピン波の数値計算に関する研究
姫野滉盛：(指導教員、佐藤琢哉)：光誘起スピン波の時間分解イメージング技術開発と

測定

学外での学会活動

日本磁気学会 企画委員
電気学会 フォト・マグノンクス技術調査専門委員会委員
MORIS 2018 Program committee

その他の活動と成果

松本慧大：電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会 委員長賞 受賞

姫野滉盛：International workshop on novel photo induced phenomena and applications,
Best Poster Award 受賞

特許：波動の誘起・伝播制御システム及び波動の誘起・伝播制御方法

佐藤琢哉, 黒田和男, 志村努, 照井勇輝

特願 2012-203693, 特開 2014-6022, 特許第 5979757 号 (出願日: 2012年9月14日, 公報発行日: 2014年4月3日, 登録日: 2016年8月5日).

低次元電子物性

研究室構成員

矢山英樹 教授

《 大学院 修士課程 》

西村優吾 内山大嘉

《 訪問研究者 》

Ali Gamal Hafez Ernassel Rabie

担当授業

基幹物理学 IB、物理学概論 A、基幹教育セミナー、課題協学科目

研究・教育目標と成果

(1) 超流動ヘリウムにおける第2音波による電気分極誘起 (西村、矢山)
液体ヘリウムは絶対温度 2.17K 以下で超流動状態に転移する。超流動状態では粘性がゼロになり、第2音波が伝播するなどの興味深い現象が表れる。第2音波は次のような方法で発生される。

まず、超流動ヘリウム中に置いたヒーターに交流の電流を流す。その時、熱源に向かって超流動成分が移動し、逆に熱源から常流動成分が遠ざかるように移動する。ヒーターに流れる電流は交流であるから、このようなカウンターフローが周期的に起こり、熱が波の形で伝播する。結果的にほとんど無限大に近い熱伝導率を持つ物質のようにふるまう。

ヘリウム原子は閉殻構造を持っていて外部から電場をかけない限り分極を発生することはない。第2音波は力学的な原子の運動であり、電気に関係する現象が発生することはないと考えられている。しかし最近、第2音波を発生させると超流動ヘリウム内に分極電荷が発生するという極めて不思議な実験結果が発表された。この結果は極めて特異であるため、その実験結果の真偽が問題となっている。

今回は、この実験結果が正しいかどうかを確かめるため、追試を行った。超流動ヘリウム内に共鳴パイプを設置し、一端にヒーターを、他端に並行平板キャパシタを設置して、第2音波を発生させたときに分極電荷が観測されるかどうかを確かめた。実験結果は、第2音波の共鳴周波数で、電気分極に伴う電圧が観測された。この結果は、

これまでの実験結果を再現するものであるが、まだ検証すべき点があり、これだけで分極電荷が存在すると結論することはできない。

現在、ヒーターと並行平板キャパシタがキャパシティブにカップルしているため、信号の回り込みが偽の信号となって観測されているのではないかと疑って、電氣的シールドをなるべく完全に作る実験を計画している。

発表論文

《その他の論文》

1. 矢山英樹, 核断熱消磁冷却 VI, 九州大学低温センターだより No.11, 2017. p.19.

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

超流動ヘリウム中の第2音波と電気分極:

西村優吾、内山大嘉、矢山英樹

第122回日本物理学会九州支部例会

修士論文

西村優吾：超流動液体ヘリウムにおける第2音波と電気分極

学外での学会活動

応用物理学会九州支部理事

受託研究・民間との共同研究

矢山：「極低温クライオスタットの開発」, (株) 低温技術研究所との共同研究

その他の活動と成果

1. 特許 特願 2016-018446 磁化測定装置 発明者・権利者：矢山英樹

複雑物性基礎

研究室構成員

木村康之 教授

水野大介 准教授 稲垣紫緒 准教授

岩下靖孝 助教

《 博士研究員 》

有賀隆行 (特任准教授) 久保善嗣 (テクニカルスタッフ) Francis van Esterik

(外国人研究員)

《 大学院 博士課程 》

野口朋寛 Heev Ayade Lara Gay Villaruz Mocco 西澤 賢治

《 大学院 修士課程 》

永徳 はるか 田村 優太 藤井 明彦 本田 菜月

諸留 寛大 大石 隼道 荻原 僚 梅田 勝比呂

小池 涼太郎 高田 哲弘 棚町 昂平 吉原 公貴 菅真理子 齊藤圭太

《 学部 卒業研究生 》

池田 豊和 都 武蔵 徳田真之介 安藤祐貴

池永匡宏 永尾渉

担当授業

物理学の進展 (木村康之)、物性物理学 I (木村康之)、振動と波動 (木村康之)、複雑系物理学 (木村康之)、物理学特別講義 C (生物物理学) (水野大介)、身の回りの物理学 (水野大介)、基礎物理実験学・同実験 (水野大介) 物理学総合実験 (岩下靖孝)、物理学総合実験 (稲垣紫緒)、物理学入門 II (稲垣紫緒)

研究・教育目標と成果

《 今年度の目標 》

○モデル自己駆動粒子系や外場駆動粒子系の実現とその挙動の解明を目指す。(1,2)

○新規なレーザートラップ手法の開発や、それによる力測定・粒子操作をコロイド系

に適用し、その物性測定及び非線形挙動の解明を行なうことを目指した。(3, 4)

○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。(5, 6, 7)

○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。(8)

○非平衡現象を解明するための新規なマイクロレオロジー測定システムの開発を目指した。(9)

○粉体のバンド構造や局所構造の解明を目指した。(10, 11)

○細胞骨格やコロイド系の力学応答に非アファインな応答が果たす役割をマイクロレオロジーによる広帯域計測により実証する。(12, 15)

○各種細胞抽出液の力学特性を計測することで、細胞内部環境のガラス的振る舞いを明らかにすることを目指した。(13)

○マイクロレオロジー計測法にフィードバック機構を導入し、細胞やバクテリアの集団運動等の強い非平衡系の揺らぎ応答の同時観測を実現する。(14)

○ actin-myosin gel や遊走バクテリア溶液等の active system 中における非平衡揺らぎが新しい Levy 分布のクラスに属していること、およびその分布形状の解析解を明らかにする。(16, 18, 19)

○ PICO-TREC による opioid 信号伝達複合体の高速検出することで、信号伝達複合体が結合する細胞骨格の力学特性を AFM を用いた実験と数値計算により明らかにする。(17)

○幹細胞や癌幹細胞は、自己複製や分化能を維持するために周囲の細胞や間質が形成するニッチ環境を必要とし、幹細胞から生じた細胞群が周囲の組織を押しつけて増殖・成長する。そこでニッチの力学的環境、殊に、圧縮応力を再現する実験系を構築し、癌や幹細胞の FBRM 計測を行う。また、Ras および YAP/TAZ の発現が薬物誘導される細胞株を用い、腫瘍組織の特異な力学的性質が癌の悪性を誘導する機構の基礎的知見を得る。(20)

《今年度の成果》

(1) 界面活性剤水溶液中での自己駆動油滴の運動解明 (菅、木村)

界面活性剤水溶液中を自己駆動する油滴系を実現し、そのサイズによる運動モードの変化を明らかにした。ことに従来報告されていた直線運動や円運動のほかに、らせん運動や8の字運動を示すことがわかり、その3次元的運動をホログラフィック顕微鏡を用いて行った。

(2) 光駆動回転粒子系での運動解明 (齋藤、田村、木村)

光の波面を成形することでさまざまな複雑な構造を持つ光場を実現し、それを用いて粒子駆動を行い、その運動を解明した。例えば波面がらせん状の光渦は粒子に軌道角運動量を与えることができ、流体中を流体相互作用しながら円軌道上を回転する系で、さまざまな動的パターン形成を観測することに成功した。また、液晶液滴に円偏光を照射することで自転運動を誘起し、その方向と自転速度を制御することに成功した。

(3) ネマチック液晶中のコロイド粒子間相互作用の研究 (田村、岩下、木村)

ネマチ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るとその界面での液晶配向状態に依存して、コロイド間に液晶の弾性を媒介とした相互作用が働くことが知られている。われわれは2本の光ピンセットを用いて2つのコロイド粒子を捕捉し、それらの位置を変化させつつ、トラップ位置の微小な変化をその顕微鏡像から観測することで粒子間相互作用の直接測定を行った。本年度はことに、その粒子間相互作用および形成された結晶構造が電場の印加により変化することなどを研究した。

(4) ホログラフィック光ピンセット・顕微鏡の開発 (永徳、池田、岩下、木村)

光空間変調器を用いて位相ホログラムを作成し、多点の光トラップや光渦を複数作成することに成功している。それらに加え、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、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。

(5) ヤヌス粒子の作成とその凝集構造の研究 (野口、岩下、木村)

シリカ粒子へ金を蒸着し、それをチオール化することにより、親水面・疎水面を持った両親媒性コロイド粒子(ヤヌス粒子)を作成した。このヤヌス粒子-水-油3成分系において、その界面活性及び凝集挙動のセッケン分子系との相違を実験により解明した。また異なる表年処理により表面物性を変え、金属表面においても同様の界面被覆現象が生じることを解明した。

(6) ヤヌス粒子凝集体の物性の研究 (吉原、岩下、木村)

粒径サブ μm の小さなシリカ粒子を用いて金面を持つヤヌス粒子を作成した。この粒子が金面を上に向けて並んだ単層膜において、パッチ間のギャップによるプラズモン応答が生じることを確かめた。この粒子をクサビ形セルに封入し、単層膜の厚さにおいて μm 程度の粒径の粒子と同様の方向秩序が現れることを明らかにした。

(7) 異形状粒子の作成とそのピッカリングエマルジョンの研究 (小池、岩下、木村)

光反応性の樹脂(SU-8)を用いて任意形状を得るソフトリソグラフィーを用い、多

様な幾何学形状の微粒子を作成した。正三角形粒子に両親媒性を付与し、水-油との3成分系におけるエマルションを形成したところ、正三角形が密充填された被覆構造を実現することができた。

(8) 液晶電気対流系の3次元観察 (高田、岩下、木村)

負の誘電率異方性を持つ液晶に電場を印加する事により生じる電気対流に対しコロイド粒子を分散させ、非熱的な駆動力による運動について調べた。その結果、ネマチック液晶の対流構造、コレステリック液晶の対流構造をそれぞれ反映した特異な拡散、輸送現象を見出した。

(9) アクティブマイクロレオロジー測定システムの構築 (藤井、岩下、木村)

媒質に分散したコロイド粒子に交流的な外力を与えてその応答を測定するアクティブマイクロレオロジー測定システムの開発を進めている。ことに、外力として交流電場を印加し、荷電コロイド粒子を励振する電気泳動マイクロレオロジー測定システムを構築し、これを用いたソフトマター系の局所力学物性測定を進めている。

(10) 回転円筒容器における粉体の相分離現象の研究 (大石、都、久保、稲垣、木村)

水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体を入れ、回転させたときに観察されるサイズ分離現象について、実験を行った。従来、粉体のサイズ分離現象は、動的安息角に有意に差のある粒子の組み合わせの時によく観察されると思われていたが、ポピーシードとバジルシード、ガーネットサンドと珪砂の組み合わせで動的安息角について調べたところ、動的安息角はサイズ分離現象の有無を予測する適切なパラメータでないことが分かった。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、今後さらに実験を進める。

(11) ランダム充填した粉粒体の動径分布関数に関する研究 (稲垣、木村)

従来、結晶構造を持たない媒質の微視的構造の解析には、動径分布関数が用いられてきていた。しかし、粒子サイズが単一でない場合には、粒子の中心間距離 l_{ij} に粒子半径 $r_i + r_j$ の情報が含まれてしまうため、粒子直径の確率分布の影響で動径分布関数のピークはなだらかになり、微視的構造に関する情報を取り出すのが困難になってしまう。動径分布関数の構成要素である、粒子間距離 $s_{ij} = l_{ij} - (r_i + r_j)$ (inter-particle distance) について、離散要素法を用いた数値計算によって研究を行った。また、球状粒子をトレイに乗せ鉛直方向に加振し、二次元的な粒子配置を実験的に実現することで、実験による粒子間距離の測定を行い、数値計算の結果と比較して検証した。粒子間距離の統計的性質について、今後さらに研究を進める。

(12) **生きた細胞骨格の非平衡ゆらぎ** (Heev Ayade、水野)

アクチン、ミオシンゲルにATPを添加した系に分散させたコロイド粒子の運動を van Hove 相関関数や非ガウスパラメータを用いて評価することで、その非平衡度の実験的な評価に成功した。

(13) **細胞内部環境のガラス的挙動** (西澤、藤原、池永、柳澤、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。さらに現実に生きている細胞の内部環境は一定の流動性と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。

(14) **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** (池永、梅田、本田、西澤、M. Bremerich, H. Ayade、水野)

光トラップしたプローブ粒子の変位を4分割フォトダイオードで精密計測し、さらに計測信号をもとにピエゾ駆動ステージ、およびAODを高速フィードバック制御しながら active-passive マイクロレオロジー計測を行った。従来強すぎる非平衡揺らぎのためにプローブ粒子を安定捕捉できない試料(細胞内部や遊走バクテリア溶液)でマイクロレオロジー計測を行い、揺動散逸定理の破れや非平衡揺らぎの分布形状の解析を行った。

(15) **細胞骨格の非線形かつ非等方かつ非アファインな力学応答** (本田菜月、荻原、D. Head, 池辺詠美、中益朗子、P. Zhang, 木下英、L.G. Villaruz, 安藤祥司、水野)

フィードバックマイクロレオロジーにより、局所的・巨視的な外力印加下における細胞骨格ゲルの非線形応答を観測と数値シミュレーションによる結果の解析を進めている。

(16) **細胞骨格の非平衡揺らぎは新しいクラスのLevy分布に属する** (Heev Ayade, Irwin Zaid, 水野)

非平衡な細胞骨格(アクチン/ミオシンゲル)中におけるマイクロレオロジー計測により観測される非平衡揺らぎが、新しいクラスのLevy分布に属していることを明らかにした。また、その分布形状を、力生成の動力学も考慮にいれた時間発展する解析解として求めた。これにより細胞骨格内部における力生成を揺らぎから推定することが可能になった。

(17) オピオイド信号伝達複合体の構造形成とダイナミクスにフィラミンAが果たす役割 (Lara Gay Villaruz, 水野)

オピオイド情報伝達複合体の組織化に対してFLNAが果たす役割を生化学的および物理的(ナノメカニクス,1分子計測)手法を用いて直接計測することを目標とした。FLNAが2次元膜内の信号伝達複合体の組織化と細胞(骨格)の3次元構造とを結びつける効果を解明するために、細胞膜と直下の細胞骨格の力学特性を両方調べ、MOP-Rの機能との相関を求めることにより、オピオイド系鎮痛剤に対する耐性その他の副作用の発現に対してFLNAが果たしている役割とその機構が明らかになる。

(18) 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 (安藤、栗原、諸留、奈良、有留、Heev Ayade, Irwin Zaid, 水野大介)

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。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を拡張することが今後の課題である。

(19) 粘弾性体中を遊走するスピロプラズマによる増強レプテーションの非平衡機構 (奈良、棚町、荻原、水野大介)

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。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。

(20) 細胞競合による癌悪性化と生体防御のメカノバイオロジー (梅田、永尾、水野大介)

生体には、日々生じる変異細胞が周辺の正常細胞との競合に敗れて駆除される機構(細胞競合)が存在する。この機構の力学的側面を調べるため、癌関連因子(Ras)を薬物依存的に発現する細胞株を用いて、正常細胞と変異細胞の競合状態を作り、癌化の前後で競合細胞の力学的性質と活きの良さがどのように変化するか調べた。周辺の正常細胞と競合している変異細胞は、“活きが良く”細胞質も流動化することが分かった。

《 来年度の目標 》

研究（1 - 20）のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《 原著論文 》

Dependence of the Internal Structure on Water/Particle Volume Ratio in an Amphiphilic Janus Particle-Water-Oil Ternary System From Micelle-like Clusters to Emulsions of Spherical Droplets:

Tomohiro G. Noguchi, Yasutaka Iwashita, and Yasuyuki Kimura,
Soft Matter, **33** (2017) 1030-1036

Two-dimensional assemblies of nematic colloids in homeotropic cells and their response to electric fields:

Yuta Tamura and Yasuyuki Kimura,
Soft Matter, **12** (2016) 6817-6826.

Spatial confinement governs orientational order in patchy particles:

Yasutaka Iwashita and Yasuyuki Kimura,
Scientific reports, **6** (2016) 27599/1-8.

Analytical Limit Distributions from Random Power-Law Interactions:

Irwin Zaid and Daisuke Mizuno,
Phys. Rev. Lett., **117** (2016) 030602.

Non-Gaussian limit fluctuations in active swimmer suspensions:

Takashi Kurihara, Msato Aridome, Heev Ayade, Irwin Zaid, and Daisuke Mizuno,
Phys. Rev. E, **95** (2016) 030601(R).

Feedback-tracking microrheology in living cells

Kenji Nishizawa, Marcel Bremerich, Heev Ayade, Christoph F. Schmidt, Takayuki Ariga and Daisuke Mizuno:
Science Advances, In press.

《 その他の論文 》

著書

稲垣紫緒, 久保善嗣, 材料表面の親水・親油設計と制御 (第7章8節), 株式会社テクノシステム, 2016年7月27日.

講演

《 海外での講演 》

Y. Iwashita, and Y. Kimura, “Spatial confinement controls orientational order of one-patch particles”, 4th International Soft Matter Conference, Grenoble, France, September 12-16, 2016.

Y. Iwashita, and Y. Kimura, “Density dependence of orientational order in one-patch particles”, 30th Conference of the European Colloid and Interface Society, Rome, Italy, September 4-9, 2016.

Y. Iwashita, and Y. Kimura, “Orientational order of one-patch particles in a quasi-two-dimensional system”, 30th Conference of the European Colloid and Interface Society, Rome, Italy, September 4-9, 2016.

D. Mizuno FDT violation and Non-Gaussian Glassy Dynamics in Active Systems 30 Nov - 2 Dec, 2016 (12/1 口頭) POSCO International Center, Korea 招待講演

K. Nishizawa, and D. Mizuno, ”Molecular crowding effects in vitro and living cytoplasm”, 4th International Soft Matter Conference, Grenoble, France, September 12-16, 2016.

《 国内での講演 》

木村康之 (S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura and Y. Kimura), Collective motion of hydrodynamically coupled micro-objects driven by optical force, The 3rd Optical Manipulation Conference (OMC '16) 2016/5/20, パシフィコ横浜 (招待講演)

木村康之、電気泳動光散乱の基礎 第28回散乱研究会 2016/11/25, HULIC HALL(東京) (招待講演)

高田哲弘、高橋健太郎、勝田、木村康之 Three-dimensional observation of electroconvective pattern in cholesteric liquid crystals 新学術領域第3回領域研究会 2016/6/18 九州大学伊都キャンパス ポスター

大石隼道、稲垣紫緒、木村康之 On the condition for the formation of segregating bands in a rotating drum 新学術領域第3回領域研究会 2016/6/18 九州大学伊都キャンパス ポスター

大久保、柴田、木村康之 光駆動コロイド系の非平衡構造形成 西日本非線形研究会 2016
2016/6/25 九州大学伊都キャンパス ショートトーク

高田哲弘、高橋健太郎、木村康之 コレステリック液晶電気対流パターンの3次元観察
西日本非線形研究会 2016 2016/6/25 九州大学伊都キャンパス ショートトーク

大石隼道、稲垣紫緒 回転円筒容器による粉粒体の分離現象と動的安息角の関係 西日本
非線形研究会 2016 2016/6/25 九州大学伊都キャンパス ショートトーク

Y. Tamura and Y. Kimura "Fabrication of anisotropic colloidal assemblies in nematic
liquid crystal" 第8回日伊液晶会議 2016/7/6(5-7) 京都市国際交流会館 ポスター

T. Takada, K. Katsuda and Y. Kimura Three-dimensional observation of electrocon-
vective pattern in cholesteric liquid crystal 第8回日伊液晶会議 2016/7/6(5-7) 京都市
国際交流会館 ポスター

高田哲弘、高橋健太郎、木村康之 コレステリック液晶電気対流パターンの3次元観察
日本物理学会 2016 年秋季大会 2016/9/13-16 金沢大学角間キャンパス 口頭

大石隼道、稲垣紫緒 回転ドラムによる粉粒体の分離現象と動的安息角の関係 日本物理
学会 2016 年秋季大会 2016/9/13-16 金沢大学角間キャンパス ポスター

木村康之、大久保、柴田 光駆動コロイド系の非平衡構造形成 第67回コロイドおよび
界面化学討論会 2016/9/22-24 北海道教育大学旭川校 口頭

田村優太、木村康之 ネマチック液晶中での異方的構造体作製とその電場応答 第67回
コロイドおよび界面化学討論会 2016/9/22-24 北海道教育大学旭川校 口頭

田村優太、木村康之 ネマチックコロイドを用いた異方的構造体作製 ソフトマター研究
会 2016/10/24-26 北海道大学 ポスター

高田哲弘、木村康之 コレステリック液晶電気対流パターンの3次元観察 ソフトマター
研究会 2016/10/24-26 北海道大学 ポスター

菅真梨子、田村優太、木村康之 液晶液滴のマランゴニ対流による自発的な運動とサイ
ズ依存性 ソフトマター研究会 2016/10/24-26 北海道大学 ポスター

齋藤圭太、木村康之 円環上で光駆動されたコロイド系のリズム運動 ソフトマター研究
会 2016/10/24-26 北海道大学 ポスター

田村優太、木村康之 液晶液滴の回転運動 第122回日本物理学会九州支部例会 2016/12/10
福岡大学 口頭

永徳はるか、池田豊和、岩下靖孝、木村康之 コロイド粒子の3次元追跡 第122回日本
物理学会九州支部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

高田哲弘、田村優太、木村康之 液晶の電気対流 第122回日本物理学会九州支部例会
2016/12/10 福岡大学 口頭

菅真梨子、木村康之 界面活性剤溶液中の液晶液滴の運動 第122回日本物理学会九州支
部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

齋藤圭太、木村康之 光駆動コロイド系のリズム運動 第122回日本物理学会九州支部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

池田豊和、永徳はるか、岩下靖孝、木村康之 コロイド粒子系のダイナミクス 第122回日本物理学会九州支部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

菅真梨子、前多裕介、小林、市川正敏、木村康之 Motion of liquid crystal droplets in surfactant solution 2017 アクティブマター研究会 2017/1/20 九州大学 口頭

齋藤圭太、木村康之 Rhythmic motion of colloidal particle driven by optical force 2017 アクティブマター研究会 2017/1/20 九州大学 口頭

菅真梨子、木村康之 自己推進液晶液滴のダイナミクス 日本物理学会 第72回年次大会 2017/3/20 大阪大学 口頭

齋藤圭太、木村康之 光駆動粒子系のリズム運動 日本物理学会 第72回年次大会 2017/3/19 大阪大学 口頭

池田豊和、永徳はるか、岩下靖孝、木村康之 ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド系の3次元追跡 日本物理学会 第72回年次大会 2017/3/18 大阪大学 口頭

野口朋寛、岩下靖孝、木村康之 両親媒性ヤヌス粒子-水-油3成分系で形成される内部構造の組成比依存性 ソフトマター研究会 2016/10/24-26 北海道大学 口頭

岩下 靖孝、木村 康之 「1パッチ粒子方向秩序の密度依存性」 日本物理学会 第72回年次大会、18aC22-9、大阪大学、2017/3/18

小池 涼太郎、岩下 靖孝、木村 康之 「多角形粒子による Pickering emulsion における粒子形状の効果」 日本物理学会 第72回年次大会、18aC35-11、大阪大学、2017/3/18

吉原 公貴、岩下 靖孝、木村 康之 「ヤヌス粒子の自己集合によるプラズモン応答の変化」 日本物理学会 第72回年次大会、18aC22-8、大阪大学、2017/3/18

吉原 公貴、岩下 靖孝、木村 康之 「ヤヌス粒子自己集合体のプラズモン応答」 第122回日本物理学会九州支部例会、E-6、福岡大学、2016/12/10

小池 涼太郎、岩下 靖孝、木村 康之 「多角形粒子を用いた Pickering Emulsion の形成」 第122回日本物理学会九州支部例会、E-7、福岡大学、2016/12/10

岩下 靖孝、木村 康之 「パッチ粒子方向秩序の密度依存性」 第67回コロイドおよび界面化学討論会、3G02、北海道教育大学旭川校、2016/9/24

小池 涼太郎、岩下 靖孝、木村 康之 「形状と表面物性に異方性を持つ樹脂粒子の作成」 第67回コロイドおよび界面化学討論会、P079、北海道教育大学旭川校、2016/9/24

吉原 公貴 「ヤヌス粒子構造体の局所表面プラズモン共鳴」 第6回ソフトマター研究会、PB-08、北海道大学、2016/10/25

Y. Iwashita, and Y. Kimura, “Orientational Order of One-Patch Particles under Spatial Confinement”, 4th International Kyushu Colloid Colloquium, P08, 九州大学西新プラザ, 2016/9/27.

K. Yoshihara, Y. Iwashita, and Y. Kimura, “Local Surface Plasmon Resonance in Janus Particle Array”, 4th International Kyushu Colloid Colloquium, P07, 九州大学西新プラザ, 2016/9/27.

R. Koike, Y. Iwashita, and Y. Kimura, “Anisotropic Resin Particles in Shape and Surface Property”, 4th International Kyushu Colloid Colloquium, P06, 九州大学西新プラザ, 2016/9/27.

稲垣紫緒 The universal property of the radial distribution function of the many particle systems 新学術領域第3回領域研究会 2016/6/18 九州大学伊都キャンパス ポスター
稲垣紫緒、大石隼道、江端宏之、吉川研一 Segregation dynamics in a rotating cylinder depending on a rotational speed Hungary-Japan Workshop on Physics of Rheology and Fracture 2016/12/5 九州大学伊都キャンパス 口頭

稲垣紫緒、徳田真之介 回転円筒容器内での動的安息角に関する3次元系の数値計算 日本物理学会 第72回年次大会 2017/3/20 大阪大学（豊中キャンパス）ポスター

大石隼道、稲垣紫緒、木村 On the condition for the formation of segregating bands in a rotating drum 新学術領域第3回領域研究会 2016/6/18 九州大学伊都キャンパス ポスター

大石隼道、稲垣紫緒 回転ドラムを用いた粉粒体の分離現象 第6回ソフトマター研究会 2016/10/25 北海道大学 ポスター

大石隼道、稲垣紫緒 回転ドラムにおける粉粒体の分離現象の回転速度依存性 第122回日本物理学会九州支部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

大石隼道、稲垣紫緒 回転ドラムにおける粉粒体の回転速度に依存した相分離ダイナミクス 日本物理学会 第72回年次大会 2017/3/17 大阪大学（豊中キャンパス）口頭

徳田真之介、稲垣紫緒 粉粒体の動的安息角に関する数値計算 第122回日本物理学会九州支部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

荻原 僚 Micro-rheology under shear stress 学会等名新学術領域・揺らぎと構造の協奏・第三回領域研究会 6月17日 九州大学伊都キャンパス ポスター

梅田勝比呂 Cell-cycle resolved Microrheology of Intracellular Environments 新学術・揺らぎ第3回領域研究会 2016年6月18日 九州大学伊都キャンパス ポスター

水野大介 非平衡媒質中における非ガウス揺らぎと異常拡散 (active diffusion) 異常拡散現象をめぐる最近の進展(招待) 2016/08/31 2016/9/1 (8/31 口頭) 慶応大学 日吉キャンパス 来往舎シンポジウムスペース 招待講演

水野大介 非熱的に駆動されたソフトマターの非平衡状態としての細胞内部環境 第56回生物物理若手の会 夏の学校(招待) 9月4日 支笏湖ユースホステル(北海道) 招待講演

西澤賢治 細胞内部の混み合いガラス状態と非熱的な力学駆動 第6回ソフトマター研究

会 10月24日 北海道大学 口頭

荻原 僚 細胞骨格のマイクロレオロジー 第64回レオロジー討論会 10月29日 大阪大学 ポスター

梅田勝比呂 Microrheology of Living Cells with Cell-cycle progression 第64回レオロジー討論会 2016年10月28日 大阪大学 ポスター

西澤賢治 Intracellular crowding mechanics driven by athermal force 第54回日本生物物理学会年会 11月25日 つくば国際会議場 ポスター

梅田勝比呂 The dynamics of Intracellular Environments during Cell-cycle progression 第54回生物物理学会 2016年11月25日 つくば国際会議場 ポスター

有賀隆行 Non-equilibrium dissipation of kinesin 第54回生物物理学会 2016年11月26日 つくば国際会議場 ポスター

本田菜月 mechanical properties of cytoskeletons measured with dual-feedback microrheology 第54回生物物理学会 2016年11月25日 つくば国際会議場 ポスター

棚町昂平 Rheology and fluctuations in active bacterial hydrogel International Workshop on "Hydrodynamic Flows in/of Cells" Hydrodynamic Flows of cells 11月24 - 25 Tokyo Metropolitan University, Building 8, Room 303 ポスター

水野大介 Non-Gaussian glassy dynamics in living cells and cytoskeletons International Workshop on "Hydrodynamic Flows in/of Cells" Hydrodynamic Flows of cells(国際) 11月24 - 25 Tokyo Metropolitan University, Building 8, Room 303 口頭

水野大介 非平衡系としての生き物の揺らぎと力学特性 機能物性セミナー (招待) 2016年11月28日 東京大学 物性研究所 招待講演

池永匡宏 細胞内力学の生体高分子混み合い依存性 日本物理学会九州支部例会 12月10日 福岡大学 口頭

永尾 渉 細胞競合のメカニクス 第122回日本物理学会九州支部例会 2016/12/10 福岡大学 口頭

西澤賢治 生細胞内部のマイクロレオロジー・計測 第122回日本物理学会九州支部例会 12月10日 福岡大学 口頭

本田菜月 Mechanical properties of cytoskeletal networks measured by dual-feedback microrheology I P C 2 0 1 6 (第11回国際高分子学会) 12月15日 福岡国際会議場 ポスター

棚町昂平 Rheology and fluctuations in active bacterial hydrogel I P C 2 0 1 6 (第11回国際高分子学会) 12月15日 福岡国際会議場 ポスター

奈良周平 Enhanced reptation in active polymer network I P C 2 0 1 6 (第11回国際高分子学会) 12月15日 福岡国際会議場 ポスター

荻原 僚 Micro-rheology under hydrogel under external mechanical loading I P C

2016 (第11回国際高分子学会) 12月15日 福岡国際会議場 ポスター
梅田勝比呂 細胞周期進行に伴う細胞内部環境のダイナミクス 細胞競合・ダイニング
コード合同若手 WS 2017年1月17日: コスモスクエア国際交流センター (大阪) 口頭
西澤賢治 生細胞と死細胞の粘弾性 力駆動された細胞内部の混み合い状態 細胞競合・
ダイニングコード合同若手 WS 1月18日 コスモスクエア国際交流センター (大阪)
口頭
永尾 渉 細胞競合のメカニクス 細胞競合・ダイニングコード合同若手 WS 2017/01/17-
2017/01/19 コスモスクエア国際交流センター (大阪) ポスター
水野大介 FDT violation and Non-Gaussian Glassy Dynamics in jammed and active
cell interior ジャムドマターの非ガウス揺らぎとレオロジー (国際、招待) 2017年 3
月9日~11日 (3/10 口頭) 京都大学 基礎物理学研究所 招待講演
西澤賢治 細胞競合状態における細胞内部の力学環境変化 第6回細胞競合コロキウム 3
月17日 北海道大学 口頭
池永匡宏 細胞内力学の生体高分子混み合い依存性 日本物理学会第72回年次大会 3月
18日 大阪大学豊中キャンパス 口頭
西澤賢治 非熱的に駆動された細胞内部の混み合い状態 日本物理学会第72回年次大会
3月20日 大阪大学豊中キャンパス 口頭
有賀隆行 キネシンの非平衡エネルギー計測と解析 日本物理学会第72回年次大会 3月
17日 大阪大学豊中キャンパス 口頭
棚町昂平 生体高分子ゲル中を遊走する微生物による非熱的揺らぎ 日本物理学会第72
回年次大会 3月18日 大阪大学豊中キャンパス 口頭

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金 (新学術領域)、計画研究
非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学
研究代表者: 木村康之

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

交流アクティブマイクロレオロジーを用いたソフトマターのメゾダイナミクスの解明
研究代表者: 木村康之

文部省科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究

ネマチックコロイド分子が形成する異方的構造の研究

研究代表者：木村康之

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (B)

フィードバックマイクロレオロジーによる細胞力学の観測

研究代表者：水野大介

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

アクティブなゆらぎ環境下での生体分子モーターキネシンの1分子運動解析

研究代表者：有賀隆行

文部省科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究

多角形粒子の幾何学効果を利用したピッカリングエマルションの形態制御

研究代表者：岩下靖孝

文部省科学研究費補助金、若手研究 B

粉粒体での相分離と対流のクロストーク：散逸粒子系の非平衡物理

研究代表者：稲垣紫緒

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

武田科学研究助成

人工骨細胞ネットワークにおける力学刺激情報伝達過程の解析

研究代表者：水野大介

内藤記念科学振興財団

力学刺激を検出することで自らを作り変える人工骨システムの開発

研究代表者：水野大介

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)

学部4年生卒業研究

池田豊和：(指導教員、木村康之)：ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド粒子系の3次元ダイナミクス

徳田真之介：(指導教員、木村康之)：回転円筒容器内での動的安息角に関する3次元系の数値計算」

都武蔵：(指導教員、木村康之)：粉粒体の動的安息角の系統的測定

安藤祐貴：(指導教員、水野大介)：遊走微生物懸濁液中における非平衡揺らぎ

池永匡宏：(指導教員、水野大介)：細胞内力学の生体高分子混み合い依存性

永尾渉：(指導教員、水野大介)：細胞競合のメカニクス

修士論文

永徳はるか：(指導教員、木村康之)：ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド粒子系の3次元追跡

田村優太：(指導教員、木村康之)：光ピンセットを用いた液晶コロイド系の構造制御と運動制御

藤井明彦：(指導教員、木村康之)：ソフトマター複雑系のレオロジー制御

本田菜月：(指導教員、水野大介)：多重フィードバック μ レオロジーによる局所力学場印可下の非線形・非平衡レオロジー

諸留寛大：(指導教員、水野大介)：微生物が遊走する生体高分子ゲルのレオロジー

外国人留学生の受け入れ

Heev Ayade (水野大介)

Lara Gay Villaruz (水野大介)

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)

日本物理学会代議員 (木村)

日本物理学会九州支部会役員 (水野)

その他の活動と成果

高校生体験入学講師 (3月、岩下)

複雑流体

研究室構成員

鴫田昌之 教授

前多裕介 准教授

《 博士研究員 》

Ziane Izri

《 大学院 修士課程 》

福山達也 上瀧守

《 学部 卒業研究生 》

別府航早 合屋純 川崎結加 野上晋平

担当授業

物理学特別講義 C (前多)、物理学概論 B (前多)、基礎物理学実験・同演習 (前多)、非平衡物理学 (前多)

研究・教育目標と成果

1. 非平衡輸送現象の物理学 (前多、福山)

温度勾配下で分子が輸送される現象 (Soret 効果) は非平衡系の物理学の中心課題の一つである。Polyethylen glycol(PEG) 高分子溶液中の温度勾配下では、Soret 効果と二次的な PEG 濃度勾配による拡散泳動の競合により輸送される分子の空間分布に様々なパターンが現れる「非平衡クロス効果」が知られている [1]。しかし従来の研究は静的な温度分布の下での分子輸送を対象としたものがほとんどであり、変動する温度場の下で起こる輸送現象に関する研究は十分でない。本研究では、動く温度勾配下の非平衡クロス効果の実験的・理論的研究を行った。

実験においては PDMS チャンバーに PEG20000 水溶液を封入し、赤外線レーザー (波長 1480nm) を一定速度で円形スキャンし、動く温度勾配を実現した。すると温度勾配が動く方向とは逆向きに溶液の流れが生じることを見出した。レーザー スキャン速度を上昇させるにつれて流れの速度は増加を示すが、あるレーザー スキャン速度に達すると流れの速さが 10.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ でピークをもつ。さらに熱源が速く動くようになると、

流れの速度は減少をし続ける。このように我々が発見した流動減少は、熱源の移動速度に依存して特徴的な時定数で効果が最大となる共鳴的な現象であることがわかった。

次に、動く温度勾配下の流動現象のメカニズムを解明するため理論モデルを構築した。その結果、流動がうまれる物理的機構とは、温度勾配の波が動くことで熱膨張・粘性変化・熱拡散の3つの効果のクロストークであることを明らかにした。理論と実験の定量的な比較の結果、我々の理論モデルが定量的にも実験結果を説明することを明らかにした。本手法を利用することで、マテリアルの電磁気学的な性質に依存しない分子操作法・分子整流法の開発が期待できる。

2. 非平衡輸送現象と生命の起源に関する研究（前多、野上）

細胞は遺伝情報をDNAやRNAの塩基配列にコードし、自己複製によって増殖する。では、いったいどのように太古の地球において、長大な遺伝情報を保持するDNAはどのように形成されたのだろうか。平衡系の酵素反応によるDNA連結反応では、長大な分子が出現する確率は指数関数的に減衰してしまう。したがって、組織化された集合体が形成されるには単量体分子が濃縮されていることが要求される。これは「生命の起源の濃度問題」と呼ばれ、生命システムの誕生には平衡系を離れ、分子の拡散を凌駕する非線形・非平衡なプロセスが必要であることを示唆している。

この濃度問題を解決するために本研究では、熱水系に類似する温度勾配をもつ非平衡環境を実験室内に構築し、温度勾配下のDNAやRNAの分子輸送に関する研究を通じて、生命の起源の濃度問題を物理的なアプローチで研究を行った。DNA断片がライゲーション酵素反応によって不可逆的に連結していく実験系を構築し、溶液中に含まれる様々なDNAの鎖長と濃度を定量PCR法（qPCR）で計測する手法を新たに開発した。すると、試験管内の熱平衡状態で酵素反応させた場合にはDNA鎖長に対して分子濃度は指数関数的に減衰することがわかった。ところが、温度勾配を与えた系を非平衡に保つと、DNA鎖長と分子濃度はもはや指数関数的な依存性を示さず、長いものをより多く生産する濃度分布になることがわかった。今後、温度勾配下での酵素反応・化学反応によるDNA伸張と、長いDNAが選択的に出現するメカニズムを明らかにするため、理論解析・シミュレーションによる解析をすすめてゆく予定である。

3. アクティブマターの物理学（前多、別府、合屋）

鳥や魚、細胞のようにエネルギーを費やしながら持続的に動く粒子をアクティブマターとよぶ。個々のアクティブマターの動きは無秩序でありながら、集団となると渦のように統率された集団運動を示す。アクティブマターの代表例はロッド形状をしたバクテリアであり、メソスケールの乱流や巨大数揺らぎなど、集団運動に関する統計

的性質を解明する良いモデルとなっている。ところが近年、枯草菌 *Bacillus subtilis* を円柱状の油中水滴に封入すると、乱流様のパターンではなく境界に沿う規則的な渦運動を示すことが報告された [H.Wioland, et al. PRL 2013]。アクティブマターと壁の配向が大域的なパターンを誘導することは、秩序形成のメカニズムを理解する上で重要な知見をもたらすと考えられる。しかし、実験系の制約から境界形状は円柱・球に限定され、その大きさも制御できないという課題がある。本研究では、境界形状を自在に設計する微細加工技術を開発し、円や球に限らない様々な拘束条件下での集団運動について解析を行った。

バクテリア大腸菌 *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 を薬剤処理し、細胞間のネマチック相互作用を制御する新規の系を構築した。さらに、表面処理を施した Polydimethyl siloxane チャンバーの微小容器内にバクテリア懸濁液を封入する手法を確立し、花型の境界形状をもつ微小容器内での集団運動を PIV (Particle Image Velocimetry) から解析を行った。その結果、回転集団運動が対をなした渦ペアが形成されること、渦の回転方向が同じ向き・反対向きの渦ペアが出現することが明らかとなった。渦ペア形成をもたらす要因を明らかにするため、Vicsek モデルとよばれる群れ運動に関する基礎的モデルを平均場近似の下で解析したところ、渦ペアの向きを反転する際に幾何学的な法則が存在することを発見した (Beppu, et al. Soft Matt. 2017)。今後は渦同士の相互作用にフラストレーションのある系において、渦の向きが変化する転移点にどのような影響が現れるかを明らかにする。さらに、1つ1つの細胞を蛍光顕微鏡で可視化することで方向秩序を定量的に計測し、アクティブマターの理論モデルとの比較を詳細に行う予定である。

4. 人工細胞の合成生物学 (前多、Izri、川崎)

“There’s plenty of room at the bottom (原子分子スケールには情報を蓄える広大な地がある)” は今世紀最大の科学的挑戦の始まりの言葉である。我々は、目に見えない物質のスケールにまで工学を落とし込んだとき、「自然を模倣する」ことが最適な戦略であることに気づく。本研究の狙いは、原始的な生命がいかにして誕生したのかを明らかにするため、マイクロサイズのリン脂質ベシクルの形態を持ちながら、自らを複製する能力を持つミニマム細胞を構築することにある。ミニマム細胞とは、現実の細胞を模倣しながらも、可能な限り単純な仕組みで動作する人工物を意味する概念である。バクテリアは内部の染色体 DNA にコードされた情報に従い、多様な分子を絶え間なく産生する精密機械である。分子にプログラムされた自律的な活動を支え、生物らしさの根源となるのは「自らをコピーする事で増殖する」自己複製能力である。この自己複製を行う「最小要素からなる人工細胞」を構築することで、生命システムの

設計原理を明らかにすることが本研究の目標である。

このような目標を達成するためには、新たな技術開発が必要となる。そこでマイクロ流体デバイスを用いて、リン脂質ベシクルに最小限の構成要素となるタンパク質群を封入する新たな手法の開発を行った。5?10 ミクロンサイズのマイクロウェルを平面脂質二重膜でシールし、無細胞転写翻訳の遺伝子発現を行うマイクロ流体デバイスを作成する。このマイクロウェルを光硬化性SU-8フォトレジストを用いて構築する手法を検討し、脂質分子など界面活性剤でシールするプロトコルを開発した。さらに、リン脂質単分子膜に覆われた油中水滴（ドロップレット）にて無細胞転写・翻訳系における遺伝子発現を行い、遺伝子発現が正常に動作することを確認した。今後は、細胞分裂の機能を担う遺伝子群である FtsZ, MinD, MreB とその関連遺伝子をマイクロウェル内で発現する無細胞遺伝子発現を行い、細胞分裂現象の再構成実験とその理論モデルの解析を行って行く予定である。

なお、本研究は Human Frontier Science Program の下、Vincent Noireaux 教授 (Minnesota University) との共同研究として行われたものである。

5. 高分子溶液の相転移・ゲル化・臨界現象

上瀧守：アガロースハイドロゲルの相分離構造と物性の研究. アガロース水溶液系の相図の決定ならびにゲルの高分子網目と溶媒間の摩擦係数を測定した.

発表論文

《原著論文》

Kazusa Beppu, Ziane Izri Jun Gohya, Kanta Eto, Masatoshi Ichikawa and Yusuke T. Maeda.

Geometry-driven collective ordering of bacterial vortices, *Soft Matter* 13, 5038-5043 (2017)

《その他の論文》

前多裕介, 福山達也：温度勾配・濃度勾配の共存下での生体高分子の非平衡輸送現象, *日本物理学会誌* 71, 746-751 (2016)

著書

Rheology of Biological Soft Matters -Fundamentals and Applications- I. Kaneda Eds., 分担執筆 第3章 Gel-Solvent Friction, Springer (2017).

Polymer Gels: Science and Fundamentals V. K. Thakur Eds. 分担執筆 第11章, Transport in and through Gel, Springer, (2017).

講演

《 海外での講演 》

Yusuke T. Maeda, Ziane Izri, Albrecht Ott, Albert Libchaber, Vincent Noireaux: Cell-free transcription-translation in a microfluidic chip: From gene circuits to self-organization and self-reproduction, Biopolis, Singapore, 2015年7月11日.

《 国内での講演 》

前多 裕介: 分子輸送から解く生命の起源: 輸送・情報・構造の動的相関の解明と新たな分子操作技術の確立, JST さきがけ細胞構成第9回領域会議, 福岡, 2016年6月24日.

Yusuke T. Maeda: Ordered structure and its control in bacterial collective motion as active nematics, 新学術揺らぎと構造領域会議, 九州大学, 2016年6月18日.

福山 達也、前多 裕介: 動的な温度勾配下における非平衡クロス効果と流れの発生, 新学術揺らぎと構造領域会議, 九州大学, 2016年6月18日.

Yusuke T. Maeda: Physics of optothermal diffusiophoresis: From the origin of life to molecular manipulation, 分子科学研究所 超分子化学シンポジウム, 2016年6月27日.

福山 達也、前多 裕介: 動的な温度勾配・濃度勾配下における非平衡クロス効果の理論解析, 2016年度日本物理学会秋季大会, 金沢大学, 2016年9月14日.

衛藤貫太, 樋口福永, 市川正敏, 前多裕介: 動境界形状が誘起するバクテリア集団運動の秩序とその制御, 2016年度日本物理学会秋季大会, 金沢大学, 2016年9月14日.

上瀧守, 鴫田昌之: アガロースゲルの相転移構造と摩擦係数, 2016年度日本物理学会秋季大会, 金沢大学, 2016年9月14日.

Yusuke T. Maeda: Molecular transport and ligation: A route toward complex genetic polymer, 新学術領域ゆらぎ冥王代生命学 合同ワークショップ, 東京工業大学, 2016年10月22日.

前多 裕介: 分子輸送から解く生命の起源: 輸送・情報・構造の動的相関の解明と新たな分子操作技術の確立, JST さきがけ細胞構成第3回成果報告会, 東京大学, 2016年11月10日.

Yusuke T. Maeda: Hydrodynamics and enzymatic reaction in moving thermal gradients, International Workshop on Hydrodynamic Flows in/of Cells, 首都大学東京, 2016年11月24-25日.

福山 達也、前多 裕介: 動的非平衡クロス効果: 動く温度勾配下の流れと秩序, 第122回 日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016年12月10日.

野上 晋平, 福山 達也、前多 裕介: 非平衡鋳型重合反応による情報成長の統計則, 第122回 日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016年12月10日.

別府 航早, 合屋 純, 前多 裕介: 境界形状に誘起されるバクテリア集団運動のトポロジカル欠陥, 第122回 日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016年12月10日.

合屋 純, 別府 航早, 前多 裕介: 自己駆動ロッドモデルにおける渦運動と位相欠陥, 第122回 日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016年12月10日.

上瀧守, 鴫田昌之: アガロースゲルの相転移構造と摩擦係数, 第122回 日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016年12月10日.

前多 裕介: 非平衡クロス効果: 温度勾配・濃度勾配下の流れと輸送の秩序形成, 九州大学総合理工学部セミナー, 2016年12月22日.

合屋 純, 別府 航早, 衛藤 貫太, Ziane Izri, 樋口 福永, 市川 正敏, 前多 裕介: 境界形状に誘起されるバクテリア渦運動, アクティブマター研究会, 福岡西新プラザ, 2017年1月20日.

前多 裕介: 分子輸送から解く生命の起源: 輸送・情報・構造の動的相関の解明と新たな

な分子操作技術の確立, JST さきがけ細胞構成第10回領域会議, 淡路夢舞台, 2017年2月22日.

前多裕介: 動く温度勾配下の流れと分子集束, 生物物理学セミナー, 立命館大学,, 2017年3月7日.

前多裕介、別府航早、合屋純: 境界形状に誘起されるバクテリア集団運動の秩序とその制御, 第72回日本物理学会年次大会, 大阪大学, 2017年3月21日.

福山 達也、前多 裕介: 動的非平衡クロス効果: 動く温度勾配下の流れと分子操作, 第72回日本物理学会年次大会, 大阪大学, 2017年3月23日.

上瀧守, 鴫田昌之: アガロースゲルの相転移構造と摩擦係数, 第72回日本物理学会年次大会, 大阪大学, 2017年3月23日.

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

前多裕介、科学研究費補助金 新学術領域研究公募班「バクテリア集団運動にみるアクティブ液晶の秩序形成と制御」(研究代表)

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

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「分子輸送から解く生命の起源: 輸送・情報・構造の動的相関の解明と新たな分子操作技術の確立」(研究代表)

前多裕介、Human Frontier Science Program、研究グラント「Towards self-reproduction of protocells and minimal cells: Evolution versus engineering」(研究分担、代表: Vincent Noireaux (Minnesota Univ.))

学部4年生卒業研究

別府航早 (指導教員: 前多): バクテリア渦運動のトポロジカル制御原理

合屋 純 (指導教員：前多)：自己駆動ロッドモデルにおける渦形成

川崎結加 (指導教員：前多)：無細胞系における遺伝子発現とパターン形成

野上晋平 (指導教員：前多)：非平衡鋳型重合反応による情報成長の統計則

修士論文

福山達也 (指導教員：前多) 非平衡系に置ける流れの理論と分子輸送制御に関する研究

2016年度 客員准教授

コペンハーゲン大学 准教授 御手洗菜美子

物性基礎論分野で、今年度から御手洗菜美子氏（コペンハーゲン大学ニールスボーア研究所 准教授）が、一昨年度から今年度までの2年間、客員准教授に着任した。

今年度は、10月20日から28日まで滞在して、集中講義、教室談話会、およびFDの講演をしていただいた。

文責：中西秀

平成28年度教職員一覧

研究グループ	教授	准教授	助教
素粒子理論	鈴木博 原田恒司+++	大河内豊+++ 小島健太郎+++	奥村健一 田尾周一郎+++
理論核物理	八尋正信	清水良文	松本琢磨
宇宙物理理論	橋本正章		町田真美 小野勝臣
素粒子実験	川越清以	東城順治 吉岡瑞樹*	織田勸 末原大幹 音野瑛俊*
実験核物理	野呂哲夫 森田浩介	若狭智嗣 寺西高	藤田訓裕 坂口聡志
物性理論			松井淳
統計物理学	中西秀	野村清英 御手洗菜美子+	坂上貴洋
凝縮系理論		河合伸 成清修	
磁性物理学	和田裕文	光田暁弘	
量子微小物性	渡部行男		荒井毅++
固体電子物性	木村崇		山田 和正 大西 紘平
光物性		佐藤琢哉	
低次元電子物性	矢山英樹+++		
複雑物性基礎	木村康之	水野大介 稲垣紫緒	岩下靖孝
複雑流体	鵜田昌之	前多裕介	

+客員 ++准助教 +++基幹教育院 *RCAPP **量子ナノスピン物性研究センター

技術職員	加速器・ビーム応用科学センター 岩村龍典 極低温実験室 上田雄也 吉松洋
------	---

平成28年度各種委員

(○は委員長)

部門長・学科長・専攻長：木村(崇)

副部門長：中西、川越

将来計画委員：○川越，木村(崇)、木村(康)，橋本，中西

教育課程委員：○鈴木、鴫田、八尋、木村(崇)、清水、河合、若狭、水野、前多、松本、藤田、松井

入試委員会委員長(全ての入試関連委員会の統括)：中西

助の会幹事：末原

百年史：八尋，○中西，八尋，松井

社会連携委員：○渡部

奨学金資格検討委員：○橋本、和田、東城、成清、前多

経理委員：○野呂，木村(康)

業績評価部会：○八尋、野呂、木村(崇)

就職：○木村(康)、前多

成績管理：○寺西、成清

図書：○成清，寺西

情報委員会：○清水，寺西，野村，奥村

支線LAN管理者：○清水、松井

広報委員：○若狭，吉岡，河合，水野、末原

エントランス展示：○河合、寺西、光田

大学院説明会：○光田，松井、小野

年次報告担当：○渡部，河合

談話会：渡部

教員積立会計：佐藤

教員免許更新講習：○渡部，野村

体験入学・入学オリエンテーション実施委員：○吉岡，水野，小野、岩下、坂上

未来の科学者：○鴫田，渡部，佐藤

理学部便り編集委員：大西

学生生活・修学相談員：○松井，坂口

障害学生支援：鴫田、河合、坂口、寺西、木村(崇)

ハラスメント関連支援室：○中西，若狭，吉森，町田

H28 年度 物理学教室談話会

世話人 渡部行男

第1回教室談話会

題目： 直線偏光励起によるスピン偏極電流およびスピン流の生成
(Photoexcited spin-polarized and/or spin current from nonmagnetic surfaces)

講師： 田村 英一 (大阪大学 基礎工学研究科・特任教授)

日時： 7月12日(火) 17:00～

場所： 物理第一講義室 (W1-B-211)

第2回教室談話会

講演題目： 「原子力機構における超重元素の核物理・核化学研究」

講師： 浅井 雅人 氏

(日本原子力研究開発機構・研究主幹)

日時： 7月27日(木) 17:00より

場所： 物理セミナー室1 (W1-A-701)

第3回教室談話会

講演題目： 中性子星磁気圏のプラズマ環境探査：日本における電波観測の原状

講師： 寺澤敏夫 氏 (理化学研究所・研究員)

日時： 9月6日(火) 16:30～17:30

場所： 物理セミナー室1 (W1-A-701)

第4回物理学教室談話会

講演題目： 超伝導スペクトロメータによる、
宇宙起源反粒子・反物質探索: BESS 気球実験

講師： 山本 明氏 高エネルギー加速器研究機構・名誉教授

日時： 10月11日(火) 17:00～18:00

場所： 物理学科 第二講義室 (W1-B-212 室)

第5回教室談話会

講演題目： Thermodynamics, contact and density profiles of the repulsive Gaudin-Yang model

講師： Prof. Andreas Klumper (Wuppertal University, Germany)

日時： 10月13日(木) 16:00～17:30

場所： 物理会議室(W1-A-711)

第6回 物理教室談話会

講演題目：食物網の構成と移入・絶滅のダイナミクス

講師：御手洗 菜美子 氏 コペンハーゲン大学 ニールスボーア研究所

日時：10月25日(火) 16:00～

場所：物理学科講義室 (W1 - D 315 号室)

第7回 物理教室談話会

講演題目：サマリウム化合物 SmB_6 における電子状態の圧力依存性と
圧力誘起の半導体-金属転移近傍に見られる異常

講師：水戸 毅 氏(兵庫県立大学理学研究科・准教授)

日時：10月27日(木) 16:00-17:30

場所：物理会議室 (ウエスト1号館 A-711 室)

第8回教室談話会

講演題目：「Strong CP problem and axion on the lattice」

講師：北野 龍一郎氏 (高エネルギー加速器研究機構・教授)

日時：1月14日(木) 16:30 ~ 18:00

場所：W1-A-723 物理セミナー室3

第9回教室談話会

講演題目：「格子 QCD 計算はほんとうに『正しい』のか」

講師：橋本 省二氏 (高エネルギー加速器研究機構・教授)

日程：11月1日(火) 16:30-18:00

場所：第2講義室 (ウエスト1号館B棟212室)

第10回物理談話会

講演題目：「光核反応による ^9Be 核構造の研究」

講師：宇都宮 弘章 氏 (甲南大学理工学部物理学科・教授)

日時：11月14日(月) 16:00より

場所：物理会議室 (W1-A-711)

第11回物理学教室談話会

講演題目：中性子を用いた素粒子物理

講師：清水 裕彦氏 名古屋大学・教授

日時：12月20日(火) 17:00~18:00

場所：物理学科 第二講義室 (W1-B-212 室)

第 12 回 物理学教室談話会

講演題目 : Towards adaptive evolution of organisms to extremes of pressure and temperature

講師 : Prof. P. Kumar (University of Arkansas, Department of Physics)

日時 : 1 月 11 日 (水) 16 : 30-18 : 00

場所 : 物理講義室 W1-B-212 (ウエスト 1 号館 B - 2 1 2)

第 13 回 物理学教室談話会

講演題目 : 「格子 QCD による核力・ハイペロン力」

講師 : 石井 理修氏 (大阪大学核物理研究センター(RCNP)・准教授)

日時 : 2 月 21 日 (火) 16:00 - 17:30

場所 : W1-A-723 物理セミナー室 3

H28年度 物理学教室水曜木曜談話会

世話人 渡部行男

第1回物理学教室 水曜談話会

講演題目： 原子核反応の量子力学的記述と不安定核構造研究

講師： 松本 琢磨

日時：2016年7月21日（木） 16:30 - 17:50

場所：W1-B-212

第2回物理学教室 水曜談話会

講演題目： ミューオンを用いた素粒子実験

講師： 東城 順治

日時：2016年11月24日（木） 16:30 - 17:50

場所：W1-B-212

2016年度 物性基礎論コロキウム開催一覧

第一回 (2016年4月19日)

植松 祐輝 (九州大学 量子生物化学)

「高分子の関与する電気二重層と電気浸透・電気泳動の理論」

第二回 (2016年5月13日)

岡本 清美 (芝浦工大)

「異方性のある $S=2$ 量子スピン鎖

--- Symmetry Protected Topological Phase versus Trivial Phase」

第三回 (2016年5月24日)

松井 淳 (物性理論)

「電気回路とランダムウォーク」

第四回 (2016年6月7日)

坂上 貴洋 (統計物理学)

「染色体の能動ダイナミクス」

第五回 (2016年6月21日)

近藤 洋一郎 (統計物理学)

「マグカップの物理ほか」

第六回 (2016年6月29日) (工学研究院機械工学部門との共同開催)

平岩 徹也 (東大物理)

「真核細胞の力学」

第七回 (2016年7月19日)

野口 慎平 (物性理論)

「期待する人々と社会的ジレンマ」

第八回 (2016年10月13日) (兼: 第5回物理学教室談話会)

Prof. Andreas Kluemper (Wuppertal University, Germany)

"Thermodynamics, contact and density profiles of the repulsive Gaudin-Yang model"

第九回 (2016年10月25日)

御手洗 菜美子 (コペンハーゲン大学 ニールスボーア研究所)

「食物網の構成と移入・絶滅のダイナミクス」

第十回 (2016年11月7日)

前多 裕介(複雑物性)

「境界形状が誘起するバクテリア集団運動の秩序とその制御」

第十一回 (2016年11月21日)

Shiwani Singh (I2CNER)

"Impact of the kinetic boundary condition on porous media flow in lattice Boltzmann formulation"

第十二回 (2016年11月29日)

野村 清英 (統計物理)

「Kosterlitz-Thouless 転移と Haldane 予想」

第十三回 (2016年12月19日)

近藤 洋一郎 (統計物理)

「続・おもちゃの物理」

第十四回 (2017年1月16日)

中西 秀 (統計物理)

「エントロピー」

第十五回 (2017年1月30日)

松井 淳 (物性理論)

「楕円体のブラジルナッツ効果」

第十六回 (2017年2月13日)

坂上 貴洋 (統計物理学)

「バクテリア細胞における染色体分配について」

平成28年度九大原子核セミナー開催一覧

第931回 2016年5月23日（月曜日）

講師：永田悦子(KEK)

演題：Z3-QCD 模型による、QCD の非摂動的現象の解明

第932回 2016年6月16日（木曜日）

講師：住吉光介(沼津工業高等専門学校)

演題：ニュートリノ・原子核物理による超新星爆発の解明

第933回 2016年7月1日（金曜日）

講師：中里健一郎(九州大学)

演題：高密度天体における非一様状態の核物質

第934回 2016年12月16日（金曜日）

講師：Costel Petrache(University Paris-Sud, CSNSM, CNRS/IN2P3)

演題：Transverse wobbling and new chiral modes in lanthanide nuclei

第935回 2017年3月1日（水曜日）

講師：渡邊 慎 氏（理化学研究所）

演題：変形ハロー核の動的性質と静的性質

第936回 2017年3月7日（水曜日）

講師：柏 浩司 氏（京都大学）

演題：虚数化学ポテンシャルを利用した非閉じ込め相転移の研究 ～トポロジカルな観点から～

平成28年度非常勤講師一覧

講師	所属	題目
水戸 毅	兵庫県立大学大学	核磁気共鳴法による物性研究の基礎
北畑裕之	千葉大学	非線形物理学：反応拡散系からアクティブマターまで
石井理修	大阪大学	格子 QCD による核力・ハイペロン力の決定
田村英一	大阪大学	相対論的固体物理学入門：Dirac 方程式で記述される電子状態
清水裕彦	名古屋大学	低速中性子を用いた原子核・素粒子物理
宇都宮弘章	甲南大学	天体核物理概論
浅井雅人	日本原子力研究開発機構	重元素領域の精密核分光
寺澤敏夫	東京大学	宇宙の加速器 - パルサーと粒子加速
Pradeep Kumar	University of Arkansas	Biophysics of Complex Living Systems
御手洗菜美子	コペンハーゲン大学	生物系のダイナミクス
橋本省二	高エネルギー加速器研究機構	量子色力学と格子ゲージ理論
山本明	高エネルギー加速器研究機構	超伝導技術が切り拓く粒子加速器、素粒子実験のフロンティア
Andreas Klumper	Wuppertal University	Thermodynamics of Quantum Spin Chains

平成28年度外国人研究者等受入記録

所属・職・氏名	国籍	受入の目的	受入期間	受入者
DGIST・Professor・ Chun-Yeol You	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
Postech・Professor・ Hyun-Woo Lee	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
DGIST・Professor・ Jung-Il Hong	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
Sogang Univ.・ Professor・Myung-Hwa Jung	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
Korea Univ.・ Professor・Kungwon Rhie	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
KRISS・P I・Chanyong Hwang	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
Korea Univ.・ Professor・Kyung-Jin Lee	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
Seoul National Univ.・Professor・ Sug-Bong Choe	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
Chungbuk National Univ.・Professor・ Dong-Hyun Kim	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
DGIST・Researcher・ June-Seo Kim	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)

所属・職・氏名	国籍	受入の目的	受入期間	受入者
Inha University ・ Professor ・Byung-Chan Lee	Korea	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
University of Paris-Sud ・ Professor ・André Thiaville	France	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
National University of Singapore ・ Professor ・Hyunsoo Yang	Singapore	International School on Spintronics and Spin-Orbitronics 参加	28年12月 15日～28年 12月17日	木村(崇)
University College London ・2nd year in PhD ・Peter Phu	England	欧米理学大学院生招 聘プログラム	28年12月 15日～28年 12月23日	木村(崇)
Paris-Sud 大学・教授・ Costel Petrache	France	研究上の情報交換、及 び、研究室向けのセミ ナーを行ってもらう ため	28年12月 16日～28年 12月20日	清水
Budker Institute of Nuclear Physics ・主任 研究員 ・Yury Yudin	ロシア共和 国	COMET 実験に関連する 装置の開発	29年1月21 日～29年2 月11日	東城
Budker Institute of Nuclear Physics ・主任 研究員 ・Yury Yudin	ロシア共和 国	COMET 実験用電磁カロ リメータの開発	29年3月2 日～29年3 月14日	東城
Arkansas 大学・准教 授 ・P r a d e e p K u m a r	アメリカ合 衆国	非常勤講師	29年1月6 日～29年1 月20日	前多

2016 年度教育課程委員会活動報告

鈴木 博

2017 年 4 月 1 日

委員会メンバー：

- 委員長：鈴木
- 副委員長：八尋、鵜田
- 時間割・シラバス：若狭
- 特研配属：清水
- コース分属：水野
- 学科 FD：前多
- 中期計画（教育関連）：河合、鈴木、八尋、鵜田
- アンケート：八尋、松本
- 3 年次学生実験：若狭、藤田
- 国際コース：鵜田
- 過年度生対応：鵜田、松井

2016 年度の活動を大まかな時系列順に列挙すると以下のようである：

- 学部新入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- 過年度生に対する個別の履修指導
- 大学院生新入生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- 学習支援室の体制の整備、役割（過年度生の学習支援など）の設定、TA の設定
- 合理的配慮を必要とする学生への対応の連絡と調整
- 講義、シラバス入力の設定
- 学生の入試形態別学力の追跡調査
- 平成 28 年度入学者の GPA 算出除外科目の変更案作成
- 平成 29 年度からの専攻教育カリキュラムのクォーター制の対応案作成
- 留学推奨時期（クォーター）の案作成
- 基礎学力調査の実施
- 「大学の實力調査」への対応
- Graduate Programs 2017 の校正

- 授業参観の案作成、調整、実施
- 2017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
- 物理学生実験装置補修の議論
- 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
- 国際コース構想に関連する調整
- 学部入学者に係る個人用パソコンの仕様の設定
- 3年次編入学生の教職科目の単位認定の設定
- 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
- 2017年度入学者向けの専攻科目一覧案及び時間割案作成
- 障がいのある学生の物理学生実験受講に向けた準備（自然科学総合実験の見学）議論の開始
- FD「ニールス・ボーア研究所の運営への学生参加」（御手洗菜美子氏）開催
- 学外非常勤講師授業計画作成
- 「修得単位自己チェック表」の確認
- 大学院特別講義番号の設定
- 障がいのある学生の修学支援実態調査への対応
- 2016年度入学者対象のコース配属予備調査
- 特別研究生配属調整
- 次年度進級・新入生・編入生ガイダンス計画
- コース配属
- 次年度理学部・理学府履修の手引きの確認作業

教育課程委員会が、通常の業務以外に今後特に注意すべき課題としては、教職課程に関する規程が大幅に変更される可能性への対応、カリキュラムのスリム化・改革への対応、2018年度からの国際コースの導入への対応などが挙げられる。

平成28年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

「大学院組織への学生参加と大学院教育について」

開催日時：平成28年10月28日（金） 16：40～17：40

開催場所：伊都ウエスト1号館B棟2階 B-211 講義室

物理学部門では、大学院理学研究院・大学院理学府の中期目標・中期計画を軸にファカルティ・ディベロップメントを行っている。本年度は、「大学院組織の運営のあり方と学生参加」をテーマにファカルティ・ディベロップメントを行った。全教員を対象とした開催日における議論に先立ち、本部門出身で現在はコペンハーゲン大学ニールスボーア研究所の御手洗菜美子准教授が来日され、「ニールスボーア研究所の運営への学生参加」の題目で講演を行って頂いた。

ニールスボーア研究所では、運営に関わる委員会に学生の代表者が参加し、学生が大学組織の運営に関与する場面が多い。大学院組織の運営における学生との関わり方を議論するため、どのような活動が行われているかを紹介して頂いた。ニールスボーア研究所では **Study board** とよばれるカリキュラム、外部で履修した単位認定や、単位認定に関する窓口となる役割の一部に、学生委員が参加している。その他、**Teaching Committee**（授業アンケートを下に、次年度にむけた改善点を議論する委員）、**Institute Council**（組織の将来的展望を議論する委員）にも関わる学生委員の状況について説明がなされた。

最後に、運営への学生参加について自由討論を行った。委員を担う学生の積極性と運営に関与するエフォート、それに関連して大学院カリキュラムについても情報交換が行われた。このような大学組織運営への学生参加の現状について詳細をご講演いただくことで、本学における学生参加型の組織運営から教育のあり方について議論する参考となった。

上記に関する議事的全記録が収録されている報告書を作成し、議論の詳細をそこに記した。

平成28年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科	63	63
物理学科3年次編入	—	—
修士課程（物理学専攻）	47	40
博士課程（物理学専攻）	6	博士学位取得者6

2016年度の就職・進学状況

2016年も昨年に引き続き、求人は増えており、経済の回復基調に拍車がかかった様子が求人状況からも伺える。昨年度の引き続き、企業と学生の接触の解禁が3月となり、一方、企業の入社選考開始が6月1日となった。このため、従前と比べて学生、企業双方とも短期決戦の様相が強くなり、双方ともその知名度と個人差による2極化が強まる傾向にある。昨年までと同様、学科推薦を求める企業に対して、正式な推薦書の発行は先行解禁の6月1日以降発行の原則を守っているが、事前の推薦を求める企業もあり、教授推薦ということで対応した。就職活動期間の短縮化、およびインターンシップの増加に伴う事前選考の傾向は今後も進んでいくとみられ、従前問題となっていた就職活動期間の短縮化が、非明示的な就職期間の拡大を加速していることが懸念される。基本的に「九大ブランド」が学生に付加価値をもたらしているが、逆に、これに甘んじ自己研鑽を怠ってきた学生にとっては障害になっていることも懸念される。今後ますます学生の能力差が就職活動に与える影響が大きくなると考えられ、会話やプレゼンテーションなどの自己発信能力やエントリーシートなどにおける文章力などの基礎的な能力の涵養が学部・大学院教育でも重要になると思われる。

修士の進路・就職

2016年度の修了者は38名で、このうち、博士課程進学者（含他大学）が4名、民間企業31名、教員（含私立、非常勤）3名であった。民間企業の主な就職先は、協和発酵キリン株式会社、富士通株式会社、日本軽金属株式会社、三井住友銀行、ソニーリージョナルセールス株式会社、株式会社日立システムズ、ソニー株式会社、株式会社ジャパンディスプレイ、日本電信電話株式会社、テルモ株式会社、株式会社リコー、ローム株式会社、三菱電機株式会社、西日本鉄道株式会社などである。

博士の進路・就職

博士課程修了者は6名であり、公務員1名、民間1名、PD2名、進路未定2名である。民間企業では博士は別枠採用および通年採用のところが多く、就職活動をピンポイントで行えば就職のチャンスは多いと思われる。しかし、博士論文作成のための労力や時間を考えると就職活動に時間を割けないジレンマはあり、博士課程中に将来の進路を考える時間を設けることが重要と思われる。

学部学生の進路・就職

修士進学者が45名（九大物理34名、他学府1名、他大学10名）、公務員1名、教員3名、民間企業就職2名、未定2名であった。他大学進学者が10名と人材の流失が際立っていた。

第20回 体験入学・公開講座報告

担当:水野大介

平成 29 年 3 月 27 日(月)~28(火)の 2 日間にわたって、「第回体験物理学」を実施した。以前は休みの期間に高校 1・2 年生を対象として 3 日間実施してきたが、アンケートで 3 日通うのは大変であるとの意見が多く寄せられたことから、8 年前から期日を 2 日間に短縮して実施している。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。(元の日程に戻すことを希望する意見はなかった。)例年と同様に、福岡県内の全ての高校と周辺県の有力高校に案内状を送り、参加者を募集したところ、57名の参加があった。また、一般向けの公開講座への申込者 4 名、高専生 7 名で、全体受講者数が 70 名近くになった。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。最終日に閉校式を行い、今後の改善のためにアンケートをお願いした。体験入学に 2 日間参加した高校生に対して全般の感想について聞いた結果を最後のグラフに示す。興味(面白い-普通-面白くない)と難易度(難しい-普通-易しい)について答えてもらい、各生徒がどの組み合わせで回答したかを集計したものである。全体のアンケートで、「面白くて難易度もちょうど良い」と「面白いが難しい」がほぼ同数であり、概ね好評であったと考えている。実験では「面白くて難易度もちょうど良い」が圧倒的に多く、「実験が楽しかった」という声も多く聞かれたが、早く終了して時間が余ったテーマもあり、今後の課題である。また、実験テーマやセミナーの内容を事前にある程度公開することを要望する意見もあった。

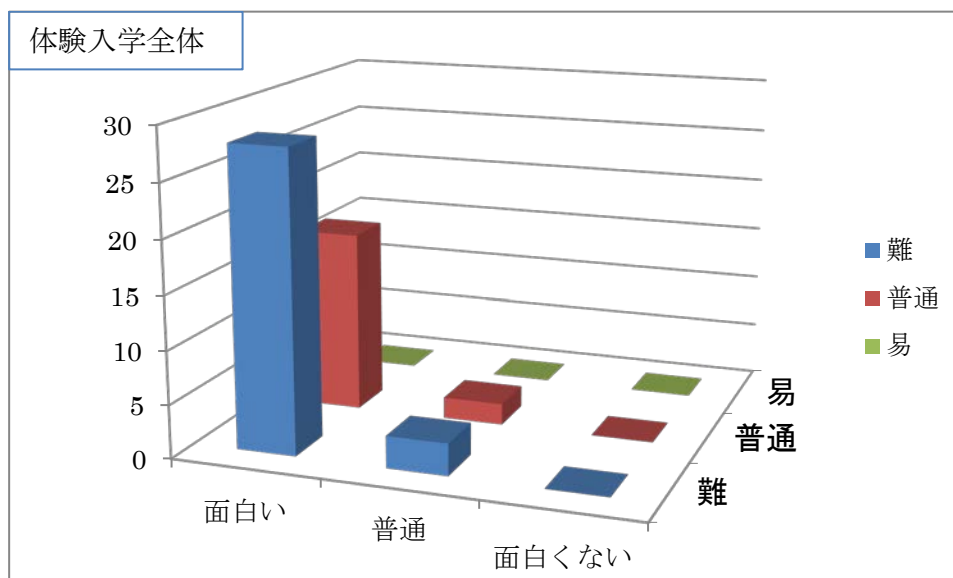
[開講日程・内容(予定)]

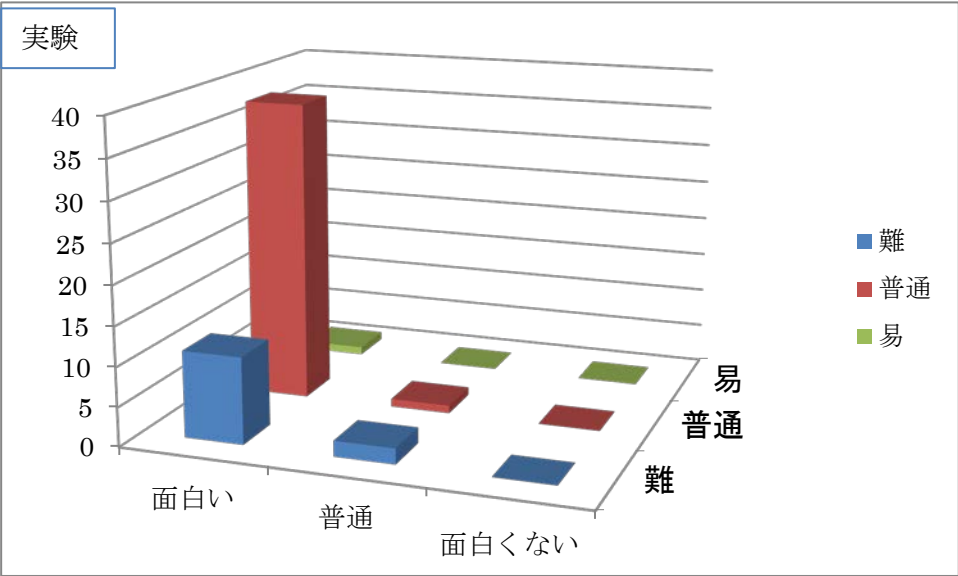
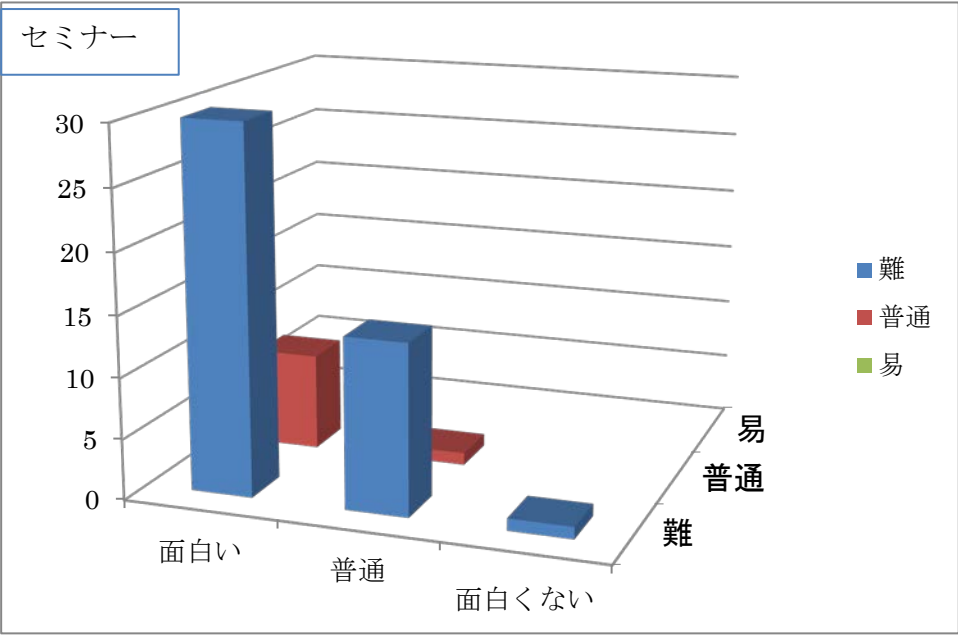
	3 月 27 日(月)		3 月 28 日(火)
10:00 ~ 11:00	開校式	10:00~10:05	実験の注意
11:10 ~ 12:00	「光で磁石を制御する ~ファラデーのやり残したこと~」 (佐藤准教授)	10:10~12:10	実験(A~Gから 1 つ)
12:00 ~ 13:30	昼休み	12:10~13:10	昼休み
13:30 ~	「不思議なミクロの世界の住人原子核を探る」	13:10~13:15	集合

14:20	(清水准教授)		
14:30 ～ 15:20	「ビッグバン宇宙・星の進化・超新星・ブラックホール」 (橋本教授)	13:20～15:20	実験(A～Gから 1 つ)
		15:30～15:45	閉校式

[実験テーマ]

- A. 物質を透過する粒子線
- B. 極低温の世界
- C. 超伝導を体験する
- D. エントロピー:ゴムの伸び縮みを考察しよう
- E. BZ 反応 ～化学反応が「振動」する～
- F. 日用品を使った電磁力の実験
- G. 身の回りの放射線を調べよう





平成28年度社会貢献活動報告

社会連携委員長 渡部行男

1) 高校訪問出前授業等の実施

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

1 先端科学普及事業（高校への出張講義等）

1) 大分県立大分舞鶴高等学校

7月14日（木） 2年生対象 30名程度
松井 淳 講師

2) 山口県立下関西高等学校

10月21日（金） 2年生対象 30名程度
藤田 訓裕 助教

3) 鹿児島工業高等専門学校

12月2日（金） 4年生対象 20名程度
木村 崇 教授

4) 福岡舞鶴高等学校

平成29年2月10日（金） 2年生対象 140名程度
末原 大幹 助教

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

福岡県高等学校理科部会と合同で中高教育に携わる方々に対して、最先端の自然
科学と科学技術の現状に関する講演会を開催した。

実施日：平成27年8月10日

物理学部門の講演は、橋本正章 教授（宇宙物理）、寺西高 准教授（原子核
実験）、

（委員 渡部行男教授）。

3) 先端科学体験事業（体験物理学）

実施日：平成29年3月27日（月）～28（火）

対象：高校1，2年生，高専生3，4年生

委員 水野准教授 取りまとめ

内容：大学での物理学を実験・実習とセミナーを通して2日間体験してもら
う。

セミナー

「光で磁石を制御する ～ファラデーのやり残したこと～」(佐藤准教授)

「不思議なマイクロの世界の住人原子核を探る」(清水准教授)

「ビッグバン宇宙・星の進化・超新星・ブラックホール」(橋本教授)

実験

A. 物質を透過する粒子線 (寺西 高)

B. 極低温の世界(光田 暁弘)

C. 超伝導を体験する(山田 和正)

D. エントロピー:ゴムの伸び縮みを考察しよう (松井 淳)

E. BZ 反応 ～化学反応が「振動」する～(岩下 靖孝)

F. 日用品を使った電磁力の実験(坂上 貴洋)

G. 身の回りの放射線を調べよう(藤田 訓裕)

[開講日程・内容]

	3月27日(月)		3月28日(火)
10:00 ~ 11:00	開校式	10:00 ~ 10:05	実験の注意
11:10 ~ 12:00	「光で磁石を制御する ~ファラデーのやり残したこと~」(佐藤准教授)	10:10 ~ 12:10	実験(A~Hから1つ)
12:00 ~ 13:30	昼休み	12:10 ~ 13:10	昼休み
13:30 ~ 14:20	「不思議なマイクロの世界の住人原子核を探る」(清水准教授)	13:10 ~ 13:15	集合
14:30 ~ 15:20	「ビッグバン宇宙・星の進化・超新星・ブラックホール」(橋本教授)	13:20 ~ 15:20	実験(A~Hから1つ)
		15:30 ~ 15:45	閉校式

4) 公開講座 現代物理学入門

実施日：平成29年 3月27日(月)

内容：3)のセミナーについては一般の方々に対する講座として公開した。

5) 平成28年度オープンキャンパス

実施日：平成28年8月6日(土)

内容：研究室見学、講義を行った

6) 未来の科学者養成講座「エクセレント・スチューデント・イン・サイエンス 育成プロジェクト」(JSTの委託事業)

委員 鴫田昌之教授 渡部行男教授 佐藤琢哉准教授

平成28年9月~平成29年3月 毎月第2、第4土曜日に、本部門名誉教授等により、理学部で行った。

また、公開講演会(平成28年11月5日(土))で、本物理学専攻修士課程 横谷有紀氏が、不思議な電気・磁気・熱の流れ方 一人工ナノ構造を駆使した量子物性制御—を理学部で講演した。

7) 教員免許状更新講習

実施日：平成28年 10月2日(日)

内容：教員免許状更新講習として、「現代物理学二講」を講義し、試験を行った。

渡部行男 教授 野村清英 准教授

開始時刻	終了時刻	内 容
8:40	9:00	受付
9:00	9:10	オリエンテーション
9:10	10:30	特殊相対論の基礎に関する講義
10:40	12:00	相対論の応用に関する講義
12:00	13:00	昼休み
13:00	14:20	量子論の基礎と原子に関する講義
14:30	15:50	固体物理学の基礎に関する講義