

物理教室年次報告書

平成30年度

2019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30年度の研究テーマと成果	
素粒子理論	2
理論核物理	14
宇宙物理理論	30
粒子系理論物理	43
実験核物理	49
素粒子実験	72
物性理論	112
統計物理学	118
凝縮系理論	122
磁性物理学	125
量子微小物性	131
固体電子物性	141
複雑物性基礎	151
複雑流体	166
客員教授	178
教職員一覧	179
各種委員一覧	180
物理学教室談話会	181
九大原子核セミナー	184
非常勤講師一覧	185
外国人研究者等受入記録	186
教育課程委員会活動報告	187
物理学部門ファカルティ・デベロップメント報告	189
入学者数と卒業者数	190
就職・進学情況	191
体験入学・公開講座報告	193
社会活動貢献報告	197

はじめに

本年次報告は、九州大学理学研究院物理学部門の2018年度の活動をまとめたものです。

物理学部門の人事に関わることとしては、実験核物理研究室において4月に若狭智嗣先生が教授に昇任されるとともに、郷慎太郎先生が助教として着任されました。また1月には藪中俊介先生が助教として物性理論研究室に着任されました。しかしながら、3月には橋本正章先生が定年退職されるとともに、清水良文先生、佐藤琢哉先生、奥村健一先生、岩下靖孝先生が退職されました（佐藤先生は東京工業大学に教授として、岩下先生は京都産業大学に准教授として転出されました）。個人的には、5人の先生方には大変親切にいただいたので寂しい限りですが、部門における経験の豊富な若狭先生を教授として迎えるとともに、郷先生と藪中先生というフレッシュな戦力を加え、物理学部門として益々の発展を期待できると考えています。

また4月には和田裕文先生が理学研究院長となられ、木村康之先生（研究院長補佐）とともに理学研究院の運営に尽力しておられます。大変な激務であることは容易に想像できますが、その中で物理学部門だけではなく全部門を公平な観点から盛り上げることで、理学研究院全体の一層の発展に大きな貢献をして下さるものと考えています。

また今年度は、木村崇先生が「熱スピン注入を基軸にしたワイヤレス・スピンドバイスの開発」により、ドイツ・イノベーション・アワード「ゴットフリード・ワグネル賞2018」を受賞されました。木村先生は部門運営に多大な貢献をされる中で研究についても大きな成果を挙げられており、大変喜ばしいニュースです。また本年度は3名の学生が、学会等での発表について表彰を受けております。

学部レベルの大きな変化としては、本年度より国際理学コースがスタートし、物理学科も2名の新入生を迎えております。国際理学コースは理学の専門教育に加えて、英語力の強化と学際性の涵養を目的としており、各学科共通の国際理学コース独自の科目において英語のプレゼンテーション能力などを鍛えます。

その他の大きな動きとして、2016年度より部門の事務を統括して下さっていた家田恵さんが9月末で庶務係に異動され、10月から園敦子さんが主任として生物事務室から異動してこられました。部門長（＝福田）が着任2年目で経験も乏しいことに園さんが大きな不安を抱かれていたことは想像に難くないですが、それでも園さんはこれまでの経験を生かし、見事に物理事務を率いて下さっています。

振り返ってみると今年も物理学教室では大きな動きがあり、部門長としては降ってくる業務をこなすことで精一杯だったのですが、次年度は若狭先生が部門長を務められることになっており、物理学教室を強力に牽引して下さるものと思います。本報告の読者の方には、今後ともご指導、ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

物理学教室の活動に関する詳しい情報は、ウェブサイト

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

にあり、適宜更新されています。デザインも本年度に一新されましたので、是非御覧下さい。

物理学部門 部門長 福田順一

素粒子理論

研究室構成員

鈴木博 教授

奥村健一 助教

《 博士研究員 》

高浦大雅 (学術研究員・特任助教)

《 大学院 博士課程 》

笠井彩 森川億人

《 大学院 修士課程 》

下条昂礼 石川航輔 柴田和哉 中山聖

《 学部 卒業研究生 》

芦江誠大 木太久稜 戸板真太郎 竹内健悟

福田雄治

《 訪問研究者 》

井上研三

担当授業

物理学入門 I (鈴木博)、量子力学 II (鈴木博)、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)、物理学特別研究 I・II (奥村健一)、場の量子論 (鈴木博)、M1 ゼミナール (鈴木博)

研究・教育目標と成果

$\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginsburg 模型の数値的解析 (森川億人・鈴木博)

4次元の $\mathcal{N} = 1$ 超対称 Wess–Zumino 模型を dimensional reduction して得られる 2次元の $\mathcal{N} = 2$ の理論は、低エネルギーの極限において、非自明な $\mathcal{N} = 2$ の超対称共形場理論になると信じられている。このように低エネルギー有効理論として共形場理論を実現する理論を一般に Landau–Ginsburg 模型と呼ぶが、上記の予想を解析的に証明することは現時点では不可能である。我々は、以前、加堂と鈴木によって提案されたこの理

論の超対称性を保つ格子正則化を用い、超ポテンシャルが超場の3次式と4次式の場合について、上記の予想を Nicolai map を利用した数値シミュレーションによって確かめることを試みた。結果として、スカラー場のスケール次元と中心電荷に対して予想と矛盾しない値を得ることができた。これは、以前、河合と菊川、また鎌田と鈴木によって得られた結果を拡張しており、上記の対応に対する数値計算の手法からのさらなるサポートを与えたことになっている。我々の計算手法は、究極的には、Calabi-Yau 空間にコンパクト化された超弦理論の tree level での散乱振幅の計算を可能にすると期待される。

グラディエントフローを用いた $\mathcal{N} = 2$ 超対称 Yang-Mills 理論の超カレントの構成 (笠井彩・森川億人・鈴木博)

素粒子物理学および数理物理学の観点から、超対称ゲージ理論の非摂動的ダイナミクスの解明には大いに関心が持たれる。これは単純な問題ではないが、その理由の一つはゲージ理論に対する非摂動的計算手法として唯一確立している格子ゲージ理論が、その構成法から超対称性を保てないことにある。このため、格子理論の連続極限を取る際には、relevant なパラメーターを超対称な連続理論に向けてチューニングする必要がある。具体的には、超対称性に付随したネーターカレントである超カレントの保存則（より正確には Ward-高橋恒等式）が成立するようにチューニングを行う必要がある。これが解析に複雑さを与えるのである。ここでは、4次元の $\mathcal{N} = 1$ 超対称 Yang-Mills 理論に対する我々のグループの以前の研究成果の延長として、4次元の $\mathcal{N} = 2$ 超対称 Yang-Mills 理論における超カレントの、正則化に依存しない表式を得た。これは $\mathcal{N} = 1$ の場合と同様に、グラディエントフローという手法を用いることで達成されているが、 $\mathcal{N} = 2$ 理論におけるスカラー場や湯川結合の存在のために、 $\mathcal{N} = 1$ での構成に比べて極めて複雑で根気強い計算を必要とした。結果得られた超カレントの表式は、超対称な連続極限で自動的に Ward-高橋恒等式を満たすものになっており、将来の $\mathcal{N} = 2$ 超対称 Yang-Mills 理論の格子シミュレーションのパラメーターチューニングにおいて有用であると考えている。

2 ループレベルの係数を用いたグラディエントフローによるエネルギー運動量テンソルの解析 (鈴木博・高浦大雅)

(これは入谷匠氏・北澤正清氏との共同研究である。) グラディエントフローという手法を用いることで、正則化によらないエネルギー運動量の構成、特に格子ゲージ理論におけるエネルギー運動量の構成が可能なが指摘されている。この構成法では、エネルギー運動量テンソルとフローさせた演算子の間のマッチングの係数を摂動論によって決定する。最後にフロー時間 t の $t \rightarrow 0$ への極限を考えることで、漸近的自由性

から摂動論の使用が正当化される。ただし、格子数値シミュレーションでは格子間隔 a は常に有限であり、 $t \gg a^2$ と取る必要があるため、実際上どの程度まで t を小さくできるか（つまり摂動論での係数がどの程度うまく働くか）は先験的に明らかではない。これまで、1ループレベルの摂動計算によるマッチング係数が知られていたが、最近、Harlander 達による大規模な計算により2ループでのマッチング係数が得られた。ここでは、この新しいマッチング係数がどの程度状況を改善するのか、詳細な格子数値シミュレーションが可能なクエンチ QCD（クォークの効果を含まない QCD）における熱力学量を用いて解析した。その結果、2ループの係数は一般に、 $t \rightarrow 0$ への外挿およびくりこみ点の選択に付随する系統誤差を1ループの係数に比べて大きく改善することが明らかになった。この結果は今後この構成法をフル QCD に応用するための大きな励みとなる。

グラディエントフローとウィルソン流くりこみ群との関係に関する研究（鈴木博）

（これは園田英徳氏との共同研究である。）グラディエントフローとは、量子場の変数を仮想的な時間（フロー時間）の関数として拡散させ、その相関関数を考えるものである。フローさせた場の相関関数が単純なくりこみの性質を獲得する点にその大きな特徴がある。フロー時間は次元を持っているので、これは系のスケールの変化の元で量子場の相関関数がどう変化するかという問題と見ることができ、この観点からはウィルソンのくりこみ群との類似性が強く示唆される。実際、両者の関係を示唆した先行研究はすでにいくつか存在する。ここでは、自由ラプラシアンでフローさせるスカラー場の理論に対してではあるが、両者は実際本当に等しいこと、フロー時間はまさにウィルソン流くりこみ群のカットオフに対応していること、また、フローさせた場の相関関数の単純なくりこみの性質がこの対応から自然に理解されることを示した。今後は、より複雑な非線形なフローを考えるのが自然な理論、例えば2次元の $O(N)$ 非線形模型や、ゲージ理論における両者の関係について考察を進めたい。

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

（これは WHOT-QCD Collaboration との共同研究である。）WHOT-QCD Collaboration では、2016 年ごろよりいわゆるグラディエントフローの手法を用いて有限温度量子色力学（QCD）における各種物理量（状態方程式、カイラル凝縮、カイラル感受率、トポロジカル感受率など）の決定を進めている。しかし、QCD の数値シミュレーションは単一のパラメーターの組に対してスーパーコンピュータで数ヶ月（もしくは1年）オーダーの計算量を必要とするため、物理点クォーク質量の場合に対して連続極限を取るという最終目標の達成にはまだまだ遠いのが現状である。ここでは、その目標へのさらなる一歩として、物理点より多少重い ud クォーク ($m_\pi/m_\rho \simeq 0.63$) に対して、以前

の格子間隔 $a \simeq 0.07 \text{ fm}$ より少し荒い格子 $a \simeq 0.097 \text{ fm}$ に対して配位生成を行い、ホッピングパラメター κ の決定、およびこの格子間隔での物理量の測定を行った。これは、連続極限を取るための準備となるものである。またこれと並行して、以前より進めている物理点クォークの $a \simeq 0.07 \text{ fm}$ の場合に対して $N_t = 18$ の場合（これは温度にするに擬相転移点付近の 122 MeV に対応する）の配位の生成を進めた。これらの数値計算は、主に、九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータシステム ITO を利用して行った。

超対称性をソフトに破る質量に対する敷居補正の解析（奥村健一）

超対称模型において重い場を積分した後に生じる質量項に対する補正は、ゲージ媒介、アノマリー媒介など様々な超対称性の破れの媒介機構において重要な役割を果たしている。新しい媒介機構を模索するため、Wess–Zumino 模型において一般のソフトな超対称性の破れに対し重い場を積分した後の 2-loop の有限項の計算を行った。得られた結果はアノマリー媒介の場合に既知の結果と一致することを確認した。計算過程で得られた知見を基に新しい媒介機構を構築するため、さらに研究を進める予定である。

QCD の理論予言向上のための研究（高浦大雅）

QCD に基づく理論予言の向上は LHC 実験での解析を始め様々な場面で重要性を増してきている。そこで、QCD の摂動予言の精度を制限するリノーマロンを除去するための定式化を行った。また、その定式化を利用し、QCD 真空の研究、および QCD 基本パラメータ α_s の高精度決定を行った。今後はリノーマロンの除去法をより汎用性の高い手法に拡張すべく研究する。

2つの超場を含む $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg 模型の数値的研究（森川億人）

低エネルギーで非自明な共形場理論を与える場の理論を Landau–Ginzburg (LG) 模型という。例えば 2次元 $\mathcal{N} = 2$ Wess–Zumino (WZ) 模型は超共形場理論の LG 模型を与えると予想されている。この対応関係は超弦理論において重要な予想であり、これまで様々な研究が行われている。しかしながら、WZ 模型は低エネルギーで強結合であるためにその計算は困難であり、非摂動的な手法が必要である。そのような方法として、離散化された運動量空間で定義される、超対称性を保つ数値計算手法が考案されている。これまで単一超場で記述される WZ 模型にこの手法を適用し、予想に対する傍証が得られている。この研究では、数値計算コードをより複雑な 2つの超場の場合に拡張し、中心電荷の測定を行った。この結果は超共形場理論で期待される値を再現しており、対応関係について非摂動的傍証を与えた。

発表論文

《原著論文》

Axial $U(1)$ anomaly in a gravitational field via the gradient flow:

Okuto Morikawa and Hiroshi Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **(2018)** (2018), 073B02

[arXiv:1803.04132 [hep-th]]

Numerical study of the $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg model:

Okuto Morikawa and Hiroshi Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **(2018)** (2018), 083B05

[arXiv:1805.10735 [hep-lat]]

Gradient flow representation of the four-dimensional $\mathcal{N} = 2$ super Yang–Mills supercurrent:

Aya Kasai, Okuto Morikawa and Hiroshi Suzuki,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **(2018)** (2018), 113B02

[arXiv:1808.07300 [hep-lat]]

Thermodynamics in quenched QCD: energy–momentum tensor with two-loop order coefficients in the gradient flow formalism:

Takumi Iritani, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki and Hiromasa Takaura,

Progress of Theoretical and Experimental Physics **(2019)** (2019), 023B02

[arXiv:1812.06444 [hep-lat]]

Derivation of a gradient flow from the exact renormalization group:

Hidenori Sonoda and Hiroshi Suzuki,

[arXiv:1901.05169 [hep-th]] to appear in Progress of Theoretical and Experimental Physics (2019)

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction:

Hiromasa Takaura, Takashi Kaneko, Yuichiro Kiyo, Yukinari Sumino,

Physics Letters B **789** (2019), 598–602

[arXiv:1808.01632[hep-ph]]

Numerical study of the $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg model with two superfields:

Okuto Morikawa,

Journal of High Energy Physics **1812** (2018), 045

[arXiv:1810.02519 [hep-lat]]

《Proceedings》

Equation of state near the first order phase transition point of $SU(3)$ gauge theory using gradient flow:

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

[arXiv:1811.04220 [hep-lat]]

Study of energy–momentum tensor correlation function in $N_f = 2 + 1$ full QCD for QGP viscosities:

Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda,

[arXiv:1901.01666 [hep-lat]]

Measuring of chiral susceptibility using gradient flow:

Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda,

[arXiv:1901.02294 [hep-lat]]

《その他の論文》

Gradient flow, renormalon ambiguity, and the gluon condensate:

Hiroshi Suzuki and Hiromasa Takaura,

[arXiv:1807.10064 [hep-ph]]

Determination of α_s from static QCD potential: OPE with renormalon subtraction and lattice QCD:

Hiromasa Takaura, Takashi Kaneko, Yuichiro Kiyo, Yukinari Sumino,

[arXiv:180801642[hep-ph]]

著書

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

講演

《 海外での講演 》

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction:
Hiromasa Takaura,
alphas-2019: Workshop on precise measurements of the QCD coupling constant, 2019
年2月11日–15日 ECT*, Trento, Italy

《 国内での講演 》

Energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow
Hirosi Suzuki,
セミナー講演、2018年4月12日、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構

グラディエント・フローによる量子色力学の状態方程式

鈴木博
ポスター発表、2018年7月12日、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN)
第10回シンポジウム

Thermodynamic quantities in the $N_f = 2 + 1$ QCD; the case of somewhat heavy ud
quarks

鈴木博
日本物理学会 2018年秋季大会、2018年9月16日、信州大学

Hidden light singlet Higgs bosons in NMSSM with TeV scale mirage mediation

Ken-ichi Okumura,
Asian Linear Collider Workshop 2018 (ALCW2018)、2018年5月28日–6月1日、福岡

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction

Hiromasa Takaura,

セミナー講演、2018年4月24日、高エネルギー加速器研究機構

Determination of α_s from static QCD potential

高浦大雅

セミナー講演、2018年5月25日、富山大学

Determination of α_s from static potential with subtracting infrared contribution

Hiromasa Takaura,

Asian Linear Collider Workshop 2018 (ALCW2018)、2018年5月28日-6月1日、福岡

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction

高浦大雅

基研研究会「素粒子物理学の進展 2018」、2018年8月6日-10日、京都大学基礎物理学研究所

Gradient flow, divergent perturbative series, and the gluon condensate

高浦大雅

ポスター発表、基研研究会「素粒子物理学の進展 2018」、2018年8月6日-10日、京都大学基礎物理学研究所

グラディエントフローにおけるリノーマロンとグルーオン凝縮

高浦大雅

日本物理学会 2018年秋季大会、2018年9月14日-17日、信州大学

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction

高浦大雅

セミナー講演、2018年10月3日、京都大学

クォーク間ポテンシャルからの α_s 決定：リノーマロン誤差を除いた OPE 計算

高浦大雅

「理研-九大ワークショップ—素粒子・原子核から宇宙へ—」、2018年11月21日-22日、理化学研究所神戸キャンパス

Determination of α_s from static QCD potential with renormalon subtraction

Hiromasa Takaura,

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH 2018 winter),
2018年12月3日–8日、高エネルギー加速器研究機構

Renormalon and gluon condensate

Hiromasa Takaura,

セミナー講演、2018年12月17日、理化学研究所和光キャンパス

Gradient flow 法に基づくエネルギー運動量テンソルの t 依存性と $t \rightarrow 0$ 外挿
高浦大雅

日本物理学会第74回年次大会、2019年3月17日、九州大学

Supercurrent on the lattice in terms of the gradient flow

Aya Kasai,

セミナー講演、2018年5月25日、千葉大学

Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow

Okuto Morikawa

セミナー講演、2018年5月22日、高エネルギー加速器研究機構

複数超場を含む $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg 模型の数値的研究

森川億人

日本物理学会2018年秋季大会、2018年9月15日、信州大学

Numerical study of the $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg model

森川億人

「理研-九大ワークショップ—素粒子・原子核から宇宙へ—」、2018年11月21日、理化学研究所神戸キャンパス

Numerical study of the $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg model

Okuto Morikawa

ポスター発表、KEK Theory Workshop 2018、2018年12月19日、高エネルギー加速器研究機構

Numerical study of the $\mathcal{N} = 2$ Landau–Ginzburg model

Okuto Morikawa

ポスター発表、The 4th International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics” (HPNP2019), 2019年2月21日、大阪大学

Gradient flow representation of the 4D $\mathcal{N} = 2$ SYM supercurrent

森川億人

日本物理学会第74回年次大会、2019年3月17日、九州大学

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、特別研究員補助費

弦理論における準安定状態の崩壊と不純物による触媒効果の研究

研究代表者：笠井彩

科学研究費補助金、特別研究員補助費

場の理論と超弦理論に対する非摂動論的アプローチ

研究代表者：森川億人

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

笠井彩、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

森川億人、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

他大学での研究と教育

鈴木博：2018年11月14日–16日、大阪大学において大学院集中講義「グラディエント

フローの基礎とその応用」を行った。

鈴木博：2018年12月5日-7日、神戸大学において大学院集中講義「グラディエントフローの基礎とその応用」を行った。

奥村健一：2018年9月4日-6日、中央大学において大学院集中講義「素粒子標準模型と超対称理論」を行った。

学部4年生卒業研究

芦江誠大：(指導教員、奥村健一)：一般相対性理論の研究

木太久稜：(指導教員、奥村健一)：一般相対性理論の研究

戸板真太郎：(指導教員、奥村健一)：一般相対性理論の研究

竹内健悟：(指導教員、奥村健一)：一般相対性理論の研究

福田雄治：(指導教員、奥村健一)：一般相対性理論の研究

修士論文

下条昂礼：(指導教員、鈴木博)：有限温度 $N_f = 2 + 1$ 量子色力学における状態方程式の数値的研究

博士論文

笠井彩：(指導教員、鈴木博)：Construction of a regularization-independent supercurrent in terms of the gradient flow (グラディエントフローによる正則化非依存な超カレントの構成)

学外での学会活動

鈴木博：

日本物理学会第74回年次大会(2019年)実行委員

日本物理学会第73~74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

京都大学基礎物理学研究所共同利用運営委員会委員

ポスト「京」重点課題9 諮問委員会委員

素粒子メダル奨励賞選考委員

Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

平成 28 年度科学研究費助成事業第 1 段審査（書面審査）委員

平成 29 年度科学研究費助成事業第 1 段審査（書面審査）委員（若手研究（B））

奥村健一：

The Asian Linear Collider Workshop 2018 (ALCW2018), Convener

日本物理学会第 74 回年次大会 Jr セッション審査委員

その他の活動と成果

鈴木博：

「グラディエント・フローによる量子色力学の状態方程式」が、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 萌芽型共同研究課題（九州大学情報基盤研究開発センター）に採択

奥村健一：

福岡教育大学附属福岡中学校 1 日探求活動担当教員

理論核物理

研究室構成員

肥山 詠美子 教授
清水 良文 准教授
松本 琢磨 助教 富樫 甫 助教

《 大学院 博士課程 》

宮原 昌久 開田 丈寛

《 大学院 修士課程 》

小川 翔也 山田 悠真 青木 宏平 大野 晃
徳永 航

《 学部 卒業研究生 》

井上 正悟 金 龍熙 宮本 良祐 山本 拓実

担当授業

量子力学I・同演習 (肥山詠美子・松本琢磨)、物理学総合演習 (肥山詠美子) 物理数学I(清水良文)、理論核物理学 (清水良文・松本琢磨)、量子力学III(清水良文)、物理数学演習 (松本琢磨)、物理学特別研究I(肥山詠美子・清水良文・松本琢磨)、物理学特別研究II(肥山詠美子・清水良文・松本琢磨)

研究・教育目標と成果

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

2015年に $qqqc\bar{c}$ のペンタクォークが発見されたことを受けて、クォーク模型を用いて、実験値を再現するかどうかを確認した。その結果、実験のエネルギー領域には共鳴が存在することはなく、代わりに、実験値よりも500MeV上には幅の狭い共鳴を得ることができた。この計算値の信頼性を調査するために、 $sssc\bar{c}$ の計算を行い、第一計算である格子QCDで得られる計算結果と比較する予定である。

複素スケーリング法を用いた共鳴状態と位相差の研究

(青木 宏平 (M1), 小川 翔也 (M2), 松本琢磨)

原子核には束縛状態だけでなく有限の寿命で崩壊する共鳴状態が存在し、理論・実験の両面から精力的に研究がなされている。共鳴状態は散乱の位相差や連続準位密度 (CLD) を用いて議論され、CLD のピーク位置が共鳴状態のエネルギーに対応すると考えられているが、ピークの位置と共鳴状態のエネルギーが一致しない場合もある。

本研究では、位相差と共鳴状態の関係をより明確にするために、複素スケーリング法 (CSM) を用いて共鳴状態と CLD を導出し、ピーク位置との関連性について議論した。その際、Coulomb 力やチャンネル結合の効果を明らかにするために ${}^5\text{He}$, ${}^5\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$ を対象に解析を行った。計算結果より、共鳴状態の崩壊幅が広がるほど、ピーク位置とのずれが大きくなることを確認した。今後は Coulomb 力やチャンネル結合の効果を明らかにするために ${}^5\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$ を対象に研究を行う予定である。

${}^5\text{He}$ の量子散乱における仮想状態と共鳴状態の探索

(徳永 航 (M1), 山田 悠真 (M2), 松本琢磨)

近年、加速器の発達によってドリップライン近傍における不安定核の研究が精力的に行われている。不安定核は粒子が非常に弱く束縛しているため粒子崩壊を起こすが、崩壊した状態の中に準安定な共鳴状態が現れることがある。共鳴状態は、量子力学的散乱においては S 行列の特異点に対応し、これまで多くの研究が行われてきた。また、共鳴状態と同じく S 行列の特異点になる仮想状態も存在することが知られている。これらは特に原子核が弱束縛になる不安定核領域において現れ、非束縛な原子核と関係性があると考えられるため、2つの状態を記述できる Jost 関数を用いて議論されている。

最も簡単な非束縛核である ${}^5\text{He}$ は、これまで多くの研究が行われ、その共鳴状態についてはよく知られている。本研究では ${}^5\text{He}$ に注目し、先行研究 (H. Masui, S. Aoyama, T. Myo, K. Kato, K. Ikeda : Nucl. Phys. A **673** (2000) 207) に沿って Jost 関数を導出した。これを用いて S 行列の特異点の位置を求め、共鳴状態と仮想状態の解析を行い、 ${}^5\text{He}$ におけるそれらの相互作用依存性について議論した。今後は ${}^5\text{He}$ と同様に非束縛核である ${}^{10}\text{Li}$ や ${}^{13}\text{Be}$ についても解析を進めていく。

N - ${}^{12}\text{C}$ および α - ${}^{12}\text{C}$ 散乱における ${}^{12}\text{C}$ 共鳴状態と非共鳴状態の解析

(山田 悠真 (M2), 松本琢磨)

炭素同位体ではクラスター構造が発達し、 α 粒子のガスの状態とみなされる様々な励起共鳴状態の出現が示唆されている。例として ${}^{12}\text{C}$ では Hoyle 状態と呼ばれる、元素合成の過程において重要な役割を担う励起状態が存在する。Hoyle 状態を含む ${}^{12}\text{C}$ の励起状態、特に共鳴状態を解明することは非常に重要であり、これまでに ${}^{12}\text{C}$ の共鳴状態を探る実験は盛んに行われている。ただし、これらの実験により得られたデータには共鳴状態だけでなく、非共鳴状態が含まれるため、共鳴状態だけの情報を精密な解析

から引き出す必要がある。これまで理論的には、主にチャネル結合計算には共鳴状態だけの効果に関して議論され、あまり非共鳴状態の効果に関しては議論されていない。

本研究では、共鳴状態・非共鳴状態両方を計算に取り入れることのできる連続状態離散化チャネル結合法を用いて N - ^{12}C および α - ^{12}C 散乱の解析を行った。CDCC で共鳴状態・非共鳴状態の議論を行うには、あらかじめ離散化された共鳴状態・非共鳴状態を用意する必要がある。そのため、少数多体系の共鳴状態を求める手法として有用な複素スケーリング法を用いることで ^{12}C の共鳴状態・非共鳴状態を得た。本研究では、 α - ^{12}C 散乱断面積の角度分布と、 N - ^{12}C 散乱に関する分解断面積のエネルギー分布を通して ^{12}C の共鳴状態・非共鳴状態が断面積に与える効果について議論した。これらの内容は修士論文にまとめた。

入射核分解効果を含む微視的光学ポテンシャルを用いた ^6He 分解反応解析

(小川 翔也 (M2), 堀ノ内 亮, 豊川将一, 松本琢磨)

不安定核の構造を理解するためには、不安定核を入射核とした原子核反応の精密な解析が求められる。そのためには光学ポテンシャルが必要不可欠であるが、不安定核の場合は現象論的にポテンシャルを決定することが困難であるため、核子間相互作用から導出される微視的光学ポテンシャルの構築について様々な研究が行われてきた。不安定核反応については、反応途中に入射核が分解する効果が重要であり、この効果を含めることができる方法のひとつに Eikonal potential (EP) 模型が挙げられる。この模型は 3 体反応である重陽子散乱においてはその有効性が示されたが、より弱束縛系かつ 4 体以上の反応系において適用できるかは明らかでない。

本研究ではこの模型を不安定核 4 体反応系である ^6He 散乱に適用し、その有効性を検証した。さらに、EP をより理解するために、動的偏極ポテンシャルと分解効果の関係についても分析を行った。また、不安定核の構造をより詳細に調べるために分解反応を通じた共鳴状態の研究も精力的に行われている。そこで、歪曲波 Born 近似と EP を併用することで、EP の分解反応への適用可能性を議論した。これらの内容は修士論文にまとめた。

$^{11}\text{Li}(p, p')$ 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、この共鳴状態を Borromean Feshbach 共鳴と名付けた。さらにこの模型での Coulomb 分解結果について、 $B(E1)$ 遷移のエネルギー分布と実験値を比較し議論した。

現在、この結果をまとめ Progress of Theoretical and Experimental Physics に投稿中である。

本研究は松本氏を中心に推進された。

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 (PD)、宮原昌久 (D3))

QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算によって、量子色力学相図 (QCD 相図) の低密度領域におけるハドロンとクォーク間の遷移はクロスオーバーと呼ばれる連続で滑らかな状態遷移であることが示唆されている。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、物理的な解釈を容易に行え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、ハドロンを自由ガス模型、クォークをグルーオン背景場中におけるクォークの伝搬を記述する独立クォーク模型によって表した。その二つの模型を系の状態因子によって組み合わせ、クォークとハドロンの自由度を同時に扱うハイブリッド模型を構築した。ハイブリッド模型によって格子 QCD 計算における熱力学量を解析し、系の状態因子の温度依存性と化学ポテンシャル依存性についての情報を引き出した。これにより、ハドロンからクォークへと自由度の遷移を直観的に定義することができた。これによって得られた転移温度は、従来の他の研究で多く用いられてきた対称性の回復・非回復から定義される値とは大きく異なることがわかった。また、我々の研究によって得られた QCD 相図から、クォークとハドロン間の自由度の遷移はバリオン数、アイソスピン数、超電荷数の 3 種の物理量の密度依存性が高温で一致するという特徴があることを新たに示した。現状では、この密度依存性の一致に合理的な理由を見つけるには至っておらず、今後の課題である。

本研究は宮原氏を中心に推進されている。

厳密な Z_3 対称性を持つ量子色力学の有限密度領域における格子計格子計算

(河野宏明 [佐賀大学]、管野淳平 (卒業生)、開田丈寛 (D2))

量子色力学 (QCD) は、クォークとグルーオンに働く「強い相互作用」を記述する理論であり、格子 QCD 計算を第一原理計算として様々な研究がなされている。しかし、

化学ポテンシャルが有限値を持つ領域では、「符号問題」のため数値計算が困難となる。これに対し我々は、符号問題が弱くなると期待される、厳密な Z_3 対称性を持つ QCD (Z_3 -QCD) の格子計算を行った。

本年度は、昨年度に零化学ポテンシャル領域で用いた Z_3 -QCD の格子計算プログラムを有限化学ポテンシャル領域に拡張し、格子計算を行った。今回はフレーバー数が 6 の場合の位相クエンチ近似による配位生成を行い、その結果現状問題なく配位生成を行っている。QCD の閉じ込め・非閉じ込め相転移の秩序変数である Polyakov loop の期待値についても、同様である。今後は、再重み付け法による期待値の計算や、クォーク数密度の計算についても行う予定である。

本研究は、佐賀大学の河野氏と開田氏を中心に推進されている。

Gradient flow を用いた純 SU(2) ゲージ理論の熱力学量

(河野宏明 [佐賀大学]、伊藤悦子 [慶應義塾大学, RCNP, 高知大学]、開田丈寛 (D2))

SU(2) ゲージ理論は、SU(3) ゲージ理論である QCD と定性的に非常によく似た性質を持ち、かつ格子計算を行う上で、計算コストは SU(2) ゲージ理論のほうが小さい。よって、新しい解析手法の精査、物理量の定性的な振る舞いを調べるためのトイモデルとして適している。

本研究では、近年発展してきた Gradient flow 法によるスケール設定を、SU(2) 純ゲージ理論に応用し、SU(2) ゲージ理論におけるスケール設定の提案と、これまで用いられてきた Sommer スケールとの比較を行った。また、フロー時間展開法を用いた熱力学量の測定も行い、従来の積分法と比較した。その結果、スケール設定と熱力学量の両者は、従来の手法と矛盾しない結果が得られた。

本研究は、高知大学の伊藤氏と開田氏を中心に推進され、Progress of Theoretical and Experimental Physics 誌に掲載された。

パーシステントホモロジーを用いた格子 QCD 有効模型の相構造の研究

(八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、柏浩司 [福岡工業大学]、高橋純一 [気象庁福岡管区気象台]、管野淳平 (卒業生)、開田丈寛 (D2)、大野晃 (M1))

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

本年度は、試験的な利用として、まず格子 QCD の有効模型に適用し、QCD の閉じ込め・非閉じ込め相転移の解析を行った。ここでは、閉じ込め・非閉じ込め相転移の秩

序変数として用いられる Polyakov loop の位相によって格子空間を分割し、分割されたそれぞれの空間において解析を行った。その結果、各相において特徴的な構造を抽出することができた。今回の試験的な解析では、格子空間上で解析を行ったため、連続極限等の課題が残っている。

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

SU(3) 純ゲージ理論における閉じ込め・非閉じ込め相転移とそれに伴うグルーオン場の構造変化の解析

(河野宏明 [佐賀大学]、菅野淳平 (卒業生)、開田丈寛 (D2)、大野晃 (M1))

量子色力学 (QCD) で記述されるクォーク・グルーオン物質は、温度や密度に応じて様々な相に変化する。ハドロン相 (閉じ込め相) からクォーク・グルーオンプラズマ相 (非閉じ込め相) への相転移はその一例であり、近年それに伴う場のトポロジカルな構造変化が注目されている。この変化には Z_3 対称性の破れが関係していると言われていたが、動的クォークを含む通常の QCD 理論においては厳密な Z_3 対称性の破れは起きない。

そこで我々は厳密な Z_3 対称性の破れが起きる SU(3) 純ゲージ理論を前提に格子計算を行い、場の量で作る構造の変化を調べた。構造解析のためにはパーシステントホモロジーと呼ばれる手法を用いた。これは複雑な構造をトポロジーに着目して解析する方法であり、一見してもわからない隠れた構造を見つけ出すことができると言われている。

まずは Polyakov loop の解析を行った。これは Z_3 対称性の破れを表す秩序変数である。各格子点における Polyakov loop を複素平面上にプロットして、 Z_3 対称性を意識した 3 つのセクターに分割させる。そして、同じセクターに属する空間上の点どうしに対してパーシステントホモロジーを実行した。その結果、閉じ込め相ではどのセクターでも同じ結果になっていたが、非閉じ込め相では一つのセクターだけ異なる結果が得られた。

次は格子上の Plaquette の解析を行った。格子計算で求められる場の量としては最も簡単なゲージ不変量である。様々な解析を行ったが、相転移の前後で明らかな構造変化が見られるものはなかった。

本研究は、大野氏を中心に推進されている。

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、田上真伍 (卒業生)、Jerzy Dudek [Univ. Strasbourg])

変形した原子核の存在は古くから知られているが、その形は多くの場合ラグビーボー

ルのようなプロレート変形型である。同じ有限量子多体系である分子の世界で知られているような正四面体型の変形は原子核では存在しないのだろうか。我々はこの数年、比較的重い原子核で平均場が正四面体型になる可能性を追求してきた。特に、角運動量射影法を用いた理論計算によって、正四面体型変形した原子核に特徴的なスピン・パリティを持つ回転状態の研究を行って来た。これまでは主に正四面体変形の「魔法の数」に対応する偶々核についての計算を行って来たが、このような偶々核に一つの核子が付いた奇核の場合にどのような特徴的なスペクトルが現れるかを調べることも大変興味深い。

本年度はこのようなヴァレンス核子の効果を理論的に調べた。まず、このような奇核のスペクトルを角運動量射影法による微視的手法で計算し、群論で予想される特徴的なスピン・パリティが現れることを確認した。しかしながら、現実的計算では縮退した準位の分離が起こるが、この分離の仕方には規則性が見出された。この縮退準位の分離の規則性を粒子・回転体結合模型を用いた、1次のコリオリ結合の結果として理論的に説明できることを示した。この時、正四面体型回転体の固有値問題を解き、そのコリオリ結合の行列要素がほぼ解析的に表されることを明らかにした。これによって、通常のプロレート変形核の場合のデカップリングパラメータと同様な機構で、最後の一つの核子の占める軌道が分かれば、面倒な角運動量射影計算をしなくても、縮退の分離がどのように起こるかを簡単に精度良く予想できることが分かった。この研究は論文にまとめられ、レフェリーから高い評価を得ることが出来た。

角運動量射影法による超変形回転バンドの研究

(清水良文、牛谷 征貴 (卒業生)、田上真吾 (卒業生))

最近、我々は角運動量射影法を用いて高スピン状態を研究する場合は、色々な角速度で回転させた (クランキングの処方) 複数の平均場状態を重ね合わせることが重要であることを議論した。この異なる角速度状態を重ね合わせて配位混合した角運動量射影法の重要性は、特に巨大変形した超変形回転バンドの研究で明確に現れることが、昨年度の牛谷氏の修士論文で明らかにされた。本年度はこの研究をより明確な形で進展させ、典型的な超変形原子核として知られている ^{152}Dy 核と ^{192}Hg 核についてより詳しい分析を行った。

対相関の効果を取り入れるために粒子数射影後変分によって平均場を計算したが、昨年度は計算時間がかかるために、角運動量射影計算によってスペクトルを求める際には、粒子数射影計算は行わなかった。本年度これを改善して、粒子数射影と角運動量射影を同時に遂行した。その結果、粒子数射影後変分によって求めた平均場を用いて、異なる角速度状態を重ね合わせる配位混合計算を行う場合には、粒子数射影と角運動量射影を同時に遂行することが極めて重要であることが分かった。このために昨年度

の修士論文の結果の一部は修正を要することが明らかになった。特に、このようにして粒子数射影と角運動量射影を同時遂行した結果は、適切な角速度で回転させた平均場近似の結果に極めて近くなることが明らかになった。これによって、これまで良く行われて数々の成功を収めてきた、単純な平均場近似の計算が超変形回転バンドについては正当化されることが分かった。この結果は論文にまとめられ、現在投稿中である。

発表論文

《 原著論文 》

Instanton effects on charmonium states:

Ulugbek Yakhshiev, Hyun Chul Kim, Emiko Hiyama,
Physical Review D.98.114036, **1000**(2018)

Study of various few-body systems using Gaussian expansion method(GEM):

Emiko Hiyama, Masayasu Kamimura,
Frontiers of Physics,13(6),132106 **1000**(2018)

Quark model estimate of hidden-Charm pentaquark resonances:

Emiko Hiyama, Atsushi Hosaka, Makoto Oka, Jean Marc Richard,
Physical Review C.98.045208, **1000**(2018)

Ab ignition calculation of 5H resonant states:

R.Lazauskas, Emiko Hiyama, J.Carbonell,
Physics Letters,791, **1000**(2019) pp.335-341

Three-body structure of $9\ \Lambda\ \text{Be}$ with $\alpha\ \alpha$ cluster model:

Jehee Lee, Qian Wu, Yasuro Funaki, hongshi Zong, Emiko Hiyama,
Few-body systems **1000**(2019)

Structure of $S=-2$ hypernuclei and Hyperon-Hyperon Interaction:

Emiko Hiyama, Kazuma Nakazawa,
Annual Review of Nuclear and Particle Science,68, **1000**(2018)pp.131-159

Analysis of nucleon and triton emissions from nucleon- ${}^7\text{Li}$ collisions below 20 MeV:
Hairui Guo, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Kohei Nagaoka, Kazuyuki
Ogata, and Masanobu Yahiro,
Physical Review C **99** (2019) pp. 0646002-1–10.

Thermodynamics for pure SU(2) gauge theory using gradient flow:
Takehiro Hirakida, Etsuko Itou and Hiroaki Kouno,
Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 3, March 2019,
033B01

First order Coriolis-coupling for rotational spectrum of a tetrahedrally-deformed core
plus one-particle system:
S. Tagami, Y. R. Shimizu and J. Dudek, Physical Review C **98**, 024304-1-17 (2018).

Spectroscopy of a tetrahedral doubly magic candidate nucleus ${}^{160}_{70}\text{Yb}_{90}$: Search for atyp-
ical excitation patterns:
A. Saha, T. Bhattacharjee, D. Curien, J. Dudek, I. Dedes, K. Mazurek, A. Gozdz,
S. Tagami, Y. R. Shimizu, S. Banerjee, S. Rajbanshi, A. Bisoi, G. de Angelis, S. Bhat-
tacharya, S. Bhattacharyya, S. Biswas, A. Chakraborty, S. Das Gupta, B. Dey, A. Gos-
wami, D. Mondal, D. Pandit, R. Palit, T. Roy, R. Singh, M. Saha Sarkar, S. Saha, and
J. Sethi, Journal Physics G **46**, 055102-1-36 (2019).

《Proceedings》

Thermodynamics for SU(2) pure gauge theory using gradient flow:
Takehiro Hirakida, Etsuko Itou and Hiroaki Kouno,
36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018), 22-28 July 2018,
East Lansing, MI, United States

講演

《海外での講演》

Gaussian Expansion method and its application to resonant states hadron physics:
Emiko Hiyama,

Multiparticle resonances in hadrons, nuclei and ultracold gases

Calculation of NN Ξ and NNN Ξ systems:

Emiko Hiyama,

The 13th International Conference on Hypernuclear and strange particle Physics

Structure of light p-shell Ξ hypernuclei:

Emiko Hiyama,

The 13th International Conference on Hypernuclear and strange particle Physics

Recent progress of few-body problems in Physics:

Emiko Hiyama,

International Conference on Simplicity, Symmetry and Beauty of Atomic Nuclei

Recent progress of hypernuclear physics:

Emiko Hiyama,

APS-JPS joint meeting

Future Prospect in hypernuclear physics using HIAF:

Emiko Hiyama,

international workshop on "HIAF High-Energy Beam Line Physics and Nuclear Astrophysics"

Structure of light s-shell Ξ hypernuclei:

Emiko Hiyama,

57th International Winter meeting on Nuclear physics

Five-body structure of pentaquark:

Emiko Hiyama,

Korea-Japan joint workshop on the present and future in Hadron Physics at J-PARC

Microscopic analysis based on g-matrix folding model for reactions involving unstable nuclei:

S. Ogawa, R. Horinouchi, M. Toyokawa, T. Matsumoto

The Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, October

23, Hilton Waikoloa Village, Hawaii island

Thermodynamics for SU(2) pure gauge theory using gradient flow:

Takehiro Hirakida, Etsuko Itou, and Hiroaki Kouno

The 36th International Symposium on Lattice Field Theory 2018, July 22-28, Michigan, USA

Analysis of the deconfinement transition using persistent homology:

Takehiro Hirakida, Kouji Kashiwa, Junpei Sugano, Junichi Takahashi, Hiroaki Kouno, and Masanobu Yahiro

5th Joing Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan 2018, October 23-27

以下、ポスター発表.

《 国内での講演 》

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

松本琢磨, 田中純貴, 緒方一介

10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018), 2018年6月8日, くにびきメッセ

分解効果を含む微視的核-核間相互作用の性質と応用:

小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨

三者若手夏の学校, 2018年8月6日, 白子温泉 ホテル ニュー・カネイ

^{12}C 散乱における ^{12}C の共鳴状態の研究:

山田悠真, 松本琢磨

Threshold Rule 50, 2018年10月4日, 京都大学

$^{11}\text{Li}(p, p')$ 反応解析による ^{11}Li 共鳴状態の研究:

松本琢磨, 田中純貴, 緒方一介

Threshold Rule 50, 2018年10月4日, 京都大学

入射核分解効果を含む微視的光学ポテンシャルの構築:

小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨
理研-九大 ワークショップ, 2018年11月21日, 理化学研究所 神戸キャンパス

複素スケーリング法による S 行列の極と連続準位密度の関係:
青木宏平, 小川翔也, 松本琢磨
第 124 回日本物理学会九州支部例会, 2018年12月8日, 大分大学

量子散乱における仮想状態と共鳴状態の探索:
徳永航, 山田悠真, 松本琢磨
第 124 回日本物理学会九州支部例会, 2018年12月8日, 大分大学

入射核分解効果を考慮した微視的光学ポテンシャルの ${}^6\text{He}$ 入射反応への応用:
小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨
第 124 回日本物理学会九州支部例会, 2018年12月8日, 大分大学

${}^{12}\text{C}$ 散乱における ${}^{12}\text{C}$ の共鳴状態の解析:
山田悠真, 松本琢磨
第 124 回日本物理学会九州支部例会, 2018年12月8日, 大分大学

${}^6\text{He}$ 分解反応における微視的光学ポテンシャルとその応用:
小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨
第 74 回日本物理学会年次大会, 2019年3月14日, 九州大学

${}^{12}\text{C}$ 共鳴・非共鳴を含む微視的反応解析:
山田悠真, 松本琢磨
第 74 回日本物理学会年次大会, 2019年3月16日, 九州大学

Thermodynamics for $\text{SU}(2)$ gauge theory using gradient flow:
Takehiro Hirakida, Etsuko Itou, and Hiroaki Kouno
New Frontiers in QCD, 2018年6月5日, 京都大学 (京都府)

パーシステントホモロジーによる Polyakov loop 分布の解析:
開田丈寛, 柏浩司, 河野宏明, 菅野淳平, 高橋純一, 八尋正信
原子核三者若手夏の学校, 2018年8月10日, ホテルニューカネイ (千葉県)

パーシステントホモロジーによる Polyakov loop 分布の解析:

開田丈寛, 柏浩司, 河野宏明, 管野淳平, 高橋純一, 八尋正信
日本物理学会秋季大会, 2018 年 9 月 14 日, 信州大学 (長野県)

閉じ込め・非閉じ込め相に対する persistent homology 解析:

Takehiro Hirakida, Kouji Kashiwa, Junpei Sugano, Junichi Takahashi, Hiroaki Kouno,
Masanobu Yahiro

理研-九大 ワークショップ, 2018 年 11 月 21 日, 理化学研究所 神戸キャンパス

Exact Z_3 symmetry and sign problem in QCD:

Takehiro Hirakida, Junpei Sugano, Junichi Takahashi, Hiroaki Kouno, and Masanobu
Yahiro

Development of simulation by GPU for the study of quark-hadron matter at high
temperature and densities, 2018 年 11 月 22 日, RCNP (大阪府)

Persistent homology を用いた閉じ込め相と非閉じ込め相の解析

開田丈寛, 柏浩司, 管野淳平, 高橋純一, 河野宏明, 八尋正信
第 124 回 日本物理学会九州支部例会, 2018 年 12 月 8 日, 大分大学 (大分県)

純ゲージ理論における Polyakov loop のパーシステントホモロジー解析:

大野晃, 開田丈寛, 管野淳平, 柏浩司, 河野宏明
第 124 回 日本物理学会九州支部例会, 2018 年 12 月 8 日, 大分大学 (大分県)

純 SU(3) ゲージにおける persistent homology 解析:

開田丈寛, 大野晃, 管野淳平, 高橋純一, 柏浩司, 河野宏明, 八尋正信
日本物理学会年次大会, 2019 年 3 月 15 日

以下、ポスター発表.

Microscopic optical potentials for nucleus-nucleus scattering based on the Glauber
model:

小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨

10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018),
2018 年 6 月 4 日, くにびきメッセ

Microscopic analysis of elastic scattering based on chiral g matrix:

豊川将一, 松本琢磨, 八尋正信, 河野通郎

10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018),
2018年6月4日, くにびきメッセ

Microscopic optical potentials including the breakup effects for unstable nucleus scattering:

小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨

The 17th CNS International Summer School, 2018年8月25日, 理化学研究所

The study of resonant states in ^{12}C via $^{12}\text{C}+\text{nucleon}$ scattering:

山田悠真, 松本琢磨

The 17th CNS International Summer School, 2018年8月25日, 理化学研究所

Persistent Homology による閉じ込め・非閉じ込め相の解析:

開田丈寛, 柏浩司, 河野宏明, 管野淳平, 高橋純一, 八尋正信

熱場の量子論とその応用, 2018年8月29日, RIKEN 大河内記念ホール (埼玉県)

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 B(一般)

ダブルストレンジネス核の精密構造研究とその相互作用の決定

研究代表者：肥山詠美子

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究 (研究領域提案型)

第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構

研究代表者：肥山詠美子

文科省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

分解反応精密解析による原子核存在限界近傍での新奇な共鳴状態の解明

研究代表者: 松本琢磨

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

国立研究開発法人理化学研究所との共同研究

開田丈寛、平成 30 年度 九州大学基金支援助成事業 (国際会議等参加等支援)

小川翔也、平成 30 年度 九州大学基金支援助成事業 (国際会議等参加等支援)

学部 4 年生卒業研究

(肥山詠美子、井上正悟、金龍熙、宮本良祐、山本拓実):

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

修士論文

小川翔也: (指導教員, 松本琢磨・肥山詠美子): 入射核分解効果を含む微視的光学ポテンシャルを用いた ${}^6\text{He}$ 分解反応解析

山田悠真: (指導教員, 松本琢磨・肥山詠美子): N - ${}^{12}\text{C}$ および α - ${}^{12}\text{C}$ 散乱における ${}^{12}\text{C}$ 共鳴状態と非共鳴状態の解析

博士論文

宮原昌久:(肥山詠美子):Approach to QCD phase diagram and quark-hadron transition by a crossover model(クロスオーバー模型によるクォーク・ハドロン転移と QCD 相図へのアプローチ)

学外での学会活動

肥山詠美子: XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics プログラム委員

International workshop: "Clusters in quantum systems: from atoms to nuclei and hadrons" organizer

日本物理学会 第 74 回年次大会実行委員会

International Nuclear Physics Conference 2019 国際アドバイザー委員

松本琢磨: 10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018) organizer

Tsukuba-CCS workshop on "microscopic theories of nuclear structure and dynamics" organizer

理化学研究所 仁科加速器センター UEC 委員

理化学研究所 仁科加速器センター理論推進会議委員

その他の活動と成果

開田丈寛: 2018年原子核三者若手夏の学校, 原子核パート世話人

宇宙物理理論

研究室構成員

橋本正章 教授

町田真美 助教

松尾康秀 技術職員

《 大学院 博士課程 》

大村匠 酒見はる香

《 大学院 修士課程 》

山田龍王 小野宏次朗 多良淳一 土肥明

《 学部 卒業研究生 》

大前陸人 貞安優太 田島裕太

《 訪問研究者 》

中村理央

担当授業

一般相対論 (橋本正章), 宇宙物理学 (橋本正章), 基幹物理学 IB(橋本正章), 物理ゼミナール (橋本正章), 電磁気学 I・同演習 (町田真美)、物理学基礎演習 (町田真美)

研究・教育目標と成果

宇宙初期における非一様ビッグバン元素合成と観測からの制約 (中村理央, 橋本正章)
ビッグバン元素合成 (以下 BBN) とは、初期宇宙における軽元素 (ここでは重水素、He-4, Li-7 の 3 つを指している) の生成プロセスである。標準的な BBN のシナリオは、一様な密度分布のもとで構築されている。本研究では、非一様な密度分布のもとでの元素合成計算を行っている。これまで行ってきた研究内容は、以下の 2 つである。非一様 BBN モデルで、軽元素の観測値を説明可能かどうか。Li-7 より重い元素はどの程度生成されるか。については、本モデルのパラメータとして高密度・低密度領域の密度比及び高密度領域の体積比を導入し、He-4 と重水素の観測から、パラメータに対して制限を与えた (なぜ Li-7 が無いかについては後述)。その手法として、O-16 までを含んだコードで高密度・低密度の両領域における元素合成計算を行い、生成された元素の平均値と観測値を比較している。結果として、密度が標準的な BBN よりも 6 桁ほど高密

度領域が存在しても、観測と矛盾しないことがわかった。で得られたパラメータ領域の範囲内で、生成される重元素を調査した。Am までの 4463 核種まで拡張したコードを用いて元素合成計算を行った結果、Ni-56, Co-57 などの元素が生成可能で、太陽系組成の観測よりも過剰に生成される場合があることがわかった。で観測との比較で Li-7 を考慮に入れていなかった理由が「リチウム-7問題」である。近年の観測から、Li-7 だけが理論予測値と観測値が一致していない。そこで、BBN に関する研究では He-4 と重水素の観測値を用いるということも結構ある。本研究では、Li-7 の観測も含めた解析を行い、3つの軽元素の観測値を説明可能なパラメータ領域を得るには得ているが、それはかなり高めの観測値を採用した場合である。よって、今後はモデルの改良を行う予定である。

X線バーストコードの状態方程式の更新 (橋本正章, 松尾康秀, 山田龍王, 土肥明)

X線バーストは中性子星を主星とするX線連星系で起こる急激なX線増光現象である。X線連星系では伴星から降着円盤を通して中性子星表面に物質が降着する。この降着物質の不安定核燃焼によりX線バーストが引き起こされると考えられている。今年度は、本研究室で従来から用いられていたX線バーストコードの状態方程式(EOS)をBPS EOSからLS EOS(Latimmer & Swesty 1991)に変更することを試みた。BPS EOSでの中性子星の限界質量は $1.41 M_{\odot}$ であり、これは近年の $2 M_{\odot}$ を超える中性子星の観測と矛盾するためである。一方、LS EOSは核密度での非圧縮率が180, 220, 375 MeVとした3つのEOSが公開されており、それぞれのEOSでの中性子星の限界質量は $1.85 M_{\odot}$, $2.06 M_{\odot}$, $2.73 M_{\odot}$ である。従って、非圧縮率が220, 375 MeVのLS EOSは $2 M_{\odot}$ を超えるため、よりもっともらしいモデルが得られる。その結果、3つのLS EOS全てでX線バーストの計算が可能となった。(中性子星の質量はそれぞれ $1.5 M_{\odot}$ 付近で計算が可能であることを確認した)。これにより限界質量が $2 M_{\odot}$ を超えるEOSでのX線バーストシミュレーションを行うことができる。また本年度と同様の変更を行うことで、さらに別のEOSでの計算もできることが期待される。今後はclocked bursterと呼ばれるGS1826-24の観測を再現するシミュレーションを行い、モデルの妥当性を検証する必要がある。

エキゾチックな中性子星冷却プロセスの存在可能性 (橋本正章, 土肥明)

中性子星は超新星爆発の残骸として形成される高密度天体であるが、誕生後はニュートリノの散逸により基本的に冷えてゆく。従って、ニュートリノの散逸が中性子星の熱的進化を決定づけるが、ニュートリノの放射率が、不定性の大きい中性子星内部の状態方程式(EOS)に依存するので現実的な中性子星内部のEOSの開発が求められている。今回、そのようなEOSとして、現実的核力ポテンシャルにより有限温度下で構

築された Togashi EOS (Togashi et al. 2017) を用いた。この EOS は観測されている中性子星の最大質量を支え、重力波 GW170817 による半径の制限も満たす。そのような観測的に無矛盾な Togashi EOS で中性子星の冷却シミュレーションを行った。その結果、Togashi EOS では中性子星が急激な冷却を起こさず、表面温度が低い単独中性子星の観測値を再現できないことがわかった。これは Togashi EOS の陽子組成比、或いは対称エネルギーが小さいことに由来している。このため、Togashi EOS で単独中性子星の表面温度の観測値を再現するためには何らかのエキゾチック粒子による冷却機構を導入する必要があることがわかった。これは、中性子星の内部にエキゾチックな粒子が存在することを示唆している。今後は、様々なエキゾチック粒子を加味した Togashi EOS での中性子星冷却計算を行う予定である。と同時に、単独中性子星のみならず、より多く観測されている連星系内の中性子星 (X線トランジェント) の光度曲線、元素生成量に関する観測との整合性についてもこれから調べていく。

中性子星の内部構造を考慮した X 線バーストシミュレーション (橋本正章, 松尾康秀, 山田龍王)

低質量 X 線連星を構成する中性子星では、熱核 X 線バーストと呼ばれる急激な X 線増光現象が見られる。これは、低質量星から降着円盤を通して中性子星に降った物質が、ある閾値を超えた段階で核燃焼を起こすことによる現象と考えられている。近年は中性子星表面のみを考慮することで、multi-zone モデルによる詳細なバーストのシミュレーションが行われているが、内部の構造を解かないことがバーストにどの程度影響は及ぼすかは分かっていない。本研究では、反応に関わる全核種を考慮した近似しない核反応ネットワーク (Full Nuclear Reaction Network; FNRN) でのバーストの振る舞いを再現するように構築した近似核反応ネットワーク (Approximation Network; APRX) を multi-zone モデルの恒星進化計算コードに実装することで、中性子星の内部構造がバーストに与える影響を解析した。その結果、中性子星の半径と質量にバーストのプロファイルは大きく依存すること、multi-zone においても、近似核反応ネットワークで、大規模核反応ネットワークを用いた先行研究と同程度にバーストの光度曲線を再現すること、不定性の大きい過程の反応率を変えることで光度曲線の減衰部も観測結果を再現できることが分かった。今後は、exotic cooling など現在コードに組み込んでいない物理過程を考慮することで、光度曲線以外のバーストパラメータも説明出来るモデルを作ることが必要である。

銀河のバーポテンシャル効果の検証と観測的可視化 (町田真美)

天の川銀河を含む渦状銀河は、密度渦状腕に沿うように磁気渦状腕をもち、その大きさはおよそマイクロ G 程度であることがわかっている。銀河磁場は、そのままの状

態では、数億年で散逸してしまうが、数十億年維持されていることから、磁場を生成・維持するダイナモ機構が働いていること指摘されている。そこで我々は、銀河ガス円盤全体を計算領域に含む3次元磁気流体シミュレーションを行った。銀河のバーポテンシャルは、バルジポテンシャルに10%の揺らぎを加えて近似している。その結果、バーによるトルクによって、軸対称の場合よりも早い質量降着と磁場増幅が生じることがわかった。更に、数値計算結果を用いて、特に電波帯でどのように観測されるかを導出した。その結果、メートル波帯では、希薄なハロー磁場を観測できる可能性があることを示した。

磁気回転不安定性の飽和値と数値計算解像度の依存性の解明 (町田真美)

ブラックホールの活動性は、中心天体の周りを差動回転しながらプラズマガス(降着円盤)が落下する際に解放する磁気エネルギーが起源となっている。プラズマが中心に落ち込むためには、その角運動量を外向きに輸送する必要がある。その起源は、降着円盤内で生じる磁気乱流であると考えられている。磁気乱流の生成は、プラズマに少量の磁場があり、内側が速い差動回転しているときに成長する磁気回転不安定性が起源である。円盤の一部を取り出して高解像度で降着円盤を分解し磁気回転不安定性の成長を調べる局所的な数値実験は、1990年代半ばより行われているが、数値計算結果が計算の解像度に依存することがしてきされている。一方、円盤全体を計算領域に含む大局的な数値計算は、重力による物理的なスケールを定義できるため解像度依存性は小さいと考えられてきた。しかし、2010年代に入り、大局的な計算であっても、局所的な計算同様に計算の分解能に結果が依存することが指摘されている。本研究では、スーパーコンピュータ「京」を用いた高解像度の降着円盤数値計算を行い、分解能依存性について調査している。その結果、高空間分解な数値計算結果では、早い質量降着が生じるけれども最終的な準定常状態では、逆に磁気エネルギーが小さくなることを見出した。

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

(橋本正章, 町田真美, 小野宏次朗)

X 線連星 SS433 は電波星雲 W50 の中心部に位置しており、光速の約 26% の準相対論的速度で東西方向に伝播するジェットを持っている。W50 は中心部にシェル構造、その両端には東西に伸びるローブ構造を持っており、SS433 から噴出する螺旋ジェットの軸とローブの軸が重なっていることが観測により報告されている。従って、W50 は母体となる超新星残骸がジェットによって引き伸ばされることで形成されたと考えられている。この W50/SS433 系の構造の再現を目指した流体計算は、超新星残骸 (SNR) とジェットを組み合わせたモデルが主流である (例: Zavala et al. 2008, Goodall et al.

2011)。SS433 のジェットや W50 東端領域における偏波解析により、磁場強度の下限が数マイクロガウスであることが示唆されている。従って、磁場を考慮したシミュレーションが必要であるが、先行研究では成されていない。

そこで我々は MHD シミュレーションに基づき、2次元円筒座標系において SNR とジェットの共進化計算を行った。その結果、ジェットのバックフローが SNR を押し出し、高密度なシェル構造を形成することを追試した。また観測量であるシンクロトロン放射強度を計算した結果、ジェット先端領域でホットスポットを形成することが分かった。今後は、超新星爆発やジェットに注入するエネルギー、磁場の強さについて詳細なパラメータサーベイを行う。その後、シンクロトロン放射強度マップと電波観測の結果と比較することによりモデルの妥当性について検証する。

SS433 の X 線解析 (橋本正章, 町田真美, 多良淳一)

SS433 は銀河系内にあり、ジェットの構造がよく観測できる天体である。宇宙ジェットは、コンパクト星からプラズマガスが細く絞られて双方向に吹き出す天体現象である。しかし、中心のコンパクト天体がブラックホールなのか、中性子星なのかということはまだ議論の余地がある。SS433 のジェットでは過剰なニッケルが観測されており、このニッケルの存在度によってコンパクト天体が中性子星と示唆されるかもしれない。一方で、質量の推定からはブラックホールであるとも言われている。また、SS433 は ULX の可能性も指摘されている。ULX は恒星質量のブラックホールと超臨界降着流か、中間質量ブラックホールへの質量降着と考えられており、SS433 が超臨界降着流を持つ可能性はある。SS433 からの X 線は主に熱的制動放射と輝線であり、これはジェットによるものと考えられている。今後は、SS433 をチャンドラで観測したデータを解析する予定である。

ファラードモグラフィによる SS433 ジェット先端領域の磁場構造解析 (橋本正章, 町田真美, 酒見はる香)

宇宙ジェットは高密度天体からプラズマガスが細く絞られて噴出する天体現象であり、宇宙・銀河進化の解明の鍵を握る天体として注目され、活発に研究されてきた。ジェットの駆動・加速・形成機構は天文学における最大の謎の 1 つであるが、ジェットに付随する磁場がこれらの機構において重要な役割を果たしているとの示唆が理論研究から得られている。そこで観測的研究によるジェット磁場構造の解明が求められる。我々は、天の川銀河系内に存在する X 線連星 SS433 から噴出するジェットに着目し、電波観測データを用いて磁場構造解析を行っている。2018 年度の目標は、Australia Telescope Compact Array により観測された 1.3 - 3.0 GHz の電波連続波観測データを用いてファラードモグラフィ解析を実行し、SS433 ジェット先端領域固有の偏波情報を得るこ

とであった。最終的には、SS433 ジェットと観測者の間に存在する前景や、無関係な偏波源の情報を特定し、SS433 の偏波情報を抽出することに成功した。今後の課題としては、観測データの空間分解能の低さ・観測周波数帯域の制限のために未だ縮退している無関係な偏波情報をより厳密に分離することが挙げられる。そこで我々は、2018 年に Very Large Array を用いて SS433 ジェット先端領域の 2.0 - 8.0 GHz における高空間分解観測を行なった。2019 年度は、我々が新たに得た観測データと、2017 年に行われた 1.0 - 2.0 GHz 観測のデータの較正作業を行う。その後、ファラデートモグラフィーを含む磁場構造解析を行い、SS433 ジェット先端磁場構造をこれまでにないほど詳細に明らかにする計画である。最終的には、ジェット先端磁場の 3 次元構造を解明することを目指す。

2 温度磁気流体数値実験による準相対論的ジェット伝搬数値実験 (橋本正章, 町田真美, 大村匠)

コンパクト天体の莫大な重力エネルギーを駆動源に噴出する宇宙ジェットは、中心天体の数百万倍スケールに渡って伝搬する。ジェットは、周辺の物質と相互作用することで環境を一変させるため、銀河や宇宙の大規模構造形成を論じる上で極めて重要な天体現象の一つである。そのため、ジェットと周辺環境との相互作用の影響を調査すべく数多くのジェット伝搬数値実験が行われてきた。しかしながら、プラズマの 2 温度性に着目した数値的研究は、これまで行われていない。そこで、我々は、準相対論的ジェットと周辺物質との相互作用に関する 2 温度磁気流体数値実験を行った。その結果、ジェットは、電子とイオンの粘性加熱率の違いのため、ビーム内部で生じる多数のダイヤモンド衝撃波や先端衝撃波で生じる散逸によって、電子とイオンの温度乖離が生じるを明らかとした。また、衝撃波によって熱化されたガスがビームを包むように形成されるコクーンでは、電子温度はイオン温度の 1 桁小さくなることがわかった。加えて、衝撃波における電子とイオンの粘性加熱比を衝撃波理論研究から決定するモデルリングを行い、数値計算コードに導入した。今後は、活動銀河中心核ジェットが銀河団環境に及ぼす影響について調査する。そのために、観測結果をもとにした銀河団環境の再現や輻射冷却、熱伝導及び特殊相対論といった不足している物理を取り入れる必要がある。

発表論文

《 原著論文 》

Quiescent luminosities of accreting neutron stars-possibility of neutrino losses due to strong pion condensations, Yasuhide Matsuo, HeLei Liu, Masa-aki Hashimoto and

Tsuneo Noda, International Journal of Modern Physics E, Vol. 27, No. 8 (2018) 1850067 (14 pages) World Scientific Publishing Company

Short-Lived Radioisotope ^{98}Tc Synthesized by the Supernova Neutrino Process, Takehito Hayakawa, Heamin Ko, Myung-Ki Cheoun, Motohiko Kusakabe, Toshitaka Kajino, Mark D. Usang, Satoshi Chiba, Ko Nakamura, Alexey Tolstov, Ken'ichi Nomoto, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Toshihiko Kawano, and Grant J. Mathews, Published 4 September 2018

Supernova Neutrino Process of Li and B Revisited, Motohiko Kusakabe, Myung-Ki Cheoun, K. S. Kim, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Ken'ichi Nomoto, Toshio Suzuki, Toshitaka Kajino, Grant J. Mathews, *Astrophys. J.* 872 (2019) 164

2D MHD Simulations of the State Transitions of X-Ray Binaries Taking into Account Thermal: Conduction, 1. Nakamura K. E., Machida M., Matsumoto R., *Galaxies*, vol.7(1), id.22 (2019)

Faraday Depolarization Effects in Spiral Galaxies, Machida M., Akahori T., Nakamura K. E., Nakanishi H., Haverkorn M., *Galaxies* vol.7(1), id.15. (2019)

Radio broad-band visualization of global three-dimensional magnetohydrodynamical simulations of spiral galaxies - II. Faraday depolarization from 100 MHz to 10 GHz, Machida M., Akahori T., Nakamura K. E., Nakanishi H., Haverkorn M., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 482, Issue 3, p.3394-3402 (2019)

Radio broadband visualization of global three-dimensional magnetohydrodynamical simulations of spiral galaxies - I. Faraday rotation at 8 GHz, Machida M., Akahori T., Nakamura K. E., Nakanishi H., Haverkorn M., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 480, Issue 1, p.17-25 (2018)

Magnetic activity in the Galactic Centre region - fast downflows along rising magnetic loops, Kakiuchi K., Suzuki T. K., Fukui Y., Torii K., Enokiya R., Machida M., Matsumoto R. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 476, Issue 4, p.5629-5638 (2018)

Faraday Tomography of the SS433 Jet Termination Region: H. Sakemi, M. Machida, T. Ohmura, S. Ideguchi, Y. Miyashita, K. Takahashi, T. Akahori, H. Akamatsu, H. Nakanishi, K. Kurahara, J.S. Farnes, *Galaxies*, 2018, Vol. 6, Issue 4, p. 137

Two-Temperature Magnetohydrodynamics Simulations of Propagation of Semi-Relativistic Jets: Takumi Ohmura, Mami Machida, Kenji Nakamura, Yuta Asahina, Yuki Kudoh, Ryoji Matsumoto, *Galaxies*, 2019, Vol. 7, Issue 7, p. 14

《その他の論文》

Workshop Summary "The Power of Faraday Tomography": Haverkorn, M., Machida M., Akahori T., *Galaxies* 2019, 7(1), 26

磁気回転不安定性によるブラックホール降着流の角運動量輸送機構の解明：町田真美、川島朋尚、工藤祐己、*スーパーコンピューティングニュース*、vol20, Special Issue 2, p.35-41 (2018)

二温度磁気流体計算によるジェット構造解析：大村匠、町田真美、*スーパーコンピューティングニュース*、2018年5月、p.47-53

講演

《海外での講演》

Global MHD simulations of accretion disks using CANS+ : 町田真美、川島朋尚、工藤祐己、松元亮治、Time for accretion, Sigtuna, 2018年8月6日-10日

The possibility of an interaction between the interstellar medium and the radio nebula W50: H. Sakemi, M. Machida, K. Tachihara, H. Yamamoto, H. Nakanishi, K. Kurahara, T. Akahori, H. Akamatsu, J.S. Farnes, TIME FOR ACCRETION, Sigtuna, Sweden, August 6-10, 2018

Magnetic Field Analysis of the SS433 Jet Terminal Region: H. Sakemi, Radboud 大学にてセミナー発表, Nijmegen, the Netherlands, September 25, 2018

Propagation and Structure of Astrophysical Jets by Two-temperature Magnetohydro-

dynamics: Takumi Ohmura, Mami Machida, Kenji Nakamura, Yuki Kudoh, Yuta Asahina, Ryoji Matsumoto, TIME FOR ACCRETION, Sigtuna, Sweden, August 6-10, 2018

Neutron Stars cooling and the dependence on equation of state (EoS): A. Dohi, M. Hashimoto, M. Matsuo, K. Nakazato, T. Noda, and R. Yamada, The workshop on "HIAF High-Energy Beam Line Physics and Nuclear Astrophysics, Beihang University, December 13-15, 2018

《国内での講演》

Radio wavelength visualization of spiral galaxies obtained from numerical simulation : 町田真美、赤堀卓也、中村賢仁、中西裕之、Haverkorn Marijke, Dynamics and physics of outflows in protostellar disks and AGN, Kagoshima, 2019年1月13日-14日

Faraday depolarization effects of the spiral galaxies: Machida M., Akahori T., Nakamura K. E., Nakanishi H. Haverkorn M., The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of the Cosmic Magnetic Fields held at Miyazaki, 2018年5月28日-6月2日

磁気回転不安定性の飽和値の解像度依存性 II: 町田真美、川島朋尚、工藤祐己、松元洋介、松元亮治、日本天文学会 2019年春季年会、法政大学、2019年3月14日-17日

X線連星のスペクトル状態遷移に関する熱伝導を考慮した2次元数値実験 II : 中村賢仁、金子岳史、町田真美、横山央明、松元亮治、日本天文学会 2018年秋季年会、兵庫県立大学、2018年9月19日-21日

降着円盤におけるMRIの方位角方向解像度依存性 2 : 質量降着率への影響 : 町田真美、川島朋尚、工藤祐己、大村匠、松元洋介、松元亮治、日本天文学会 2018年秋季年会、兵庫県立大学 2018年9月19日-21日

Neutron Stars Cooling of Shen & Togashi EoS: 土肥 明、橋本正章、中里健一郎、松尾康秀、野田常雄、第7回観測的宇宙論ワークショップ、山口大学、2018年11月

中性子星の冷却とその状態方程式依存性: 土肥 明、橋本正章、松尾康秀、中里健一郎、野田常雄、物理学会九州支部例会、大分大学、2018年12月

中性子星の冷却とその状態方程式の依存性: 土肥 明、橋本正章、松尾康秀、中里健一郎、野田常雄、中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ、京都大学、2019年2月

中性子星の冷却とその状態方程式の依存性: 土肥 明、橋本正章、松尾康秀、中里健一郎、野田常雄、日本物理学会 第74回年次大会、九州大学、2019年3月

Radio-band visualization of the MHD simulations for the Astrophysical Jet, K. Ono, T. Ohmura, M. Machida, H. Sakemi, Y. Asahina, AAPPs-DPP2018, The Kanazawa Chamber of Commerce and Industry & Ishikawa Prefectural Bunkyo Hall, November 12-17, 2018

W50/SS433 の構造形成に関する磁気流体計算: 小野宏次朗、大村匠、町田真美、酒見はる香、朝比奈雄太、ブラックホール降着流ミニワークショップ、千葉大学西千葉キャンパス、2019年2月28-3月1日

W50/SS433 の構造形成に関する磁気流体計算: 小野宏次朗、大村匠、町田真美、酒見はる香、朝比奈雄太、日本天文学会 2019年春季年会、法政大学小金井キャンパス、2019年3月14-17日

Astronomy Letters, 2018 Vol.44 No.6 (2018) の論文紹介: 多良 淳一, 第48回天文・天体物理若手夏の学校 ロワジールホテル豊橋、2018年7月22-25日

SS433 のウィンドにおける ニッケル過剰の上限 Medvedev et al.(2018) と超臨界降着流の解析: 多良 淳一, 2018年九重合宿、九州地区九重共同研修所、2018年9月8-10日

Faraday Tomography of the SS433 Jet Terminal Region: H. Sakemi, M. Machida, T. Akahori, H. Nakanishi, H. Akamatsu, K. Takahashi, Y. Miyashita, S. Ideguchi, K. Kurahara, J.S. Farnes, The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of Cosmic Magnetic Fields, Miyazaki, Japan, May 28-June 2, 2018

電波観測による SS433 ジェットターミナルショックの進行速度解析: 酒見はる香, 町田真美, James O. Chiebueze, 赤堀卓也, 中西裕之, 赤松弘規, 藏原昂平, Jamie Farnes, ブラックホール降着流ミニワークショップ 2019, 千葉大学, 2019年2月28日 - 3月1日

SS433 ジェット先端領域のファラデートモグラフィ解析: 酒見はる香, 町田真美, 大村匠, 出口真輔, 宮下恭光, 高橋慶太郎, 赤堀卓也, 赤松弘規, 中西裕之, 藏原昂平, Jamie Farnes, 日本天文学会 2019 年春季年会, 法政大学, 2019 年 3 月 14 日- 3 月 17 日

Magnetic field analysis of the SS433 jet termination region using multi-frequency dataset: H. Sakemi, M. Machida, T. Ohmura, T. Akahori, H. Akamatsu, H. Nakanishi, K. Kurahara, S. Ideguchi, Y. Miyashita, K. Takahashi, J.S. Farnes, Polarimetry in the ALMA era, Tokyo, Japan, March 26-29, 2018

Propagation and Structure of Astrophysical Jets by Two-temperature Magnetohydrodynamics: T. Ohmura, M. Machida, K.E. Nakamura, Y. Asahina, Y. Kudoh, and R. Matsumoto, The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of Cosmic Magnetic Fields, Miyazaki, Japan, May 28-June 2, 2018

MHD simulations of astrophysical jets including electron energy time evolution: T. Ohmura, M. Machida, K.E. Nakamura, Y. Asahina, Y. Kudoh, and R. Matsumoto, AAPPS-DPP2018, The Kanazawa Chamber of Commerce and Industry & Ishikawa Prefectural Bunkyo Hall, November 12-17, 2018

宇宙ジェットに適した二温度磁気流体計算コード開発: 衝撃波加熱の分配: 大村匠、町田真美、中村賢仁、工藤祐己、松元亮治、日本天文学会 2019 年春季年会, 法政大学, 2019 年 3 月 14 日- 3 月 17 日

背景磁場を取り入れたジェット伝搬数値実験: 大村匠、町田真美、中村賢仁、工藤祐己、松元亮治、日本天文学会 2018 年秋季年会, 兵庫県立大学, 2019 年 9 月 19 日- 9 月 21 日

宇宙ジェットの輻射機構解明を目指す二温度磁気流体数値実験: 大村匠、町田真美、中村賢仁、工藤祐己、松元亮治 ブラックホール降着流ミニワークショップ 2019, 千葉大学, 2019 年 2 月 28 日 - 3 月 1 日

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 B(一般)

「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」
研究分担者：町田真美

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

自然科学研究機構国立天文台、平成 30 年度国立天文台研究集会助成

”The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of the Cosmic Magnetic Fields”

研究代表者：町田真美

宇宙ジェットの構造と星間空間への影響: 酒見はる香、平成 30 年度 Qdai-jump Research Program 博士課程学生研究支援採択

Magnetic Field Analysis of the SS433 Jet Terminal Region: 酒見はる香、日本天文学会早川幸男基金採択

RESOLVING THE TERMINAL SHOCK DRIVEN BY THE JET FROM A MICRO-QUASAR SS433 AT THE EASTERN EAR OF W50: Haruka Sakemi, Chandra 衛星 2019 年度観測提案採択

Study of interaction between the SS433 jet and molecular cloud based on 12CO (J=3-2) observation: Haruka Sakemi, ASTE 望遠鏡 2019 年度観測提案採択

他大学での研究と教育

町田真美：中村学園大学にて「地学」の講義を行った。

町田真美：西南学院大学にて「自然科学概論」の講義を行った。

大村匠, 土肥明：九州産業大学で、非常勤講師（担当：物理）を務めた。

土肥明：九州産業大学で行われた教員免許講習（住居・インテリア）で、JAVA によるプログラミングの講師も行った。

学部 4 年生卒業研究

田嶋裕太：(指導教員、橋本正章)：パラメータ化された TOV 方程式による中性子星の

構造

貞安雄太：(指導教員、町田真美)：MRI の不安定性条件導出と、MRI 数値計算シミュレーション

大前陸人：(指導教員、町田真美)：3C273 の電波イメージング

修士論文

山田 龍王 (指導教員：橋本正章)：X 線バースト GS 1826-24 の数値シミュレーション

学外での学会活動

町田真美：日本天文学会年会実行委員

大村匠、酒見はる香：2018 年度第 48 回天文・天体物理若手夏の学校 事務局員

その他の活動と成果

町田真美：理学部物理学科「公開講座」において、「宇宙磁場とブラックホール」についての講演を行った。

町田真美：福岡高校にて、模擬講義を行った。

町田真美：宇宙を学べる大学 in 九州 (福岡市科学館) にて、全体の司会及び、九州大学理学部の広報を行った。

町田真美：オープンキャンパスにて「女性教員と女子高校生の懇談会」を開催した。

粒子系理論物理学研究室

研究室構成員

原田恒司 (基幹教育院) 教授

大河内豊 (基幹教育院) 准教授 小島健太郎 (基幹教育院) 准教授

田尾周一郎 (基幹教育院) 助教

《 大学院 修士課程 》

古賀一成

《 訪問研究者 》

佐合紀親 (基幹教育院) 中里健一郎 (基幹教育院) 米倉和也 (基幹教育院)

担当授業

基幹物理学 IB(原田恒司)、物理学概論 A 演習 (大河内豊)、身の回りの物理学 A (原田恒司、小島健太郎)、体験してわかる自然科学 (原田恒司)、課題協学科目 (大河内豊、小島健太郎)、基幹教育セミナー (原田恒司、大河内豊、小島健太郎、田尾周一郎)、テクニカルプレゼンテーション (大河内豊)、アウトリーチ 2(小島健太郎)、「わかる」と「わかりやすい」ーオリジナル教材を作って考えるー (原田恒司、小島健太郎)、プログラム・ゼミ III (田尾周一郎)、プログラム・ゼミ V, VII (田尾周一郎)、プログラム・ゼミ VI, VIII (田尾周一郎)、チュートリアル III, V, VII (田尾周一郎)、チュートリアル IV, VI, VIII (田尾周一郎)、課題提示科目 IV (田尾周一郎)、課題研究 (田尾周一郎)、総合文化研究特論 (田尾周一郎)

研究・教育目標と成果

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

非相対論的な核子を基本自由度とする核子系有効場理論を格子上に乗せて数値シミュレーションについての研究を行った。化学ポテンシャルの大きな領域での振る舞いの理解のために、繰り込み群的考察を行った。また、低密度領域での応用として、中性子星への応用について考察した。

超弦理論における小さな宇宙定数を持つ真空とその崩壊の触媒効果 (大河内豊)

弦理論が自然界を記述する統一理論であるならば、現在の我々の4次元時空で、宇宙定数が非常に小さな真空が存在するはずである。Kachru, Kallosh, Linde, Trivedi は、タイプ Type IIB 理論において、そうした真空が存在することを具体的に示した。この KKLT 真空の安定性は、様々な角度から議論され、現在の宇宙年齢を超えると考えられてきた。私は、中井氏 (ラトガス大) と棚橋 (九大) とともに、この真空に、もしソリトンが存在する場合に、その真空の崩壊が非常に早まることを示した。特に、4次元時空から見ると電荷と磁荷をもつようなダイオンにより触媒効果が生じることがわかった。KKLT 真空の構成には、反 D3 ブレーンを用いるのであるが、その一部が内部空間のサイクルに巻きつくことで、このようなことがソリトンが生じることになる。初期の宇宙において十分に起こりうるシナリオである。この成果は論文としてまとめ発表した。

T^2/Z_3 オービフォルドを持つ6次元時空上のゲージ理論を用いた大統一理論の模型構築 (小島健太郎)

コンパクトな余剰次元として T^2/Z_3 オービフォルドを持つ、高次元時空上のゲージ理論を用いた大統一理論の模型構築を進めた。この理論は、diagonal embedding と呼ばれる特殊な境界条件を導入することで、ヒッグススカラーの導入なしに、大統一对称性の自発的な破れが可能になると期待される。本年度は、この理論から得られる4次元時空上での有効理論を見通しよく議論するため、 T^2/Z_3 の双対基底を導入したカルツァ・クラインモード展開の定式化や、diagonal embedding と無矛盾なゲージ変換の構成について、詳しく調べた。今後は、Wilson line phase の有効ポテンシャルの導出およびその相構造について解析を進めていく予定である。

発表論文

《原著論文》

Dyonic Catalysis in the KPV Vacuum Decay

Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi, and Norihiro Tanahashi

e-Print: arXiv:1808.10235 [hep-th]

《Proceedings》

Jingyun Wang, Kentaro Kojima, Exploring an approach for grouping through pre-

dicting group performance from analysis of learner characteristics, 7th International Conference on Learning Technologies and Learning Environments (LTLE2018)

Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi, and Norihiro Tanahashi, Proceedings of the Corfu Summer Institute 2018 "Schools and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity" in the Proceedings of Science, CORFU2018.

《その他の論文》

基幹教育セミナーにおける学生の意識の変容

4 学期制導入に伴う授業内容変更とセミナーの意義に焦点を当てて

鎌滝晋礼, 小島健太郎, 飯嶋裕治, 内田竜也, 大河内豊, 大久保文哉, 斎藤新悟, 猿渡悦子, セベリア・アントン, 田中真理, 野瀬健, 川島啓二, 安永和央, 木村政伸

基幹教育紀要. 5, pp. 57 - 74, 2019-03-05. 九州大学基幹教育院

著書

大河内豊

“素粒子の隠れた世界” (翻訳) パリティ 丸善出版

講演

《海外での講演》

XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics

Caen, France, July 12

Koji Harada, Satoru Sasabe, and Masanobu Yahiro "How to use renormalization group analysis in lattice nuclear effective field theory"

The Corfu Summer Institute 2018 "Schools and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity"

2018 年 9 月 7 日 Corfu, Greece

"Decay of false vacua via impurities in string theories"

Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi, and Norihiro Tanahashi

Conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology "Miami 2018"

2018 年 12 月 17 日 Lago Mar Resort, Fort Lauderdale, Florida

“Decay of false vacua via impurities in string theories”
Yuichiro Nakai, Yutaka Ookouchi, and Norihiro Tanahashi

《国内での講演》

Dyonic Catalysis in the KPV Vacuum Decay
日本物理学会 2018年秋季大会 信州大学
中井雄一郎、大河内豊、棚橋典大

The spontaneous breaking of grand unified symmetries in grand Gauge-Higgs Unification Models
瀬戸内サマーインスティテュート 2018, 2018.09., 小島健太郎

反転学習を導入したピア・インストラクション型講義の実践
2018年度 日本物理教育学会年会 第35回 物理教育研究大会, 2018.08.
小島 健太郎, 原田恒司

専攻教育へ橋渡しする授業科目の有効性
田尾 周一郎、田中岳、副島雄児、飯嶋裕治
大学教育学会 2018年度課題研究集会 長崎国際大学

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 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、基盤 C(一般) 準安定なヒッグス真空の崩壊と触媒効果
研究代表者：大河内豊

科学研究費補助金、基盤 B
超弦理論から創発される一般化された超重力理論における D ブレインとブラックホール

研究代表者：吉田健太郎、研究分担者：大河内豊

文部省科学研究費補助金、若手 (B)

デジタル教科書の閲覧データを用いた学習者グループの自動生成による協調学習支援
研究代表者：小島健太郎

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

他大学での研究と教育

修士論文

学外での学会活動

原田恒司, 大河内豊, 小島健太郎:

日本物理学会第 74 回年次大会実行委員

大河内豊:

2018 年度 日本物理学会 Jr. セッション委員

国際研究会 YITP Workshop ”Strings and Fields 2018” 2018 年 7 月 30- 8 月 3 日 世話人

小島健太郎:

九州地区大学教育研究会, 庶務

日本物理教育学会九州支部, 理事

日本物理教育学会九州支部研究大会, 実行委員

IDE 大学協会九州支部, 監事

田尾周一郎:

日本物理教育学会九州支部, 理事

日本物理教育学会九州支部研究大会, 実行委員

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

大河内豊:

平成30年度理学研究院物理学科部門FD(2018.12)

「活気のある授業に向けたグループワーク・アクティブラーニング」講演

小島健太郎:

平成30年度福岡県高校生知の創造力育成セミナー事業実施協議会 委員

2018年課題協学科目FD(2018.04)講演,

九州大学アクティブラーニング教室「グループ学習の導入とジグソー法」(2018.06)講演

第5回基幹教育シンポジウム「高校・大学教育における科学実験の意義と課題 ―実験による学びとアクティブラーナーの育成―」(2018.08)企画・講演

平成30年度福岡県立糸島高等学校第3回職員研修「ジグソー法に学ぶグループ学習の導入」(2018.08)講師担当

愛知教育大学全学FD講演会「ピア・インストラクションを用いたグループ学習」, 愛知教育大学 教職キャリアセンター主催(2018.10)講師担当

福岡県修猷館高等学校 総合学習「出前授業」(2018.10)講師担当

第62回サイエンスカフェ@ふくおか「次元の謎に迫る! ~空間は本当に3次元なのか~」講演, 公益財団法人九州経済調査協会 BIZCOLI(2018.12)講師担当

共創学部協働科目FD「課題協学科目の実践から学ぶ」(2019.02)講演

M2B学習支援システム講習会(2019, 3/22, 3/26, 3/27)講演

実験核物理

研究室構成員

森田浩介 教授 若狭智嗣 教授
寺西高 准教授 坂口聡志 准教授
藤田訓裕 助教 郷慎太郎 助教
岩村龍典 技術職員

《 博士研究員 》

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

《 大学院 博士課程 》

田中泰貴 庭瀬暁隆

《 大学院 修士課程 》

入部弘太郎 大城久典 後藤秀兵 齋藤堯夫
坂東慶伍 真部健太 密本普治 猪野元大樹
笠原妃奈 坂井秀充 白坂和也 末川慶英 平位勇磨

《 学部 卒業研究生 》

長田茉莉 久保大志 坂木重仁 内藤夏樹
浜野友哉 東 聖人 平川貴啓 村上郁斗

担当授業

物理学ゼミナール (森田浩介・寺西高)、物理学入門 II (森田浩介)、力学・同演習 (若狭智嗣)、原子核物理学 (若狭智嗣)、物理学概論 A (寺西高)、原子核・高エネルギー実験学 (寺西高)、最先端物理学 (森田浩介、寺西高)、基幹物理 IA 演習 (坂口聡志)、基幹物理 IB 演習 (坂口聡志、郷慎太郎)、物理学総合実験 (藤田訓裕、郷慎太郎、坂口聡志)、自然科学総合実験 (寺西高)

研究・教育目標と成果

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

超重元素合成に用いられる変形アクチノイド核を含む融合反応の障壁分布を理化学研究所にて測定した重元素核間の準弾性散乱データから導出し、障壁分布の広がり

明に核の変形による効果が重要な役割を果たすことを示した。さらに、得られた障壁分布から短軸側・長軸側からの衝突に対応する入射エネルギーを同定し、蒸発残留核生成断面積のエネルギー依存性と比較することにより、軽い領域において示唆されていた短軸側からの衝突における断面積の増大を世界で初めて直接的に検証した。また、実験的に得られる融合障壁分布から未知の系の融合反応における最適エネルギーを推定する手法を提案した。これらの知見は第8周期の新元素合成における実験条件の決定に大きな貢献を果たすと期待される。

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

超重元素核の質量測定 (庭瀬暁隆、森田浩介)

原子核の質量は核種固有の物理量であるため、精密な質量測定によってそのZとAを直接識別することができる。そのため、熱い融合反応で作られる核種のように、崩壊連鎖が自発核分裂等によって既知の核へ辿り着かないような同位体であっても一意な核種同定を行うことができる。理化学研究所では気体充填型反跳分離装置 GARIS-II と多重反射型飛行時間測定式質量分光器 MRTOF を用いた短寿命核の質量測定を行っており、現在は超重核の精密質量分析を目指して研究開発を行っている。本年度は、理化学研究所の E6 へ移設した MRTOF システムの再構築を行った。また、昨年度に開発した、原子核の質量とその崩壊を相関計測できる革新的な検出器、 α -ToF を MRTOF へとインストールし、初のオンライン実験を12月に行った。コミッショニングの結果、 ^{207}Ra の精密質量とそれに相関した崩壊事象の観測に成功し、得られた質量欠損値は AME2016 に記載されている文献値と一致した。また飛行時間と崩壊事象の時間差から半減期の導出にも成功しており、こちらも文献値を支持する結果が得られた。また、核分光学的に検出器を使用可能であることも示唆された。以上の結果より、 α -ToF を用いて原子核の精密な質量と崩壊特性の相関測定が可能であることが実験的に示され、超重核だけでなく、 α 崩壊をする重核全般の質量測定において、中核的な役割を果たせる性能を有していることが確かめられた。

119番新元素識別のためのデータ解析手法の構築 (村上郁斗、郷慎太郎、田中聖臣、坂口聡志、森田浩介)

第8周期の元素の発見を目指し、当研究室は理化学研究所やオークリッジ国立研究所と共同で、 $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ 融合反応を用いた119番元素の合成実験を進めている。この実験においては、膨大なデータの中から非常に稀な事象を効率的かつ高い確度で識別する必要がある。そこで我々は、校正データである $^{51}\text{V}+^{159}\text{Tb}$ データ中に含まれる崩壊系

列を用いて解析手法を構築・検証し、119番元素識別用の解析手法の確立を目指している。本手法においては、シリコン検出器 DSSD の同じストリップにおいて連続して検出された2本の α 線のエネルギーの2次元相関をとり、ストリップ番号、エネルギー、時間差を抽出後、エネルギーと半減期から妥当なものを探査する。利点としては、解析の初段階で限られた情報（2つの α 線のエネルギー）を用いてデータの選別を行うため、解析速度が速く、手掛かりを見つけやすい点が挙げられる。データ中に含まれる ^{202}Rn の崩壊事象解析から半減期を導出したところ、文献値と半減期の誤差内で一致し、解析手法の妥当性が示された。本手法は119番元素合成実験のデータ解析にも適用可能であり、かつ解析速度に優れる。この利点を生かし、理化学研究所における実験のオンライン解析に適用することを計画している。

$^{6,7}\text{Li}+^{51}\text{V}$ 準弾性散乱測定による光学ポテンシャルの実験的決定 (真部健太、平川貴啓、藤田訓裕、田中聖臣、鷲山広平、郷慎太郎、坂口聡志、森田浩介)

超重元素合成のための入射ビームエネルギーを推定するためには、精密な光学ポテンシャルを入力パラメータとし、融合障壁分布を理論計算で再現することが重要である。一方、重元素核間の光学ポテンシャルは軽粒子領域からの経験則や外挿によって決定されており(大域的光学ポテンシャル)、不定性の大きな部分であった。そこで本研究では、弾性散乱断面積の角分布測定により、反応系に特有な局所的光学ポテンシャルを決定することを目的とした。複数角度において散乱粒子を同時測定可能なシリコン検出器系を開発し、 $^{6,7}\text{Li}+^{51}\text{V}$ 弾性散乱測定をタンデム加速器を用いて行った。測定データを再現するような光学ポテンシャルのパラメータをカイ二乗法によるフィッティングにより決定し、チャンネル結合計算を行った。結果を先行研究による融合障壁分布の測定値と比較したところ、データを再現するような光学ポテンシャルのパラメータが誤差内に存在することが分かった。この結果は、大域的光学ポテンシャルでは説明できなかった融合障壁分布を、実験的に決定した局所的光学ポテンシャルを用いて再現できる可能性がある、ということを示している。

重イオン検出用 MCP-ToF 検出器の開発と ToF-ERDA 法による性能評価 (坂東慶伍、藤田訓裕、郷慎太郎、坂口聡志、田中聖臣、森田浩介)

粒子の飛行時間測定は実験核物理における最も基本的な技術の一つであるが、検出器中での飛程の短い低エネルギー重イオンについての測定は困難である。この測定を可能とするため、近年極めて小さな物質でタイミングを測定できる MCP-ToF 検出器の開発が進められている。本研究では、九州大学で MCP-ToF 検出器を開発し、タンデム加速器施設において、固体材料の表面元素・組成分析手法である弾性反跳粒子検出分析法(ToF-ERDA)を開発することを目的とした。装置の開発においては、ワイヤー巻線器

を製作し、二次電子放出膜に Al を蒸着し、ガス検出器シミュレータ Garfield を用いて各電極の最適な電位を決定した。オフライン試験の後、本検出器を ToF-ERDA 法による試料分析実験に適用し、タンデム加速器を用いてテスト実験を行った。YBa₂Cu₃O₇ を試料として、50MeV の ¹²⁷I ビームを照射し反跳粒子の分析を行った。反跳粒子の飛行時間とエネルギーの相関から、開発した検出器は重イオンに対しての質量分解能が十分にあり、さらに深さ方向の分布を探ることが可能であることを確認した。これにより九州大学における ToF-ERDA 法が実現可能であることを実証した。

ブラッグカーブ検出器を用いた超重核の原子番号測定 (齋藤堯夫、藤田訓裕)

119 番元素をはじめとする新元素探索実験においては、融合反応で生成した蒸発残留核の原子番号 (Z) を、従来の α 崩壊連鎖を既知核までたどるという間接手法に代わって、直接測定する手法の開発が求められている。イオンがガス中を通過する際に失うエネルギーの空間分布 (ブラッグカーブ) は Z に敏感な物理量であるため、これを電荷の時間情報として得ることの出来る、ブラッグカーブ検出器を開発した。設計には、計算コード Gmsh, Elmer を用いてメッシュ及び電場計算を行った後、ガス検出器シミュレーションコード Garfield++ を用いて行った。新元素探索実験のように、入射粒子が 1.5MeV/u 以下の低エネルギーイオンの場合はブラッグピークの高さが入射エネルギーに依存するため、従来行われてきた 2 つのシェーピングアンプを用いる読出し法では Z の識別能力が低下する。そこで、本検出器の読出し回路には FADC を用いたデジタル波形読出しを行い、ブラッグカーブ全体を取得することで Z の分離能力を向上させた。九大タンデム加速器からのヨウ素ビームと Z=50 近傍の標的との弾性散乱をした反跳イオンを用い、1.0MeV/u 以下の重イオンに対してブラッグカーブの測定に初めて成功した。

遅発中性子飛行時間測定法による二重魔法数核 ⁷⁸Ni の研究 (郷慎太郎)

陽子と中性子の数がアンバランスな不安定核において、安定核で考えられてきた魔法数が維持されるのかは自明ではなく、近年の原子核構造研究の興味のひとつといえる。原子核が特に安定となる二重魔法数を持つ原子核 ⁷⁸Ni は不安定核領域に存在するが、その核構造は未だに明らかではない。そのため、理化学研究所 RIBF において ⁷⁸Ni のベータ崩壊に伴う遅発中性子測定を遂行した。ベータ崩壊の測定に中性子の飛行時間測定を組み合わせることにより、中性子過剰核の崩壊モードに現れる遅発中性子のエネルギーの分光が可能となり、⁷⁸Ni の核構造の情報を詳細に調べることが可能となった。現在、得られたデータの詳細な解析を進めている。

中性子過剰カルシウム核のベータ崩壊の研究 (郷慎太郎)

カルシウム核は陽子が魔法数を持つ原子核である。近年の不安定核生成技術の進展により、中性子が陽子に対して過剰に存在するカルシウム核の生成が可能となり、近年の研究では中性子が40個含まれる ^{60}Ca の合成も報告され、原子核の性質を反映する半減期や第一励起エネルギーなどの測定が待たれている。そのため、中性子過剰なカルシウム核の半減期の系統性、およびベータ崩壊に伴う遅発中性子放出確率の測定実験を理化学研究所における実験課題審査会において提案し、評価A/Bで実験提案が認められた。

原子核の核分裂反応における微視的記述 (鷲山広平)

原子核の核分裂反応は大多数の核内核子が関与する大振幅集団運動のひとつであり、核分裂反応を満足に記述する微視的量子多体理論はまだない。本研究では、近年発展を遂げている原子核密度汎関数を基礎に核分裂反応を記述することを目標に掲げている。本年度は、核分裂の研究が盛んに行なわれている ^{240}Pu に対して核分裂経路上の集団慣性質量の計算を局所乱雑位相近似法(LQRPA)を用いて行なった。用いた具体的な手法は以下のとおりである。(1)核分裂経路上の各変形度での拘束条件付き密度汎関数計算を行ない、(2)得られた状態を基にLQRPA方程式を解いて集団的な四重極低励起モードの固有解を求め、(3)得られた低励起モードの解から集団慣性質量を構築した。本研究では、巨大次元のLQRPA方程式を対角化法で直接解く代わりに数値的に簡便でかつ同等な結果を与える有限振幅法を用いた。得られた集団慣性質量は ^{240}Pu の基底状態及び核分裂アイソマー状態で他の変形度に比べて大きな値を示した。また、変形度が変化するにつれて集団慣性質量が大きく変化する変形領域が存在することを示した。これはこの変形領域で ^{240}Pu の一粒構造が劇的に変化していること反映した結果である。

$(\bar{p}, 2p)$ 反応を用いた ^{16}O における殻効果の破れの研究 (密本晋治、若狭智嗣)

原子核の構造を探る上で、一粒状態を調べることは重要である。その手段として、入射粒子によって核内核子を叩き出すノックアウト反応が有力であるが、測定された粒子強度和は、独立粒子殻模型(IPSM)の約70%にしか満たない。このクエンチングは、短距離相関やテンソル相関の効果と考えられているが、殻構造の破れの影響も考慮する必要がある。そこで本研究では、状態密度が低く殻効果の破れが実験的に検証し易い酸素に対して $(\bar{p}, 2p)$ 反応を用いることで、一粒強度分布の測定と各ピークの軌道角運動量の同定を行い、過去に行われた $(e, e'p)$ 反応の結果と比較しつつ殻構造の破れを検証した。イオン光学的輸送行列を補正することで最高165 keVの高分解能を達成し、殻構造の破れを示す $2s_{1/2}$ および $1d_{5/2}$ 軌道由来のピークの観測に成功した。連続状態の寄与を理論的に補正すると、 $1p$ 軌道の占有数が約5.2個に対して殻構造の破れ

に伴う sd 軌道の占有数が約 0.3 個と求まった。これは、短距離相関の影響が約 10% であることを示唆しており、理論補正の不定性はあるものの最近の研究成果とも無矛盾である。

中重核における分光学的手段としての偏極陽子によるノックアウト反応の研究 (大城久典、若狭智嗣)

不安定核に対する分光学的手段として注目されている $(p, 2p)$ 反応の信頼性を議論するために、 $^{40}\text{Ca}(p, 2p)$ 反応における分光学的因子 (S -factor) の測定を行った。実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) において、国際共同研究 E413 として行った。 $(p, 2p)$ 反応で観測された低励起の離散的な状態に対して、微分断面積および偏極分解能の反跳運動量分布から軌道角運動量 l および全角運動量 j の同定を行った。さらに、実験値と歪曲波インパルス近似 (DWIA) 計算との比較から S -factor を導出し、過去に行われた $(e, e'p)$ 反応による結果と比較した。その結果、 $(e, e'p)$ 反応に対して $(p, 2p)$ 反応では中重核においても約 20% の精度で S -factor を得ることが出来ることが確認された。

偏極陽子を用いた $(p, 2p)$ 反応測定による ^{40}Ca 深部一粒子状態の研究 (後藤秀兵、若狭智嗣)

上述の大城氏の結果を受け、本研究では過去の実験において統計量が少なく、明確な議論がされていない高励起状態に着目した。残留核である ^{39}K が核子非束縛状態となる励起エネルギー 6 MeV 以上について、微分断面積と偏極分解能の反跳運動量分布を求めた。核子非束縛状態には複数の軌道が混在するため、多重極展開を用いて各軌道の分光学的因子 S -factor を求めることで、 ^{40}Ca の深部一粒子強度分布を求めた。その結果、 $1d_{5/2}$, $1d_{3/2}$ 軌道の軌道占有率はそれぞれ 89%, 87% となり、残留相互作用で高励起状態に分布したものをほぼ全て測定したことを確認した。得られた一粒子強度から各軌道の束縛エネルギーを算出し、軌道間の相対エネルギーを求めると、先行研究とは異なる結果が得られた。したがって、テンソル力の効果の議論に重要な相対エネルギーの導出に際しては、連続状態まで含んだ解析が重要であるとの知見が得られた。

190 MeV での (p, n) 反応による ^{48}Cr および ^{64}Ge からの Gamow-Teller 遷移の研究 (猪野元大樹、笠原妃奈、平位勇磨、大城久典、後藤秀兵、密本晋治、坂木重仁、浜野友哉、若狭智嗣)

$\Delta L = 0$, $\Delta S = 1$, $\Delta T = 1$ を特徴とする Gamow-Teller 遷移は、波動関数の空間部分に影響を与えないため、スピンアイソスピン空間内の運動の研究に適している。その中でも $A > 50$ の安定核では GT 巨大共鳴を示し、核子-核子間有効相互作用のアイソベクトル部分を理解するために非常に重要な情報を与えるため長年研究されてきた。最

近では、不安定同位体ビームを用いた逆運動学における (p, n) 反応を用いた新しい実験手法が確立され、不安定な核において GT 巨大共鳴領域を含む広い励起エネルギー領域にわたる GT 強度分布の抽出に使用されている。実験は、理化学研究所仁科加速器科学研究センターにおいて行われ、190 MeV/u の ^{48}Cr および ^{64}Ge ビームを用いた逆運動学での (p, n) 反応を測定した。この研究には理化学研究所との共同実験として参加し、我々は主に粒子識別中性子検出器 (PANDORA) の製作や較正を行った。ここで得た PANDORA の動作特性への理解を、今後の我々のグループでの実験に応用する。

PANDORA 検出器を用いた中性子ハロー核における Gamow-Teller 遷移の研究 (平位勇磨、猪野元大樹、笠原妃菜、若狭智嗣)

Gamow-Teller 遷移は、軌道角運動量が変化せず、スピン・アイソスピンの量子数が 1 だけ変化する最も単純な遷移であるため、原子核のスピン・アイソスピン励起の研究にしばしば用いられている。中性子ハロー核における Gamow-Teller 遷移を考えると、中性子ハロー核の中性子に働く相互作用が、安定核に働いている相互作用に比べて生の核力に近く、 (p, n) 反応後も生の p - n 相互作用に近いことが期待されるため、中性子ハロー核のスピン・アイソスピン励起は安定核のそれと異なることが予想される。本実験は理化学研究所仁科加速器科学研究センターにおいて行われ、中性子ハロー核である ^{11}Li と ^{14}Be を含めたカクテルビームを用いた逆運動学での (p, n) 反応を測定した。本実験では粒子識別中性子検出器 (PANDORA) を初めて実験に導入し、ガンマ線と中性子の弁別を行うことで、全イベントのおよそ半分程度のイベントをガンマ線によるバックグラウンドとして抑えることに成功した。また ^{11}Li の (p, n) 反応後に生成される ^{11}Be が、 ^9Li と重陽子に崩壊する過程を世界で初めて観測した。さらに Gamow-Teller 巨大共鳴を示唆する結果を得ており、今後はその巨大共鳴を含めた励起エネルギーが 30 MeV 程度までの領域の詳細な解析を行う。

飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による中性子生成機構の研究 (坂木重仁、浜野友哉、東聖人、猪野元大樹、笠原妃奈、平位勇磨、若狭智嗣)

重陽子分解反応における中性子生成量の質量数依存性の理解を目的として、 (d, n) 反応の系統的測定を行った。実験は、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の中性子実験室にて行った。 ^{12}C 、 ^{27}Al 、 ^{59}Co の 3 標的に 56 MeV の重陽子ビームを照射し、 (d, n) 反応を飛行時間測定法により測定した。その際、検出器に入る γ 線と中性子について、波形弁別法を用いて識別した上で二階微分断面積を導出した。さらに、3 標的について、入射重陽子が標的内で全て分解するほどの厚い標的の測定も行った。二階微分断面積は、そのピーク断面積がおおよそ質量数 A の $2/3$ 乗に比例することが確認された。ピークエネルギーは A の増加と共に減少しており、クーロン・ポテンシャルによる重

陽子の減速の影響が認められた。また、厚い標的においては A の増加と共に収量が減少する結果が得られ、標的中での中性子の反応が無視出来ないことを示唆している。

タンデム加速器における励起関数測定系の開発 (寺西高、坂井秀充、久保大志、長田茉莉)

タンデム加速器において共鳴反応の励起関数を効率よく高精度で測定するためにビームラインおよび制御系の整備を行っている。本年度は、スリット系の整備、分析電磁石の設定精度向上、磁場のフィードバック制御、ビームラインパラメーターの一括設定を実現させ、測定と測定のためのエネルギー変更時間を約2分以内にするのが可能になった。本システムを用いて、変形共存核として知られる ^{118}Sn の陽子共鳴弾性・非弾性散乱の予備測定を行った。また、エネルギー系統誤差を評価するため、 ^{12}C の陽子弾性散乱における既知の共鳴状態の測定を実施した。

低速 RI ビームを用いた ^{93}Zr の陽子・重陽子誘起反応測定 (入部弘太郎、寺西高)

RIBF で新たに開発された低速 RI ビームライン OEDO において核子あたり 30 MeV ^{93}Zr ビームを生成し陽子・重陽子標的による誘起反応の測定を行った。 ^{93}Zr は半減期 153 万年の長寿命核分裂生成物 (LLFP) として知られ、核廃棄物の中に含まれる。本実験は、核廃棄物の減容化に向けた研究プロジェクトの一環として、直接の応用にはつながらないものの、関連する核データを系統的に取得するという観点で行われた。また、核物理研究上有用な、低速 RI ビームラインにおける核反応測定手法を開発することも目標とした。本年度は解析を進め、BigRIPS+OEDO ビームラインにおけるビーム粒子識別と、反応標的以降の SHARAQ スペクトロメータによる反応核種の質量電荷比 A/Q および原子番号 Z ができることを実証し、核子あたり 30 MeV における ^{93}Zr の陽子誘起反応の反応生成物の中で最も多いのは ^{91}Nb であることを明らかにした。

発表論文

《 原著論文 》

Extraction of the Landau-Migdal Parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in ^{132}Sn :

J. Yasuda, M. Sasano, R.G.T. Zegers, H. Baba, D. Bazin, W. Chao, M. Dozono, N. Fukuda, N. Inabe, T. Isobe, G. Jhang, D. Kameda, M. Kaneko, K. Kisamori, M. Kobayashi, N. Kobayashi, T. Kobayashi, S. Koyama, Y. Kondo, A.J. Krasznahorkay,

T. Kubo, Y. Kubota, M. Kurata-Nishimura, C.S. Lee, J.W. Lee, Y. Matsuda, E. Milman, S. Michimasa, T. Motobayashi, D. Muecher, T. Murakami, T. Nakamura, N. Nakatsuka, S. Ota, H. Otsu, V. Panin, W. Powell, S. Reichert, S. Sakaguchi, H. Sakai, M. Sako, H. Sato, Y. Shimizu, M. Shikata, S. Shimoura, L. Stuhl, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Tangwancharoen, M. Takaki, H. Takeda, T. Tako, Y. Togano, H. Tokieda, J. Tsubota, T. Uesaka, T. Wakasa, K. Yako, K. Yoneda, and J. Zenihiro
Phys. Rev. Lett. **121**, 132501 (2018)

Proton elastic scattering at 200 A MeV and high momentum transfers of 1.7–2.7 fm⁻¹ as a probe of the nuclear matter density of ⁶He:

S. Chebotaryov, S. Sakaguchi, T. Uesaka, T. Akieda, Y. Ando, M. Assie, D. Beaumel, N. Chiga, M. Dozono, A. Galindo-Uribarri, B. Heffron, A. Hirayama, T. Isobe, K. Kaki, S. Kawase, W. Kim, T. Kobayashi, H. Kon, Y. Kondo, Y. Kubota, S. Leblond, H. Lee, T. Lokotko, Y. Maeda, Y. Matsuda, K. Miki, E. Milman, T. Motobayashi, T. Mukai, S. Nakai, T. Nakamura, A. Ni, T. Noro, S. Ota, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Park, A. Saito, H. Sakai, M. Sasano, H. Sato, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, I. Stefan, L. Stuhl, M. Takaki, K. Taniue, K. Tateishi, S. Terashima, Y. Togano, T. Tomai, Y. Wada, T. Wakasa, T. Wakui, A. Watanabe, H. Yamada, Zh. Yang, M. Yasuda, J. Yasuda, K. Yoneda, and J. Zenihiro
Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 053D01 (2018)

Observation of the competing fission modes in ¹⁷⁸Pt:

I. Tsekhanovich, A.N. Andreyev, K. Nishio, D. Denis-Petit, K. Hirose, H. Makii, Z. Matheson, K. Morimoto, K. Morita, W. Nazarewicz, R. Orlandi, J. Sadhukhan, T. Tanaka, M. Vermeulen, M. Warda
Phys. Lett. B **790**, 583 (2019).

Excitation of the Isovector Spin Monopole Resonance via the Exothermic ⁹⁰Zr(¹²N,¹²C) Reaction at 175 MeV/u:

S. Noji, H. Sakai, N. Aoi, H. Baba, G.P.A. Berg, P. Doornenbal, M. Dozono, N. Fukuda, N. Inabe, D. Kameda, T. Kawabata, S. Kawase, Y. Kikuchi, K. Kisamori, T. Kubo, Y. Maeda, H. Matsubara, S. Michimasa, K. Miki, H. Miya, H. Miyasako, S. Sakaguchi, Y. Sasamoto, S. Shimoura, M. Takaki, H. Takeda, S. Takeuchi, H. Tokieda, T. Ohnishi, S. Ota, T. Uesaka, H. Wang, K. Yako, Y. Yanagisawa, N. Yokota, K. Yoshida, and R.G.T. Zegers

Phys. Rev. Lett. 120, 172501 (2018).

α -unbound levels in ^{34}Ar from $^{36}\text{Ar}(p,t)^{34}\text{Ar}$ reaction measurements and implications for the astrophysical $^{30}\text{S}(\alpha,p)^{33}\text{Cl}$ reaction rate:

A.M. Long, T. Adachi, M. Beard, G.P.A. Berg, M. Couder, R.J. deBoer, M. Dozono, J. Gorres, H. Fujita, Y. Fujita, K. Hatanaka, D. Ishikawa, T. Kubo, H. Matsubara, Y. Namiki, S. O'Brien, Y. Ohkuma, H. Okamura, H.J. Ong, D. Patel, Y. Sakemi, Y. Shimbara, S. Suzuki, R. Talwar, A. Tamii, A. Volya, T. Wakasa, R. Watanabe, M. Wiescher, R. Yamada, and J. Zenihiro

Phys. Rev. C **97**, 054613 (2018)

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

S. Michimawa, J. Hwang, K. Yamada, S. Ota, M. Dozono, N. Imai, K. Yoshida, Y. Yanagisawa, K. Kusaka, M. Ohtake, M. Matsushita, D.S. Ahn, O. Beliuskina, N. Chiga, K. Chikaato, N. Fukuda, S. Hayakawa, E. Ideguchi, K. Iribe, C. Iwamoto, S. Kawase, K. Kawata, N. Kitamura, S. Masuoka, H. Miyatake, D. Nagae, R. Nakajima, T. Nakamura, K. Nakano, S. Omika, H. Otsu, H. Sakurai, P. Schrock, H. Shimizu, Y. Shimizu, T. Sumikama, X. Sun, D. Suzuki, H. Suzuki, M. Takaki, M. Takechi, H. Takeda, S. Takeuchi, T. Teranishi, R. Tsunoda, H. Wang, Y. Watanabe, Y.X. Watanabe, K. Wimmer, K. Yako, H. Yamaguchi, L. Yang, H. Yoshida, S. Shimoura

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

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

Zs. Vajta, D. Sohler, Y. Shiga, K. Yoneda, K. Sieja, D. Steppenbeck, Zs. Dombri'adi, N. Aoi, P. Doornenbal, J. Lee, H. Liu, M. Matsushita, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, P. Bednarczyk, Zs. Fülöp, S. Go, T. Hashimoto, E. Ideguchi, K. Ieki, K. Kobayashi, Y. Kondo, R. Minakata, T. Motobayashi, D. Nishimura, H. Otsu, H. Sakurai, Y. Sun, A. Tamaii, R. Tanaka, Z. Tian, T. Yamamoto, X. Yang, Z. Yang, Y. Ye, R. Yokoyama, J. Zenihiro

Phys. Lett. B 782, 99 (2018)

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

M. Machida, D. Nishimura, M. Fukuda, S. Yagi, T. Sugihara, S. Kanbe, S. Yamaoka,

M. Takechi, M. Tanaka, M. Amano, J. Chiba, K. Chikaato, H. Du, S. Fukuda, A. Homma, T. Hori, A. Ikeda, R. Ishii, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, R. Kehl, A. Kitagawa, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, A. Mizukami, T. Moriguchi, M. Nagashima, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Ohnishi, T. Ohstubo, S. Sato, J. Shimaya, T. Suzuki, S. Suzuki, T. Tahara, Y. Tanaka, T. Yamaguchi, and R. Yanagihara
Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A 931, 23-28 (2019).

《その他の論文》

ニホニウムの発見 <特別インタビュー> 森田博士に聞くニホニウム発見とさらなる探究:

森田浩介

Newton 別冊『完全図解 元素と周期表 新装版』(ニュートン別冊), 2018年11月19日発売

Optimum Incident Energy for New Element Search:

T. Tanaka and K. Morita,

AAPPS Bulletin, Association of Asia Pacific Physical Societies, Vol. **28** No. 3 (2018), p. 28 - 30.

新元素探索の最適な入射エネルギー:

田中泰貴、森田浩介

日本物理学会誌、日本物理学会、Vol. **73** No. 4 (2018), p. 234-235.

MRTOF-MS 用 α -ToF 検出器の性能評価:

庭瀬暁隆、和田道治、P. Schury、伊藤由太、加治大哉、M. Rosenbusch、森本幸司、羽場宏光、木村創大、石澤倫、森田浩介、宮武宇也、H. Wollnik

日本放射化学会誌 第39号 2019年3月

Development of α -ToF detector for correlation measurement of atomic masses and decay properties of superheavy nuclides:

T. Niwase, M. Wada, P. Schury, Y. Ito, M. Rosenbusch, D. Kaji, K. Morimoto, H. Haba, S. Ishizawa, K. Morita, H. Wollnik

RIKEN Accel. Prog. Rep. 51 157(2018).

講演

《 海外での講演 》

Present status and perspectives of SHE researches at RIKEN:

K. Morita,

13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), 4-8 December 2018, Omiya, Japan.

Nuclear Spin Physics via Polarization Measurements:

T. Wakasa,

The 23rd International Spin Physics Symposium (SPIN2018), Ferrara, Italy, September 2018.

Studies of two- and three-nucleon interactions in nuclear reactions:

T. Wakasa,

5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 23-27 Oct. 2018, Hawaii, U.S.A.

Elastic scattering of ${}^6\text{He}$ from polarized proton at 200 A MeV:

S. Sakaguchi for SAMURAI13 collaboration,

The 10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018), 4-8 June 2018, Matsue, Japan.

Proton elastic scattering off ${}^6\text{He}$ at 200 A MeV measured with solid polarized proton target:

S. Sakaguchi for SAMURAI13 collaboration,

SAMURAI International Collaboration Workshop 2018, 3 Sept. 2018, RIKEN (Wako), Japan.

Proton elastic scattering from ${}^6\text{He}$ at 200 A MeV measured with polarized proton target for RI-beam experiments:

S. Sakaguchi for SAMURAI13 collaboration,

The IXth International Symposium on EXOTic Nuclei (EXON-2018), 10-15 September 2018, Petrozavodsk, Russia.

Study of Fusion Reaction Mechanism for New Elements and New Isotopes:

S. Sakaguchi,

20th Northeastern Asian Symposium-2018 on Nuclear Physics in the 21st Century, 19-20 2018, Nagoya, Japan.

Superheavy element research at RIKEN and Kyushu University:

S. Sakaguchi,

The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, 18-23 Nov. 2018, Huizhou, China.

Elastic scattering of polarized protons from ${}^6\text{He}$ at 200 A MeV:

S. Sakaguchi for SAMURAI13 collaboration,

13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), 4-8 December 2018, Omiya, Japan.

Direct measurement of atomic number for superheavy nuclei search

Kunihiro Fujita, Takao Saito, Toshitaka Niwase, Keigo Bando, Kenta Manabe, Yoshihide Suekawa, Kazuya Shirasaka, Kousuke Morita

5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 27 Oct. 2018, Hawaii, U.S.A.

Search for super-allowed alpha decay around ${}^{100}\text{Sn}$ region:

S. Go, R. K. Grzywacz, Y. Xiao, K. Kolos, K. Nishio, R. Orlandi, H. Makii, K. Hirose, I. Nishinaka, J. Smallcombe H. Ikezoe, R. L eguillon, K. P. Rykaczewski, N. Brewer, C. J. Gross, C. Mazzocchi, F. P. Hessberger, S. Chiba, T. Otsuki, L. G. Sarmiento M. Veselsky A. Andreev, D. G. Jenkins R. Wadsworth, M. A. Bentley, G. de Angelis, C. Petrache, Z. Zhang, Z. G. Gan

5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 23-27 Oct. 2018, Hawaii, U.S.A

Excitation modes and collective inertia in triaxial superfluid nuclei:

K. Washiyama and T. Nakatsukasa,

5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, Hawaii, USA, Oct. 23-27, 2018

Quadrupole shape fluctuations in nuclei and collective Hamiltonian method within Skyrme EDF:

K. Washiyama,

Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory, Gif-sur-Yvette, France, Nov. 5-9, 2018

Fusion hindrance in heavy nuclear systems studied with time-dependent Hartree-Fock:

K. Washiyama,

10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP2018), Huizhou, China, Nov. 19-23, 2018

Excitation modes and rotational moment of inertia in triaxial nuclei:

K. Washiyama and T. Nakatsukasa,

13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), Omiya, Japan, Dec. 3-8, 2018

Collective mass in quadrupole collective Hamiltonian from local QRPA with Skyrme EDF:

K. Washiyama,

Tsukuba-CCS workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics, Tsukuba, Japan, Dec. 10-12, 2018

Nuclear matter radii of Ca isotopes across the neutron magic number $N = 28$ via interaction cross section measurements:

M. Tanaka for RIBF123 Collaboration,

13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, Omiya, Japan, 4-8 December 2018

Measurements of Interaction Cross Sections and Charge-changing Cross Sections for Ca and Ni isotopes at RIBF:

M. Tanaka for RIBF123 Collaborations,

The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Huizhou, China, 18-23 November 2018

Fusion Dynamics for Hot Fusion Reactions revealed in Quasielastic Fusion Barrier

Distributions:

T. Tanaka, K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, R. A. Boll, N. T. Brewer, S. Van Cleve, D. J. Dean, S. Ishizawa, Y. Ito, Y. Komori, K. Nishio, T. Niwase, B. C. Rasco, J. B. Roberto, K. P. Rykaczewski, H. Sakai, D. W. Stracener, and K. Hagino, JPS-APS Joint meeting on Nuclear Physics Division, October 2018, Hawaii, U.S.A.

Fusion Dynamics for Hot Fusion Reactions revealed in Quasielastic Fusion Barrier Distributions:

T. Tanaka, K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, R. A. Boll, N. T. Brewer, S. Van Cleve, D. J. Dean, S. Ishizawa, Y. Ito, Y. Komori, K. Nishio, T. Niwase, B. C. Rasco, J. B. Roberto, K. P. Rykaczewski, H. Sakai, D. W. Stracener, and K. Hagino, 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, December 2018, Saitama, Japan.

Fusion dynamics for hot fusion reactions revealed in quasielastic fusion barrier distributions:

T. Tanaka

54th ASRC International Workshop Sakura-2019 “ Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei ” , March 2019, Tokai, Japan.

Measurement of fusion barrier distribution in $^{51}\text{V}+^{208}\text{Pb}$ system:

T. Niwase, K. Fujita, Y. Yamano, K. Watanabe, D. Kaji, K. Morimoto, H. Haba, T. Hirano, S. Mitsuoka, K. Morita

13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), 4-8 December 2018, Omiya, Japan.

Identification of Neutral Particles with PANDORA Detector and Pulse-Shape Discrimination (PSD) Method:

Y. Hamano, M. Higashi, S. Sakaki, D. Inotomo, H. Kasahara, Y. Hirai and T. Wakasa, 5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 23-27 Oct. 2018, Hawaii, U.S.A.

Development of proton detector using Csi(Tl) scintillator and SiPM:

M. Osada, T. Teranishi, Y. Ueno, S. Oka, K. Iribe, H. Sakai, and T. Kubo, 5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 23-27 Oct.

2018, Hawaii, U.S.A.

Study of neutron production processes via (d, n) reactions with time-of-flight method:
M. Higashi, S. Sakaki, Y. Hamano, D. Inomoto, H. Kasahara, Y. Hirai, and T. Wakasa,
5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 23-27 Oct.
2018, Hawaii, U.S.A.

Development of α -ToF detector for correlation measurement of atomic masses and
decay properties:

T. Niwase, M. Wada, P. Schury, Y. Ito, M. Rosenbusch, D. Kaji, K. Morimoto, H.
Haba, S. Ishizawa, K. Morita, H. Wollnik

5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 23-27 Oct.
2018, Hawaii, U.S.A

《 国内での講演 》

理化学研究所一般公開トークショー:

森田浩介

理化学研究所一般公開、2018年4月20日、仁科加速器センター（埼玉県）

元素の歴史（Nhについて）:

森田浩介

39回数理の翼夏季セミナー、2018年8月9日、福岡県社会センター（福岡県）

新元素の探索:

森田浩介

鹿児島中央高等学校 SSH、2018年9月4日、鹿児島中央高校体育館（鹿児島県）

新元素の探索:

森田浩介

九州山口薬学学会、2018年11月3日、別府市ビーコン（大分県）

新元素の探索:

森田浩介

九州大学熊本同窓会、2018年11月14日、ANAクラウンプラザホテル（熊本県）

新元素の探索 (Discovery of superheavy elements) :

森田浩介

日本表面真空学会、2018年11月20日、神戸国際会議場 (兵庫県)

新元素の探索:

森田浩介

日本航空宇宙学会、2018年11月22日、九州大学 (福岡県)

第113番新元素ニホニウムの発見:

森田浩介

周期表150年記念シンポジウム、2019年2月23日、学術会議講堂 (東京都)

新元素の探索:

森田浩介

2019 総合技術研究会、2019年3月7日、九州大学 (福岡)

ニホニウム発見物語:

森田浩介

物理学会×化学学会シンポジウム、2019年3月17日、九州大学 (福岡)

九州大学における超重元素研究:

坂口聡志

超重元素研究の新展開、2018年7月30-31日、九州大学

Island of Stability:

S. Sakaguchi,

RIBF 若手放談会 エキゾチック核物理の将来, 18 Feb. 2019, RIKEN (Kobe), Japan.

九州大学超重元素研究センター (RCSHE) と加速器施設の紹介:

坂口聡志

日本物理学会 第74回年次大会 SSRI インフォーマルミーティング、2019年3月15日、九州大学

九大タンデムにおける重元素用ビームラインと検出器の開発:

藤田訓裕、齋藤堯夫、坂東慶伍、真部健太、白坂和也、末川慶英、森田浩介、若狭智嗣、寺西高、坂口聡志、郷慎太郎

第31回 タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2018年7月13日、東京都市大学

Direct Measurement of Atomic Number for SHE search at GARIS:

K. Fujita, T. Saito, T. Niwase, K. Bando, K. Manabe, K. Shirasaka, Y. Suekawa, K. Morita

SSRI-PNS collaboration meeting、2018年9月4日、理化学研究所

ブラッグカーブ測定による超重核の原子番号同定:

藤田 訓裕、齋藤 堯夫、庭瀬 暁隆、板東 慶伍、真部 健太、白坂 和也、末川 慶英、森田 浩介

2018 日本放射化学学会年会・第62回放射化学討論会、2018年9月18日、京都大学

ブラッグカーブ測定による超重核の原子番号識別:

藤田 訓裕、齋藤 堯夫、庭瀬 暁隆、板東 慶伍、真部 健太、白坂 和也、末川 慶英、森田 浩介

日本物理学会 第74回年次大会、2019年3月17日、九州大学

超重元素合成実験に向けたデジタルエレクトロニクスの活用:

郷慎太郎

超重元素研究の新展開、2018年7月30-31日、九州大学

有限振幅法による四重極集団ハミルトニアンの振動質量の評価:

鷲山広平、中務孝

日本物理学会第74回年次大会、2019年3月17日、九州大学

原子核の大振幅集団運動と核分裂ダイナミクス:

鷲山広平

NITEP 研究会「微視的理論でつなぐ散乱観測量と核構造」、2019年3月28日、大阪市立大学

Study of Barrier Distributions from Quasielastic Scattering Cross Sections towards Superheavy Nuclei Synthesis:

T. Tanaka,

10th Stopped and Slow Radioactive Isotope (SSRI) workshop, March 2019, Fukuoka, Japan

超重元素関連の装置開発:

田中泰貴

新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」若手ハードウェア研究会、2019年3月、大阪大学

超重核精密質量分析へ向けた α -ToF 検出器の開発と性能評価:

庭瀬暁隆

超重元素研究の新展開、2018年7月31日、九州大学

MRTOF-MS 用 α -ToF 検出器の性能評価:

庭瀬暁隆、和田道治、P. Schury、伊藤由太、加治大哉、M. Rosenbusch、森本幸司、羽場宏光、木村創大、石澤倫、森田浩介、宮武宇也、H. Wollnik

日本放射化学会年会 第62回放射化学討論会、2018年9月18日、京都大学

超重核精密質量分析へ向けた α -ToF 検出器の開発:

庭瀬暁隆

2019年3月5日、核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会、北海道大学

超重核合成実験のための Si 検出器 box の開発:

庭瀬暁隆、加治大哉、森本幸司 and nSHE collaboration.

2019年3月17日、日本物理学会 第74回年次大会、九州大学

α -ToF 検出器の開発と ^{207}Ra の質量-崩壊特性測定:

庭瀬暁隆

2019年3月18日、第10回 停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会、九州大学

低速 RI ビームを用いた ^{90}Zr の陽子・重陽子誘起反応測定:

入部弘太郎、寺西高、他 ImPACT17-02-01 コラボレーション

日本物理学会第74回年次大会、2019年3月15日、九州大学

PANDORA 検出器と PSD 法を用いた中性子識別:

浜野友哉、東聖人、坂木重仁、若狭智嗣、猪野元大樹、笠原妃奈、平井勇磨

日本物理学会第74回年次大会、2019年3月15日、九州大学

飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による中性子生成機構の研究 I –解析手法–:
東聖人、坂木重仁、浜野友哉、若狭智嗣、猪野元大樹、笠原妃奈、平井勇磨
日本物理学会第74回年次大会、2019年3月15日、九州大学

飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応測定による中性子生成機構の研究 II –反応モデルとの比較–:
坂木重仁、浜野友哉、東聖人、若狭智嗣、猪野元大樹、笠原妃奈、平井勇磨
日本物理学会第74回年次大会、2019年3月15日、九州大学

PANDORA 検出器を用いた ^{11}Li におけるガモフ・テラー遷移の研究:
平位勇磨、若狭智嗣、他 SAMURAI30 コラボレーション
第124回 日本物理学会九州支部例会、2018年12月8日、大分大学

波形弁別による粒子識別と重陽子分解反応による中性子生成の研究:
坂木重仁、若狭智嗣、大城久典、後藤秀兵、密本晋治、猪野元大樹、笠原妃奈、平位勇磨、濱野友哉、東聖人
第124回 日本物理学会九州支部例会、2018年12月8日、大分大学

ヘリウム3分解反応 ($^3\text{He}, n$) の原子核依存性の研究:
笠原妃奈、若狭智嗣、坂口聡志、猪野元大樹、平位勇磨
第124回 日本物理学会九州支部例会、2018年12月8日、大分大学

陽子ノックアウト ($p, 2p$) 反応を用いた原子核の分光学的研究:
密本晋治、若狭智嗣、坂口聡志、関口仁子、前田幸重、大城久典、後藤秀兵
第124回 日本物理学会九州支部例会、2018年12月8日、大分大学

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究

エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造

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

文部省科学研究費補助金、基盤研究(A)

陽子・ヘリウム3散乱による三体力荷電スピン $T = 3/2$ 項の決定

研究分担者：若狭智嗣(研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子)

文部省科学研究費補助金、基盤研究(C)

室温超偏極陽子を用いた新しい不安定核分光法の開発

研究代表者：坂口聡志

文部科学省研究費補助金、研究活動スタート支援

遅発中性子飛行時間測定法による二重魔法数核 ^{78}Ni の研究

研究代表者：郷慎太郎

学部4年生卒業研究

長田茉莉：(指導教員、寺西高)：CsI(Tl)シンチレータとSiPMを用いた陽子検出器の開発

久保大志：(指導教員、寺西高)：タンデム加速器における励起関数測定システムの開発

坂木重仁：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応による中性子生成機構の研究

内藤夏樹：(指導教員、森田浩介)：Li+V反応における融合障壁分布の決定

浜野友哉：(指導教員、若狭智嗣)：PANDORA検出器と波形弁別法(PSD法)を用いた中性子識別の研究

東聖人：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた (d, n) 反応による中性子生成機構の研究

平川貴啓：(指導教員、森田浩介)： $^6\text{Li}+^{51}\text{V}$ 系の光学ポテンシャルの実験的決定

村上郁斗：(指導教員、森田浩介)：超重元素識別のためのデータ解析手法の開発

修士論文

入部弘太郎：(指導教員、寺西高)：低速 RI ビームを用いた ^{93}Zr の陽子誘起反応測定

大城久典：(指導教員、若狭智嗣)：中重核における分光学的手段としての偏極陽子によるノックアウト反応の研究

後藤秀兵：(指導教員、若狭智嗣)：偏極陽子を用いた $(\bar{p}, 2p)$ 反応測定による ^{40}Ca 深部一粒子状態の研究

齋藤堯夫：(指導教員、森田浩介)：重元素識別のためのブラックカーブ検出器の開発

坂東慶伍：(指導教員、森田浩介)：重イオン検出用 MCP-ToF 検出器の開発と ToF-ERDA 法による性能評価

真部健太：(指導教員、森田浩介)： $^{6,7}\text{Li}+^{51}\text{V}$ 準弾性散乱測定による光学ポテンシャルの研究

密本晋治：(指導教員、若狭智嗣)： $(\bar{p}, 2p)$ 反応を用いた ^{16}O における殻効果の破れの研究

学外での学会活動

若狭智嗣：大阪大学核物理研究センター研究計画検討専門委員会委員

坂口聡志：RIBF Users Executive Committee 委員

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

日本放射化学会年会 第 62 回放射化学討論会における発表”MRTOF-MS 用 α -ToF 検出器の性能評価”に対して、若手優秀口頭発表賞を受賞 (庭瀬暁隆)

日本物理学会第 74 回年次大会実行委員 (若狭智嗣・寺西高)

研究会「第10回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会」世話人、2019年3月18-19日(坂口聡志)

研究会「超重元素研究の新展開」世話人、2018年7月30-31日(坂口聡志)

出前講義「新元素「ニホニウム」の発見」玉名高等学校、2018年10月(坂口聡志)

体験入学・実験「物質を透過する粒子線」2019年3月26日(寺西高・田中聖臣)

体験入学・実験「身の回りの放射能体験」2019年3月26日(藤田訓裕・郷慎太郎)

素粒子実験研究室

研究室構成員

川越 清以 教授

東城 順治 准教授 吉岡 瑞樹 (RCAPP) 准教授

織田 勲 助教 音野 瑛俊 (RCAPP) 助教 末原 大幹 助教

《 博士研究員 》

山中 隆志 (特任助教) 小林 大 (特任助教)

《 大学院 博士課程 》

大石 航 調 翔平 中居 勇樹 角 直幸

高田 秀佐 古賀 淳 関谷 泉 山口 尚輝

《 大学院 修士課程 》

眞玉 将豊 上原 英晃 堤 裕樹 橋本 奨平

藤野 主一 三浦 裕 三船 陵子 宮崎 祐太

森 涼介 上杉 悠人 川島 僚介 佐田 智也

出口 遊斗 永野 智也 牧瀬 壮 彌吉 拓哉

Hernandez Barahona Jocsan Ariel

《 学部 卒業研究生 》

菅野 颯人 来見田 将大 後藤 輝一 荘司 大志

松本 岳 森山 健太郎

担当授業

- 川越
基幹物理学 IA (前期)×2、素粒子実験 (後期)
- 東城
物理学の進展 (前期)、物理学ゼミナール (後期)、素粒子物理学 (後期)
- 吉岡
数値計算法 (後期)、原子核・高エネルギー実験学 (後期)

- 織田
物理学総合実験 (通年)、素粒子実験 (後期)
- 末原
自然科学総合実験 (後期)、基礎物理実験学・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、小林 大、調 翔平、山口 尚輝、藤野 主一、宮崎 祐太、彌吉 拓哉、Hernandez Barahona Jocsan Ariel)

スイス・ジュネーブ郊外にある欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、ATLAS 実験を推進している。LHC 加速器では、2015 年から設計値に重心系エネルギー 13 TeV での運転を再開し、2018 年に実験第二期である Run2 を完了した。2018 年 1 月からは、加速器整備・検出器アップグレードのため、二年間のシャットダウン期間を設ける。その後、現行実験の最終段階である第三期 Run3 を遂行し、大規模な加速器増強・検出器アップグレードを経て、さらにエネルギーフロンティア物理を推進する計画である。今年度は、Run2 におけるシリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良、ヒッグス粒子の性質の研究、新粒子の探索、検出器アップグレード計画を遂行した。

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

ビーム衝突点から発生する多数の荷電粒子の検出において、ATLAS 検出器最内層に配置した内部飛跡検出器が重要な役割を果たす。我々のグループは、内部飛跡検出器の 1 つであるシリコン半導体飛跡検出器 (Semiconductor Tracker : SCT) の運転に精力的に取り組んできた。SCT 検出器の運転に参加する国内研究機関の中で、九州大学は唯一スタッフが CERN に常駐する大学である。2013 年までは東城が国内研究機関が連携して研究を進める上での中心となり、それ以降は音野がその役割を引き継いでいる。音野は、2013 年 11 月より SCT data quality coordinator を務め、2015 年から始まった LHC の運転においてビーム衝突時における SCT 検出器の性能評価を行い、順調なデータ取得を実現した。2016 年 2 月から、織田が SCT 検出器の offline software coordinator を務め、検出器ソフトウェア全般において責任を持っている。音野は 2016 年 6 月から SCT 検出器の副運転責任者、2017 年 1 月から 10 月まで運転責任者を務めた。2018 年末までの Run2 において、

LHC の単位時間あたりの陽子同士の同時衝突数（瞬間輝度）は $21.0 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ に到達し、設計値 $10 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ を大きく超えて、3 年間で 156 fb^{-1} のデータを供給した。検出器にとっては厳しい環境の中、SCT が原因で取得できなかったデータの割合は 0.1% 以下、取得データのうち SCT の問題で物理解析に使用できなかった割合も 0.1% 以下に留めることができた。ATLAS 実験全体としてのこれらの割合は、5.7% 及び 5.4% であることから SCT が優れた性能を発揮できていることがわかる。我々のグループは、今後も引き続き SCT 検出器に高い性能を発揮させるべく、その運転に大きく貢献してゆく予定である。

- **ヒッグス粒子の性質の研究 (織田 勸)**

ヒッグス粒子が Z 粒子対に崩壊し、各 Z 粒子がレプトン (ℓ , 電子またはミューオン) 対に崩壊する、4 レプトンチャンネル ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$) には背景事象が少なく、ヒッグス粒子を完全に再構成できるという利点がある。織田は DAOD と呼ばれる解析用データの作成を担当した。2017 年 11 月までに取得した積分ルミノシティ 79.8 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 2018 年 6 月に公表した。4 レプトンチャンネルでは、4 レプトンの質量が $115 \text{ GeV} < m_{4\ell} < 130 \text{ GeV}$ の範囲に 195 事象を観測した。 ZZ^* への崩壊分岐比を含めた、ヒッグス粒子のグルーオン融合過程による生成断面積は $1.22 \pm 0.18 \text{ pb}$ であり、素粒子の標準模型に基づく理論計算の結果 $1.17 \pm 0.08 \text{ pb}$ と一致した。ベクトルボソン融合過程による生成断面積の観測値は $0.25 \pm 0.09 \text{ pb}$ であり、理論値 $0.0917 \pm 0.0028 \text{ pb}$ に比べて 2σ 程度大きい。2018 年 10 月までに積分ルミノシティ約 140 fb^{-1} のデータを取得し、その解析を進めており、不定性を低減できることが期待される。

- **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、論文は2018年3月に Physics Review D 誌より出版している。調は右巻きニュートリノに着目し、探索を開始した。右巻きニュートリノもダークマターの候補となり、同時にニュートリノの質量や宇宙のバリオン非対称性に説明を与えることができる。特に質量領域 2 - 30 GeV の右巻きニュートリノは長寿命となる。音野らの探索とは異なる終状態を持つため独自の発展が必要ではあるが、事象の再構成効率や背景事象の見積もり、系統誤差の評価などについて日本物理学会で報告し、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、小林 大、調 翔平、山口 尚輝、藤野 主一、宮崎 祐太、彌吉 拓哉、Hernandez Barahona Jocsan Ariel)

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 ATLAS 実験に提供する予定である。その後、加速器増強により瞬間ルミノシティを $(5 - 7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に向上させ、2026 年から高ルミノシティ LHC (HL-LHC) として再稼働させる計画である。HL-LHC 計画に向けて、ATLAS 実験では検出器アップグレード計画を遂行している。我々のグループは、現行の内部飛跡検出器 (ID) を高放射線耐性シリコン検出器 (ITk) にアップグレードする計画に参画している。ITk 検出器のうち、特に、新型のシリコンピクセル検出器の開発・製作を担当している。シリコンピクセル検出器は、センサー・読み出しチップ (ASIC) をバンプボンディング接合したセンサーモジュール、ASIC 制御用のフレキシブル基板、冷却機構との接触部である TPG セル、の 3 つの構成要素を持つ。検出器組立の開発要素として、放射線耐性、高位置精度の接着、ワイヤーボンディング、ワイヤー保護のための樹脂封止、放電抑制のためのパリレンコーティング、品質管理のための検出器読み出し手法がある。放射線耐性については、東北大学 CYRIC 加速器施設の陽子ビームを用い、陽子線照射による検出器部材の性質を研究した。特に、接着剤・封止剤については、海外共同研究者とも協力して多くの知見を得た。最終的な選定には至らなかったが、今後もこの研究を重視して、実機仕様の決定まで進める計画である。組立における接着では、ステンシル法の開発を進めてきた。ステンシル法は、レーザー加工でステンレスシートにパターンを形成し、そのシートを用いて塗布を行う手法であり、量

産に向いている。多様なパターンを試みて、最小物質量・接着剤の厚み・一様性・気泡排除等の要求を満たすことを実証してきた。高位置精度の組立では、治具の開発が重要である。高精度機械加工により治具試作機を製作・改良し、繰り返し位置精度の要求値である 30 μm 以内を達成することに成功した。この結果を受けて、接着・組立手法について、ITk ピクセル検出器全体で我々のグループが開発した手法が標準手法として採用された。検出器読み出しは、国内共同研究者と協力して、Xilinx 社 KC705 評価ボードを用いた環境を整備した。組立工程における動作の実証、熱サイクル試験における耐性等で検出器の読み出しを行うことが可能となり、検出器開発・製作全体が大幅に進展した。今後、最終仕様の検出器に向けた開発・製作を進めるとともに、CERN 現地での ITk ピクセル検出器全体の組立に活動を広げていく予定である。

国際リニアコライダー計画 (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、関谷 泉、三浦 裕、森 涼介、出口 遊人、上杉 悠斗)

次世代加速器実験計画「国際リニアコライダー」(ILC) のための物理と測定器の研究を行っている。測定器の開発においては、ILC 電磁カロリメータで用いる読み出し回路の開発および新型センサーの開発、プロトタイプの改良および試験を行った。物理においては、主に 2 フェルミオン終状態の精密測定による新物理発見感度の検討を行った。

- **シリコン電磁カロリメータ読み出し ASIC の性能評価およびプロトタイプ開発** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、関谷 泉、三浦 裕、出口 遊人)

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。本年度は、前年度末に設計した新型プロトタイプの製作・組み立てを行った。プロトタイプの回路基板とセンサーの接続は、新たに導入した接着剤自動塗布装置と二液式導電性接着剤を用いて行った。組み立てのジグ設計・製作や塗布量の最適化を行い、5 台のプロトタイプ組み立てに成功した。その際には前年度開発した ASIC 評価システムを改良して新たに 64 チップを選定し、組み立てに利用した。ドイツの DESY 研究所およびスイスの CERN 研究所にてフランスの研究チームと合同でビームテストを行い、ビームからの信号の読み出しおよび今回接着した厚いシリコンセンサーが従来より高い信号雑音比で粒子からの信号読み出しができることを確認した。

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

ILCの電磁カロリメータは、ジェット中の粒子を分離しエネルギー分解能を高めるため、微細分割されたカロリメータとなっている。センサーに用いるシリコンパッド検出器のオプションとして、高時間分解能および高位置分解能(のいずれか)を持たせたセンサーの研究を行っている。高位置分解能センサーにはLGADと呼ばれるアバランシェゲインを持つセンサーを用いる。本年はLGADと同じ構造を持つ光検出器APDの放射線測定を行うため、ASIC評価システムにセンサーを接続するセットアップしセンサーの評価に用いるシステムを構築した。APDを接続して、放射線源を用いて信号を確認した。また、高位置分解能センサーにはPSDと呼ばれる1つのパッドに対し複数の電極から読み出し抵抗分割により位置感度を得る方法を検討している。本年度は昨年度製作したセンサーをAPDと同様の方法で読み出し、レーザー光による測定にて複数の仕様間での特性の違いを測定し、高抵抗のサンプルにて理論値に近い信号分離比を達成した。

● **ILCにおける2フェルミオン終状態の精密測定を用いた新物理探索感度の研究** (川越 清以、吉岡 瑞樹、末原 大幹、出口 遊人、上杉 悠斗)

ILCにおける2フェルミオン終状態の断面積および生成角度分布を精密に測定し新物理探索感度を得る方法の研究を行っている。本年度は、昨年度の評価結果を更に改善するために、新物理探索性能を評価するアルゴリズムの改良と、2クォーク終状態において重要となるクォーク電荷測定法の詳細な解析を行った。新物理評価アルゴリズムにおいては、各種の新物理モデルを仮定し、トイモンテカルロ法によりより信頼性の高い方法で探索性能の評価を行い、従来よりも強い制限をつけることに成功した。クォーク電荷測定法においては、重いクォークの崩壊による場合分けを行い、各崩壊モードにおいてどのような改善を行う必要があるかの詳細な研究を行った。

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、大石 航、橋本 奨平、宮崎 祐太、川島 僚介)

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

- **Phase-I トリガー検出器の開発** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、宮崎 祐太)

Phase-I の物理測定では、円筒型ドリフトチェンバーとトリガー検出器を組み合わせた検出器システムが主要な役割を果たす。我々のグループは、トリガー検出器の開発を進めている。信号の電子をトリガーするため、UV アクリルを電子同定用チェレンコフ輻射体として用いる。さらに、信号-雑音比とタイミング情報を向上させる得るため、プラスチックシンチレータを組み合わせる。光検出器にはファインメッシュ型光電子増倍管 (FM-PMT) を用い、その後段には前置増幅回路を設置する。今年度は、昨年度に引き続き、プロトタイプ検出器の開発を進めた。特に、前置増幅回路、放射線耐性、検出器筐体の設計に重点を置いた。前置増幅回路の開発では、レギュレータ等電子回路部品の放射線耐性が問題となる。神戸大学のタンデム加速器施設における中性子、及び、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放射線耐性試験を行い、その結果に基づいて、前置増幅回路の改良と試作機の製作を行った。部品の放射線耐性の問題、及び、前置増幅回路のさらなる改良の余地が課題として残されており、性能評価試験を含めて取り組んでいく予定である。また、前置増幅器の信号を用いてトリガーを生成し、信号の読み出しも行うため、トリガー回路 COTTRI の開発も進めた。特に、前置増幅器との整合性の研究、及び、COTTRI を動作させるファームウェアの開発を行った COTTRI 試作機を用いた性能評価により、Phase-I で要求するレート耐性とトリガー効率を持つことを示した。トリガー検出器全体の設計も大きく進展した。検出器全体を配置・支持し、実験環境下における背景事象に対する遮蔽、ミューオン静止標的部のヘリウムに対する遮蔽を兼ね備えた設計を行った。今後、試作機を製作し、検出器の組立を研究する予定である。

- **電磁カロリメータの開発** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、大石 航、橋本 奨平、川島 僚介)

Phase-I におけるミューオンビームの研究、及び、Phase-II の物理測定では、ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータ (ECAL) を用いる計画である。我々のグループは、ECAL 検出器の開発を進めている。ECAL 検出器は、高計数率環境下で信号電子のエネルギーを測定し、事象トリガーを生成するために重要な役割を果たす。磁場がある真空中で動作させ、高いエネルギー分解能と速い時間応答を必要とするため、LYSO 結晶をアバランシェ・フォトダイオード (APD) で読み出す。これまでの開発では、LYSO 結晶を選定し、

ほぼ実機仕様である試作機を開発・製作して、東北大学電子光理学研究センターにおいてビーム試験を行ってきた。ビーム試験では、ストローチューブ飛跡検出器の試作機も導入し、両検出器を組み合わせて性能評価を行った。今年度はビーム試験のデータ解析を完了させた。その結果、ECAL 検出器のエネルギー分解能・位置分解能・時間応答、及び、ストローチューブ飛跡検出器の位置分解能が要求性能を満たすことを示した。さらに、ECAL 検出器のトリガー性能を本実験を想定したシミュレーションを用いて研究した。レート耐性・トリガー効率の性能で十分要求を満たすことを示した。最適化の余地が残されているため、引き続き検討を行う予定である。また、ECAL 検出器の試作機を用いて、較正手法の研究を行った。宇宙線による較正は信頼性がある一方、低レートのために較正の時間変動を追跡するには不向きである。そこで、ECAL 検出器を構成するモジュール内に実装した LED を発光させて較正を行い、宇宙線による較正と同等の結果を得られることを示した。実機建設に向けて、低コスト化を図るために、比較的安価な LYSO 結晶を入手して、その基礎的性能を実験室で測定を行った。その結果、試作機に用いたベースラインとする LYSO 結晶とほぼ同等の性能を持つことを示した。APD 光検出器の読み出しでは、波形記録回路の試作機の性能評価を完了させ、改良を加えた試作機を製作した。性能評価は良好な結果を示しつつ、進行中である。今後、検出器モジュール構造・前置増幅器・真空フィードスルー回路も含めて、残る開発を完了させ、実機の設計・建設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、山中 隆志、眞玉 将豊、堤 裕樹、佐田 智也)

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) を測定するため、J-PARC E34 実験を国際共同研究で進めている。 $g-2$ の測定は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E821 実験が 0.54 ppm の精度で素粒子標準模型 (SM) から 3.3σ のずれを発表し、その結果は SM を超える物理 (BSM) の探索で重要な位置を占めている。また、EDM の測定は、BNL E821 実験が $1.9 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$ の上限値を与えた。有限の EDM は時間反転対称性を破るため、CPT 定理を仮定すれば CP 非保存を意味し、それを生み出す BSM の存在を示唆する。本実験では、極冷ミュ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手法を用いる。その手法により、 $g-2$ を 0.1 ppm の精度で、EDM を $10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の感度で、それぞれを分離して測定する計画である。我々のグループは、本実験に用

いるシリコンストリップ検出器を開発している。

- **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、山中 隆志、堤 裕樹）

シリコンストリップ検出器は、ミューオンを蓄積する磁場内に設置し、ミューオンの崩壊で生成される陽電子の飛跡をヒット情報から再構成する。平均ヒット計数率は1ストリップあたり1.4 MHz から二桁低い領域まで変動する。その環境下で計数率に対して安定であり、高検出効率が要求される。我々のグループは、その検出器に用いる読み出しチップ (ASIC) の開発を進めている。これまでに、64チャンネルのアナログチップ Slit2013、128チャンネルのアナログ部 Slit2014 とデジタル部 GM2DV2 の混載チップ SliT128A、Slit2014 に改良を加えたアナログチップ SliT2016TEG を開発・製作した。SliT2016TEG では、SliT128A で要求を満たさなかったタイムウォークの性能を改善するために、微分回路を導入してゼロクロッシングを用いる。その性能評価のため、評価基板を設計・製作し、ベアチップ実装をワイヤーボンディングにより行った。性能評価を完了させ、タイムウォークの要求を満たすことを示した。一方、残る課題としてノイズの増加・バイアス供給等があり、回路シミュレーションを用いた開発・設計を進め、アナログ・デジタル混載チップ SliT128B を製作した。今後、性能評価を進めていく予定である。また、ASIC の量産化に向けて、検査システムの開発にも着手した。ASIC を量産して検出器に組み込む前に、多くのチップの中から良品を選定する必要がある。また、ウェハーあたりの良品率を知ることも量産化には必要である。プローブステーションに設置する ASIC 単体、または、ウェハー上の ASIC をプローブカードでコンタクトし、電源供給・制御・読み出しを行うことにより、動作試験を行う。ASIC には、現時点で利用できる試作機の SliT128A を用いた。比較的多ピンのプローブカードを製作し、検査システムを構築することに成功した。今後、最終版の ASIC に合わせた修正を行う予定である。

- **検出器試作機の開発**（川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志、佐田 智也）

シリコンストリップ検出器の実機に向けた試作機の開発を進めている。検出器の構成要素として、シリコンセンサーはその開発で一定の完成を収め、量産を開始した。読み出し ASIC は SliT128A の開発までは完了し、それを改良した次期チップの設計・製作を進めている。センサーと ASIC の接続には、銅-ポリイミドの大型・高密度フレキシブル基板 (FPC) を用いる。センサー部に用いる FPC は、設計・試作・評価を経て開発を完了し、量産も完了し

た。ASIC を搭載する FPC は多層であり、表面実装部品も含めて実装度が高い。基板レイアウトの概念設計を完了させ、最終版の ASIC に合わせて設計をさらに進める予定である。センサー部 FPC と ASIC 部 FPC の接続にも、ピッチ変換をするための FPC を用いる。技術限界レベルの狭ピッチであり、ライン数が非常に多いため、FPC の製作技術としては、難易度が高い。すでに試作機の開発には成功しているが、量産化に向けた製作工程を確立するため、さらに次期試作機の開発を行う予定である。検出器全体は複数のベーン構造から構成される。低物質量のベーンと支持構造体の設計・試作機の開発も並行して進めている。ベーン数は、現実的な支持構造体の設計とシミュレーションによる性能評価により決めた。また、ベーンの試作機を製作し、センサーの接着等組み立て手法の研究にも着手した。主にセンサーと ASIC を組み合わせた検出器の性能評価のため、センサー 1 枚を用いた試作機も製作し、性能評価を行った。MLF 実験施設でミュオニウムの超微細構造を精密測定する MuSEUM 実験では、ミュオニウムからの崩壊陽電子を検出するための検出器が必要である。実験は進行中であるが、さらに高精度を目指した高レート測定を計画している。検出器試作機は MuSEUM 実験で活用することができるため、本実験のビームタイムで検出器試作機を導入し、開発したデータ収集システムとも合わせて、そのオペレーションに成功した。

- **本実験の実現に向けた技術設計書** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志、堤 裕樹、佐田 智也)

本実験の実現のためには、高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所の原子核素粒子共同利用実験審査委員会、及び、同機構・物質構造科学研究所のミュオン共同利用実験審査委員会のそれぞれにおいて、本実験の提案に対して stage-1, stage-2 の二段階で審査を受け、採択を得る必要がある。本実験の提案では、新しい原理を用いた測定を実現するため、開発を必要とする新しい技術を多数導入している。採択を得るためには、実験全体の原理・技術・計画で確度が高い技術設計書を完成させ、各員会に提出して審査を受ける必要がある。昨年度までに各委員会から stage-1 の採択を得ていた。今年度は、技術設計書を完成させ、各員会で stage-2 の採択を得ることができた。技術設計書の完成に向けて、特に検出器・ソフトウェア・シミュレーションによる最適化・系統誤差評価の課題を重点的に検討し、その執筆を行った。さらに、技術設計書を要約した論文を執筆し、論文誌に提出した。この活動により、本実験の実現に向けて大きく進展したこととなる。

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

宇宙線ミュオンを用いたミュオンラジオグラフィーは、構造体を透過するミュオンを検出し、その強度分布から構造体の密度を測定する手法である。近年、この手法により火山内部を視覚化に成功し、また、原子炉・氷河・ピラミッド等へも応用が拡がり注目を集めている。九州大学は、総合的な火山専門教育を実施して火山研究者の育成と新分野の創出を目的とした「実践的火山専門教育拠点」を設置した。理学研究院の物理・化学・生物・地球惑星科学部門、及び、理学研究院附属地震火山観測研究センター (SEVO) が協力して拠点を形成している。その活動の一環として、我々のグループは、ミュオンラジオグラフィーに用いる検出器の開発と実際の観測への応用を目指している。

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

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

- **阿蘇・米塚の観測** (川越 清以、東城 順治、中居 勇樹)

ミュオンラジオグラフィー検出器の開発を進めるとともに、実際の観測に向けた情報収集を行ってきた。当初は、協力体制にあるSEVOが長崎県島原市に所在することもあり、雲仙岳の平成新山溶岩ドームを観測対象として

検討を開始した。雲仙岳は、気象庁によりランク A (特に活動度が高い火山) として分類され、防災上の監視体制にある。火山研究の研究対象としても重要視されている。複数の観測地点候補を視察し、設置条件・電源確保・視野の面から観測地点候補を選定したが、シミュレーションによる研究から実際の観測が難しいことが分かった。そこで、同様の観点から研究対象を阿蘇・米塚とすることとした。米塚は、約 3000 年前に形成された高さ約 80 m の典型的なスコリア丘であり、景観が美しいことで有名である。内部構造は、ミュオンラジオグラフィー以外の手法による研究も行われてきたが、自明ではないため研究対象としても大変興味深い。米塚は、環境省が管轄する阿蘇くじゅう国立公園内にあり、文化庁が指定する天然記念物である。その観測に向けて、阿蘇市教育委員会との協力を得て、阿蘇市・熊本県・文化庁・環境省との調整を開始した。来年度の観測に向けて、準備を進める予定である。

中性子を用いた基礎物理 (吉岡 瑞樹、角 直幸、高田 秀佐、古賀 淳、上原 英晃、永野 智也、牧瀬 壮)

- **高精度中性子崩壊寿命測定実験** (吉岡 瑞樹、角 直幸、上原 英晃、永野 智也)

我々は茨城県東海村の J-PARC 加速器を用いて中性子崩壊寿命を高精度で測定する実験を推進している。中性子寿命を導出するためには入射中性子の流量と β 崩壊の量を知る必要があるが、これまで行われてきた実験では中性子と蓄積容器壁面との相互作用や流量に関する系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験では入射中性子流量と β 崩壊電子をガス検出器である Time Projection Chamber (TPC) で同時測定することにより、これまでの実験に伴っていた系統誤差を回避することが可能となる。我々は、この新たな手法を用いて 0.1% の精度で中性子の寿命を測定することを目指している。本年度はデータ収集を引き続き行い、また、既取得データの解析を行なった。データ解析より、検出器動作ガスで散乱された中性子が検出器壁面の LiF に衝突することにより放出されたガンマ線が叩き出すコンプトン電子が主要な背景事象 (以下、ガス起因事象) であることが判明している。ガス起因事象を低減するために低い動作ガス圧でのデータ取得を検討しており、低ガス圧でのデータ取得で必須となる低発熱信号増幅器の開発および試験を引き続き行った。並行して、ソレノイド磁場を用いてガス起因事象を低減する新規実験の検討を行っている。昨年度作製した試作機の動作試験より所期の性能を満たしていることが分かったため、本年度は実機の作製を集中的に行った。

九州大学で作製した実機の動作試験を行い、良好な性能を示した。次年度はソレノイド磁石がある高エネルギー加速器研究機構に検出器実機を輸送し、統合試験を行う予定である。また、ソレノイド磁場が本実験現場周辺の電子機器に与える影響をシミュレーションにより見積もり、その対策として磁気遮蔽体の設計を行った。次年度に遮蔽体の作製およびJ-PARC ビームラインへの設置を予定している。

- **複合核状態における時間反転対称性の破れの探索実験**（吉岡 瑞樹、高田 秀佐、古賀 淳、牧瀬 壮）

中性子吸収反応による複合核共鳴状態では部分波干渉によって空間反転対称性の破れが極めて大きく観測される場合が存在する。時間反転対称性の破れについても同様の増幅効果が現れる可能性が理論的に示唆されており、中性子の電気双極子能率探索実験を超えた感度を持ちうる。本実験は茨城県東海村のJ-PARCにて行う計画だが、現在はJ-PARC/MLF/BL04で取得したデータによる標的核の選定および各種デバイス開発を行っている。本年度は、標的核候補の一つであるスズおよびカドミウムのデータ取得およびデータ解析を行った。今後はより詳細な解析ののち、未知パラメータの決定を目指す。並行して、光三重励起状態を用いた動的核偏極法による中性子偏極装置の開発を行っている。本年度は作製した結晶の偏極実験を行った。また、装置一式を理化学研究所の小型中性子発生ビームラインに設置し、中性子照射試験を行った。現在、取得データの解析を行っている。また、九州大学にて同様の動的核偏極装置の整備を行っている。電磁石、レーザーの設置および動作確認を行い、続いて陽子による核磁気共鳴の確認を目指している。

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

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

発表論文

《原著論文》

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Properties of $g \rightarrow b\bar{b}$ at small opening angles in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **99**, 052004 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using 2015 - 2016 LHC proton-proton collision data,” JINST **14**, P03017 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived multicharged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 052003 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the hard double-parton scattering contribution to inclusive four-lepton production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **790**, 595 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS muon spectrometer,” Phys. Rev. D **99**, 052005 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for four-top-quark production in the single-lepton and opposite-sign dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 052009 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run 2 data collected in 2015 and 2016,” Eur. Phys. J. C **79**, 205 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton+jets channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data and combination with previous results,” Eur. Phys. J. C **79**, 290 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with two charged leptons and

two jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1901**, 016 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of photon-jet transverse momentum correlations in 5.02 TeV Pb + Pb and pp collisions with ATLAS,” Phys. Lett. B **789**, 167 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for pairs of highly collimated photon-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 012008 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **789**, 508 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with hadronically decaying τ -leptons, jets, and missing transverse momentum using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 012009 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy charged long-lived particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using an ionisation measurement with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **788**, 96 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived particles in final states with displaced dimuon vertices in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, 012001 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly charged scalar bosons decaying into same-sign W boson pairs with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 58 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, 191801 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for vector-boson resonances decaying to a top quark and bottom quark in the lepton plus jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **788**, 347 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “In situ calibration of large-radius jet energy and mass in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, 135 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A strategy for a general search for new phenomena using data-derived signal regions and its application within the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **79**, 120 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Correlated long-range mixed-harmonic fluctuations measured in pp , p +Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **789**, 444 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into a pair of light bosons in the $bb\mu\mu$ final state in pp collision at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **790**, 1 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the nuclear modification factor for inclusive jets in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **790**, 108 (2019).

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,” JHEP **1901**, 030 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light resonances decaying to boosted quark pairs and produced in association with a photon or a jet in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **788**, 316 (2019).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $Z\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ production

cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings,” JHEP **1812**, 010 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison between simulated and observed LHC beam backgrounds in the ATLAS experiment at $E_{\text{beam}} = 4$ TeV,” JINST **13**, P12006 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ decays and VH production with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **786**, 59 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the azimuthal anisotropy of charged particles produced in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, 997 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1811**, 085 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of the searches for pair-produced vector-like partners of the third-generation quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, 211801 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using 36 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 052008 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying into hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 092005 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on off-shell Higgs boson production and the Higgs boson total width in $ZZ \rightarrow 4\ell$ and $ZZ \rightarrow 2\ell 2\nu$ final states with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **786**, 223 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 191801 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with same-charge leptons and b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1812**, 039 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in events with a hadronically decaying vector boson and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1810**, 180 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs bosons produced via vector-boson fusion and decaying into bottom quark pairs in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 052003 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $\gamma\gamma WW^*$ channel using pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 1007 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm\nu_\tau$ in the τ +jets and τ +lepton final states with 36 fb^{-1} of pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *JHEP* **1809**, 139 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavor violation in different-flavor, high-mass final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 092008 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Prompt and non-prompt J/ψ elliptic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 784 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ final state with 13 TeV pp collision data collected by the ATLAS experiment,” *JHEP* **1811**, 040 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for exclusive Higgs and Z boson decays into $J/\psi\gamma$, $\psi(2S)\gamma$, and $\Upsilon(nS)\gamma$ at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **786**, 134 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair- and single-production of vector-like quarks in final states with at least one Z boson decaying into a pair of electrons or muons in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **98**, 112010 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of centrality-dependent acoplanarity for muon pairs produced via two-photon scattering in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 212301 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying into two spin-zero particles in the $H \rightarrow aa \rightarrow 4b$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1810**, 031 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the quantum interference between singly and doubly resonant top-quark production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 152002 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of higgsinos in final states with at least three b -tagged jets in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 092002 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation and performance of the ATLAS Tile Calorimeter in Run 1,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 987 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino-neutralino production using recursive jigsaw reconstruction in final states with two or three charged leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 092012 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying into high- p_T W bosons and top quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1808**, 048 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant WZ production in the fully leptonic final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **787**, 68 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **784**, 173 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels with $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **784**, 345 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena using the invariant mass distribution of same-flavour opposite-sign dilepton pairs in events with missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, 625 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurement of differential and total cross sections in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channels at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **786**, 114 (2018).

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. Rev. D **98**, 032016 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet fragmentation in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **98**, 024908 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the suppression and az-

imuthal anisotropy of muons from heavy-flavor decays in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **98**, 044905 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of dijet azimuthal decorrelations in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and determination of the strong coupling,” Phys. Rev. D **98**, 092004 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Angular analysis of $B_d^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1810**, 047 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Prompt and non-prompt J/ψ and $\psi(2S)$ suppression at high transverse momentum in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **78**, 762 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavor-changing neutral currents in top quark decays $t \rightarrow Hc$ and $t \rightarrow Hu$ in multilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 032002 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of colour flow using jet-pull observables in $t\bar{t}$ events with the ATLAS experiment at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **78**, 847 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with charm jets and missing transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1809**, 050 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a photon and a hadronically decaying $Z/W/H$ boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 032015 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of b-jet tagging efficiency with the ATLAS detector using $t\bar{t}$ events at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **1808**, 089 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles decaying into top-quark pairs using lepton-plus-jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$

TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 565 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for lepton-flavor-violating decays of the Z boson into a τ -lepton and a light lepton with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 092010 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for R-parity-violating supersymmetric particles in multi-jet final states produced in p - p collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B* **785**, 136 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **98**, 032009 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for low-mass dijet resonances using trigger-level jets with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 081801 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a heavy Higgs boson decaying into a Z boson and another heavy Higgs boson in the $\ell\ell b\bar{b}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **783**, 392 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into pairs of light (pseudo)scalar particles in the $\gamma\gamma jj$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **782**, 750 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks decaying to tau sleptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 032008 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral current top-quark decays $t \rightarrow qZ$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1807**, 176 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of up-type

vector-like quarks and for four-top-quark events in final states with multiple b -jets with the ATLAS detector,” JHEP **1807**, 089 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of supersymmetric particles in final states with two or three leptons at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, 995 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **78**, 903 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross sections of top quark pair production in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” JHEP **1810**, 159 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Decay of the Higgs Boson to Charm Quarks with the ATLAS Experiment,” Phys. Rev. Lett. **120**, 211802 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 052005 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays to beyond-the-Standard-Model light bosons in four-lepton events with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **1806**, 166 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for photonic signatures of gauge-mediated supersymmetry in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **97**, 092006 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a Structure in the $B_s^0 \pi^\pm$ Invariant Mass Spectrum with the ATLAS Experiment,” Phys. Rev. Lett. **120**, 202007 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for $W' \rightarrow tb$ decays in the hadronic final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett.

B **781**, 327 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for High-Mass Resonances Decaying to $\tau\nu$ in pp Collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **120**, 161802 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $t\bar{t}$ differential cross-sections of highly boosted top quarks decaying to all-hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 012003 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross section for isolated-photon plus jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **780**, 578 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a $b\bar{b}$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **97**, 072016 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **97**, 072003 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section of three isolated photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **781**, 55 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive and fiducial $t\bar{t}$ production cross-sections in the lepton+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, 487 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy ZZ resonances in the $\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ and $\ell^+\ell^-\nu\bar{\nu}$ final states using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, 293 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exclusive Higgs and Z boson

decays to $\phi\gamma$ and $\rho\gamma$ with the ATLAS detector,” JHEP **1807**, 127 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ pp collision data with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **97**, 112001 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” JHEP **1806**, 022 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-squark pair production in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ pp collision data with the ATLAS detector,” JHEP **1806**, 108 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Soft-Drop Jet Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, 092001 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections and W^+/W^- cross-section ratios for W boson production in association with jets at $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” JHEP **1805**, 077 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of inclusive jet and dijet cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” JHEP **1805**, 195 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and multiple b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” JHEP **1806**, 107 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a Z boson in proton-proton collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **780**, 557 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “ $ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ cross-section measure-

ments and search for anomalous triple gauge couplings in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **97**, 032005 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for resonances decaying into a Higgs boson and a new particle X in the $XH \rightarrow qqbb$ final state with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **779**, 24 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Combination of inclusive and differential $t\bar{t}$ charge asymmetry measurements using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV,” *JHEP* **1804**, 033 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new heavy gauge boson resonance decaying into a lepton and missing transverse momentum in 36 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 401 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet fragmentation in 5.02 TeV proton-lead and proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Nucl. Phys. A* **978**, 65 (2018).

H. Fukuda, N. Nagata, H. Otono and S. Shirai, “Higgsino Dark Matter or Not: Role of Disappearing Track Searches at the LHC and Future Colliders,” *Phys. Lett. B* **781**, 306 (2018).

H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, “Searching for Metastable Particles with Sub-Millimeter Displaced Vertices at Hadron Colliders,” *JHEP* **1806**, 112 (2018).

I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono and R. Ruiz De Austri, “Looking for the left sneutrino LSP with displaced-vertex searches,” *Phys. Rev. D* **98**, 075004 (2018).

J. Repond *et al.* [CALICE Collaboration], “Hadronic energy resolution of a combined high granularity scintillator calorimeter system”, 2018 JINST **13** P12022.

S. Belokin, K. Kawagoe, Y. Miura, I. Sekiya, T. Suehara, H. Yamashiro, T. Yoshioka *et al.*, “Commissioning of the highly granular SiW-ECAL technological prototype”, arXiv:1810.05133, AIDA-2020-PUB-2019-002.

M. Chefdeville *et al.* [CALICE Collaboration], “Analysis of Testbeam Data of the Highly Granular RPC-Steel CALICE Digital Hadron Calorimeter and Validation of Geant4 Monte Carlo Models”, arXiv:1901.08818, CALICE-PUB-2019-001.

Y. Uesugi, H. Yamashiro, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe, “Quark charge identification for e^+e^- to $q\bar{q}$ study”, Proc. LCWS2018, arXiv:1902.05242.

Yuto Deguchi, Hiroaki Yamashiro, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Keisuke Fujii, Kiyotomo Kawagoe, “Study of fermion pair events at the 250 GeV ILC”, Proc. LCWS2018, arXiv:1902.05245.

G. Eigen *et al.* [CALICE Collaboration], “Tracks of hadronic showers in the CALICE Si-W ECAL physics prototype”, arXiv:1902.06161, CALICE-PUB-2019-002.

M. Abe *et al.* [J-PARC Muon $g-2$ /EDM Collaboration], “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment”, arXiv:1901.03047 [physics.ins-det], 1 (2019).

東城順治, “九州大学におけるミュオンラジオグラフィによる火山研究の幕開け”, 日本中間子学会誌「めそん」No. 47, 29 (2018).

T. Okudaira, S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, “Measurement of Angular Distributions in $^{139}\text{La}(n,\gamma)$ Reaction for T Violation Search”, JPS Conf. Proc. 22, 011041 (2018).

N. Oi, T. Yoshioka *et al.*, “A Search for Possible Deviations from Newtonian Gravity at the nm Length Scale Using Neutron-Noble Gas Scattering”, JPS Conf. Proc. 22, 011039 (2018).

N. Sumi, T. Yoshioka *et al.*, “Precise Neutron Lifetime Measurement with a Solenoidal Coil”, JPS Conf. Proc. 22, 011036 (2018).

J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, "Measurement of (n, γ) reaction of ^{117}Sn for T-violation search by using compound nucleus", JPS Conf. Proc. 22, 011035 (2018).

M. Kitaguchi, J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, "Fundamental Physics Using High-Performance Optics", JPS Conf. Proc. 22, 011034 (2018).

K. Mishima, J. Koga, N. Sumi, S. Takada, T. Tomita, T. Yoshioka *et al.*, "Fundamental physics activities with pulsed neutron at J-PARC (BL05)", JPS Conf. Proc. 22, 011033 (2018).

S. Endo, S. Takasa, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, "Development of High-Counting-Rate Neutron Detector for CP-violation Search in Neutron-Induced Reactions", JPS Conf. Proc. 22, 011021 (2018).

T. Yamamoto, S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, "Development of a neutron spin filter for a T violation search in compound nuclei", JPS Conf. Proc. 22, 011011 (2018).

R. Katayama, T. Yoshioka *et al.*, "Development of new neutron mirrors for measuring the neutron electric dipole moment", JPS Conf. Proc. 22, 011009 (2018).

《Proceedings》

講演

《海外での講演》

Module Development for the Phase-2 ATLAS ITk Pixel Upgrade :

Dai Kobayashi

International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2018), December 2018, Taipei, Taiwan

Search for New Physics through the Reconstruction of Challenging Signatures with the ATLAS detector :

Shohei Shirabe

26th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY2018), July 2018, Barcelona, Spain

Precise measurement of two-fermion final states in 250 GeV ILC for BSM :

T. Suehara, H. Yamashiro

Asian Linear Collider Workshop, May 2018, Fukuoka, Japan

Preparation and performance study of a new short slab for ILD SiW-ECAL :

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

Asian Linear Collider Workshop, May 2018, Fukuoka, Japan

First look at the FEV13 results from DESY-2018 BT :

T. Suehara, Y. Deguchi, Y. Miura, I. Sekiya, Y. Uesugi

CALICE Collaboration Meeting, September 2018, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China

Research on silicon sensor to introduce LGAD to Si-ECAL :

R. Mori, K. Kawagoe, T. Yoshioka, T. Suehara

CALICE Collaboration Meeting, September 2018, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China

Development of SiW-ECAL technological prototype for the International Large Detector :

Yu Miura on behalf of the CALICE SiW-ECAL group

IEEE NSS-MIC 2018, October 2018, Sydney, Australia

Development of a Position Sensitive silicon Detector (PSD) for high-granular calorimetry :

R. Mori, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe

IEEE NSS-MIC 2018, October 2018, Sydney, Australia

CALICE/ILD SiW Ecal slab production and sensor development :

T. Suehara for ILD SiW-ECAL group

Linear Collider Workshop 2018, May - June 2018, Arlington, Texas, USA

Study of fermion pair events at the 250 GeV ILC :

Yuto Deguchi, Hiroaki Yamashiro, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Keisuke Fujii,
Kiyotomo Kawagoe

Linear Collider Workshop 2018, May - June 2018, Arlington, Texas, USA

Quark charge identification for e^+e^- to $q\bar{q}$ study :

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

Linear Collider Workshop 2018, May - June 2018, Arlington, Texas, USA

Detector Summary :

Taikan Suehara

Linear Collider Workshop 2018, May - June 2018, Arlington, Texas, USA

Development of inverse-LGAD for PID application in ILC :

R. Mori, T. Suehara, T. Yoshioka, K. Kawagoe

Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, December 2018, Tsukuba University, Tokyo, Japan

Overview of CALICE/ILD SiW-ECAL :

Taikan Suehara

Workshop on forward physics and FoCal upgrade in ALICE, January 2019, Tsukuba University, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Prototype Front-end ASIC for Silicon-strip Detectors of J-PARC Muon $g-2$ /EDM Experiment :

Yuki Tsutsumi

Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP 2018), September 2018, Antwerp, Belgium

Study of T-violation search experiment in compound nuclear reactions :

Jun Koga

The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019), March 2019, Okinawa, Japan

Precise Neutron Lifetime Measurement with a Gaseous Detector and a Solenoidal Mag-

net :

Naoyuki Sumi

Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, October 2018, Hawaii, USA

Experimental study for T-violation search in the compound nuclear reaction of ^{117}Sn :

Jun Koga

Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, October 2018, Hawaii, USA

Upgrade of Neutron Lifetime Measurement at J-PARC :

Hideaki Uehara

Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, October 2018, Hawaii, USA

A search for deviations from the inverse square law of gravity at nm range using a pulsed neutron beam :

Tamaki Yoshioka

RCNP Workshop on Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, August 2018, Osaka, Japan

Precise neutron lifetime measurement with a gaseous detector and a solenoidal magnet :

Naoyuki Sumi

RCNP Workshop on Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, August 2018, Osaka, Japan

Measurement of angular distribution of prompt γ -rays emitted by $^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$ reactions for T-violation search using the compound nuclear reaction :

Jun Koga

RCNP Workshop on Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, August 2018, Osaka, Japan

Measurement of the angular distribution of prompt gamma-rays emitted from $^{117}\text{Sn}(n,\gamma)$ reaction for T-violation search :

Jun Koga

International Workshop on Particle Physics at Neutron Sources 2018, May 2018, Grenoble, France

《国内での講演》

LHCの高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器量産工程の構築
小林 大

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

LHC-ATLAS 実験シリコンストリップ検出器の検出効率向上を目指した各ストリップ
の詳細な評価

山口 尚輝

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

LHCの高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器組み立てにおける
品質管理の研究

藤野 圭一

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

LHCの高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器の組立工程にお
ける接着剤塗布の研究

彌吉 拓哉

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

LHC results

織田 勸

ILC 夏の合宿 2018、2018 年 9 月、山口県下松市国民宿舎大城

Opening remarks

音野 瑛俊

Workshop on Long lived particle searches in various energy (LLP Workshop 2018)、
2018 年 9 月、東京工業大学

First search for long-lived heavy neutral lepton with the ATLAS detector

調 翔平

Workshop on Long lived particle searches in various energy (LLP Workshop 2018)、
2018 年 9 月、東京工業大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器組み立て工程に
おける接着精度評価

小林 大

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

ILC シリコン電磁カロリメータの新 short slab の製作と評価

関谷泉

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

ILC シリコン電磁カロリメータのための読み出しシステムの改良と新 short slab の評
価

三浦裕

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

ILC 計画の現状と今後

川越清以

日本物理学会 2018 年秋季大会シンポジウム「いよいよ実現へ向け動き出す ILC 計画-
グリーンライトに備えて-」、2018 年 9 月、信州大学

国際リニアコライダー - 計画概要と物理・測定器 -

末原大幹

ILC 大学連携タスクフォースセミナー、2018 年 10 月、九州シンクロトロン光研究セン
ター

Position Sensitive silicon detector(PSD) の表面抵抗パターンの研究

森涼介

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

ILD シリコン電磁カロリメータに向けた新 short slab の製作と性能評価

出口遊斗

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

重心系エネルギー 250 GeV の ILC における 2-fermion 終状態の研究

上杉悠人

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

まとめと今後の展望

川越清以

日本物理学会第 74 回年次大会シンポジウム「ILC の多角的活用」、2019 年 3 月、九州大学

COMET Phase-II 実験のためのシミュレーションを用いた探索感度の研究

大石航

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

COMET 実験用トリガー検出器試作機の開発

宮崎祐太

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

COMET 実験電磁カロリメータ用読み出し回路の性能評価

川島僚介

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

COMET 実験の電磁カロリメータに用いる LYSO 結晶の性能評価

川島僚介

第 124 回日本物理学会九州支部例会、2018 年 12 月、大分大学

COMET 実験用トリガー検出器試作機の開発

宮崎祐太

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

COMET 実験用電磁カロリメータ試作機の開発

橋本奨平

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

J-PARC における新しい手法によるミュー粒子双極子能率精密測定実験

吉岡瑞樹

シンポジウム「素粒子と原子物理の融合が拓く新たなミュー粒子物理のフロンティア」
日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験：シリコンストリップ検出器の試験モジュールの製作と
実機製作に向けた開発

山中隆志

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験：シリコンストリップ検出器用読出し ASIC の設計と性
能評価

堤裕樹

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

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

堤裕樹

第 124 回日本物理学会九州支部例会、2018 年 12 月、大分大学

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

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

Muon $g-2$ /EDM experiment at J-PARC

山中隆志

RCNP 研究会「中性子と原子で探る基礎物理」、2018 年 8 月、大阪大学

宇宙線ミューオンを用いた阿蘇米塚における透視実験

中居勇樹

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

ガス検出器とソレノイド磁石を用いた中性子寿命の精密測定実験：検出器製作と性能
評価

角直幸

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

^{117}Sn の複合核反応における時間反転対称性の破れの実験感度に関する研究
古賀淳

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

ガス検出器とソレノイド磁石を用いた中性子寿命の精密測定実験:宇宙線検出器のシミュレーションと製作、評価

永野智也

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

時間反転対称性の破れ探索のための複合核反応における ^{111}Cd 及び ^{113}Cd の放出 γ 線角度分布測定

牧瀬壮

日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月、九州大学

ガス検出器とソレノイド磁石を用いた中性子寿命の精密測定実験:検出器製作と性能評価

角直幸

第 124 回日本物理学会九州支部例会、2018 年 12 月、大分大学

ガス検出器とソレノイド磁石を用いた中性子寿命の精密測定実験:宇宙線検出器のシミュレーションと製作

永野智也

第 124 回日本物理学会九州支部例会、2018 年 12 月、大分大学

複合核共鳴を用いた ^{113}Cd の (n,γ) 反応における P 波由来の γ 線測定

牧瀬壮

第 124 回日本物理学会九州支部例会、2018 年 12 月、大分大学

複合核反応における時間反転対称性の破れ探索実験に向けた研究

古賀淳

日本中性子科学会第 18 回年次大会、2018 年 10 月、茨城県立県民文化センター

J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験:高精度化に向けたアップグレード
上原英晃

日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月、信州大学

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、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、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)

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (S)

大強度ミュオン源で解き明かす荷電レプトンのフレーバー転換探索の新展開

研究分担者 東城順治 (研究代表者 大阪大学 久野良孝)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (S)

ミュオン異常磁気能率の精密測定による新物理法則の探索

研究分担者 吉岡瑞樹 (研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 齊藤直人)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (A)

J-PARC 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)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (B)

時間反転対称性の破れの探索のための、偏極中性子による原子核反応の精密測定

研究分担者 吉岡瑞樹 (研究代表者 名古屋大学 北口雅暁)

文部科学省研究費補助金、基盤研究 (B)

ソレノイド磁場と新型ガス検出器を組み合わせた高精度中性子寿命測定実験

研究代表者 吉岡瑞樹

文部科学省研究費補助金、若手研究

ストリップ型シリコン検出器と超伝導磁石を用いたミュオンラジオグラフィーの新展開

研究代表者 音野瑛俊

文部科学省研究費補助金、基盤研究(A)

将来電子・陽電子加速器実験における暗黒物質探査

研究分担者 末原大幹 (研究代表者 カブリ数物連携宇宙研究機構 松本重貴)

文部科学省研究費補助金、新学術領域研究(公募研究)

高時間・空間分解能を持つ新型シリコンセンサーの開発

研究代表者 末原大幹

文部科学省研究費補助金、研究活動スタート支援

LHC-ATLAS 実験におけるタウ粒子を用いたレプトンフレーバー非保存崩壊の探索

研究代表者 小林大

《 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

九州大学：世界トップレベル研究者招へいプログラム「Progress 100 プログラム」若手研究者グローバルリーダー育成型

研究代表者 音野瑛俊

九州大学：QR プログラム

ストリップ型シリコン検出器を用いたミュオンラジオグラフィーの新展開

研究代表者 音野瑛俊

笹川科学研究助成

実用的な火山透視システムの開発、及び透視能力の実証 ～3次元リアルタイムモニターの実現に向けて～

研究代表者 中居勇樹

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)

調 翔平 (DC2) : LHC-ATLAS 実験における重い長寿命中性レプトンの探索

角 直幸 (DC2) : 新型ガス検出器を用いた世界最高精度での中性子寿命測定実験

学部4年生卒業研究

来見田 将大、後藤 輝一、松本 岳 : ミューオンの寿命測定

菅野 颯人、荘司 大志、森山 健太郎 : オルソポジトロニウムの寿命測定

修士論文

- 藤野主一 (指導教員 東城順治) : ATLAS 実験に用いる新型シリコンピクセル検出器の組立と品質保証の研究
- 堤裕樹 (指導教員 吉岡瑞樹) : J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験におけるシリコンストリップ検出器用読み出し ASIC の開発
- 上原英晃 (指導教員 吉岡瑞樹) : J-PARC における高精度中性子寿命測定実験のための低発熱 ASIC アンプおよび磁気遮蔽体の開発
- 森涼介 (指導教員 川越清以) : 国際リニアコライダーのための高位置分解能シリコンセンサーの開発研究
- 三浦裕 (指導教員 川越清以) : 国際リニアコライダーのためのシリコンタンクステン電磁カロリメータ技術プロトタイプの研究
- 橋本奨平 (指導教員 東城順治) : COMET 実験用電磁カロリメータの信号読み出し回路とゲイン較正の研究
- 宮崎祐太 (指導教員 東城順治) : COMET 実験トリガー検出器に用いる読み出し回路の開発

博士論文

- 富田龍彦 (指導教員 川越清以) : Studies on improvement of neutron lifetime measurement

学外での学会活動

- 川越
高エネルギー加速器研究機構 : リニアコライダー計画推進委員会委員
高エネルギー加速器研究機構 : 日米科学技術協力事業高エネルギー物理研究計画委員会委員
高エネルギー加速器研究機構 : 素粒子原子核研究所運営会議委員
高エネルギー加速器研究機構 : 加速器・共通基盤研究施設運営会議委員
東京大学素粒子物理国際研究センター : 研究協議会委員
Asia-Europe-Pacific School of High Energy Physics : 国際組織委員会委員
ILD detector group : Deputy Spokesperson
- 東城
高エネルギー加速器研究機構 : サマーチャレンジ企画委員
日本物理学会 : 第 74 回年次大会実行委員
- 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
高エネルギー加速器研究機構 : サマーチャレンジ企画委員
日本物理学会 : 第 74 回年次大会実行委員
- 音野
高エネルギー物理学研究者会議 : 高エネルギーニュース編集委員

物性理論研究室

研究室構成員

福田順一 教授

松井淳 講師

藪中俊介 助教

《 博士研究員 》

野口慎平 (2018年6月まで)

《 大学院 修士課程 》

上戸美乃 西山大樹

《 学部 卒業研究生 》

山下晃弘 永友建蔵 堀川貴広

担当授業

福田順一: 非平衡物理学, 統計力学 I・同演習 (, 最先端物理学)

松井淳: 量子統計力学, 基幹物理学 IB 演習, 物理数学 II

研究・教育目標と成果

キラル液晶薄膜における特異な秩序構造の Kossel diagram(福田順一)

キラル液晶薄膜について昨年度行った研究を進展させ, 薄膜中に生じるいくつかの特異な秩序構造の光学的性質, より具体的には, それらが示す Kossel diagram (単色光がレンズによって試料に入射した際に生じる強い反射光を可視化したもの) についての研究を行った. 光の電磁場に関する Maxwell 方程式を直接数値的に解くことによって得られた Kossel diagram は, 実験で得られたものと非常に良い一致を示したとともに, 解析的な考察により, 薄膜における Kossel diagram はバルクの結晶のようにブラッグ反射を起源とするものではなく, 薄膜中の導波路共鳴が起源となっていることを明らかにし, Kossel diagram の形状が完璧に説明できることがわかった. 本研究は, Andriy Nych 博士, Uliana Ognysta 博士 (ウクライナ国立科学アカデミー), Slobodan Žumer

教授, Igor Mušević 教授 (スロベニア, Jožef Stefan 研究所) との共同研究である.

過冷却液体の異常拡散 (松井淳)

分子動力学シミュレーションで解析したジャンプ拡散の待ち時間分布において, ロングテイルがあらわれる. このベキ指数を求めるため, 最尤法と観測時間の有限性を考慮した解析を行った.

臨界点近くの 2 元混合系におけるコロイドの抵抗係数の計算 (藪中俊介)

臨界点近くの 2 元混合系中のコロイド粒子では, コロイド表面における選択的吸着が非常に大きく, 非常に厚い吸着層が形成される. この効果により, 1 成分流体におけるストークス則がどのように補正されるかを計算した. この際, これまでに用いられていた全空間で一定の相関長を仮定したモデルではなく, 相関長が空間的に変化するモデルを用いた. その結果, 実験的にも観測されている, 相関長に比例した補正が現れることを示した. 本研究は, 藤谷洋平教授 (慶應大学) との共同研究である.

円環分子の固液転移 (上戸美乃, 松井淳)

円環分子の特徴は, 分子の中心 (重心) 付近に質量分布がないことである. 固液転移において重要となる分子間の排除堆積効果は, 円盤分子の場合よりも小さくなるため, 円環分子で構成される系の転移点や構造がどのようなものか興味深い. モンテカルロ法を用いた計算機実験を試み, 低温領域で 2 種類の秩序相を見いだした.

発表論文

《原著論文》

“Liquid-crystalline half-Skyrmion lattice spotted by Kossel diagrams”

J. Fukuda, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer and I. Mušević,
Scientific Reports **8** (2018) 17234(1–8).

《Proceedings》

“Theoretical study on optical properties of liquid crystalline Skyrmion lattice”

J. Fukuda and S. Žumer,
Proceedings of SPIE **10941** (2019) 1094108(1–8).

“Three-dimensional crystal orientation of blue phase liquid crystals on surfaces”

H. Yoshida, M. Takahashi, T. Ohkawa, J. Fukuda, H. Kikuchi and M. Ozaki,
Proceedings of SPIE **10735** (2018) 107350I(1–9).

講演

《 海外での講演 》

“Theoretical study on optical properties of liquid crystalline Skyrmion lattice”

J. Fukuda and S. Žumer

SPIE Photonics West “Emerging Liquid Crystal Technologies XIV” (2019年
2月3日, サンフランシスコ (アメリカ), *Invited talk*)

《 国内での講演 》

“Exotic mesoscale structures in a thin film of a chiral liquid crystal”

J. Fukuda

Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity
(2018年12月11日, 福岡, *Invited talk*)

「液晶エラストマーのマルチスケール計算手法の開発」

福田順一

第10回超超PJ研究進捗報告会 (2018年11月27日, 産総研つくばセンター)

「キラル液晶薄膜におけるスカーミオン格子の生成とその直接観察」

福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, I. Mušević

2018年日本液晶討論会 (2018年9月4日, 岐阜大学)

“Half-Skyrmions in a chiral liquid crystal film”

J. Fukuda, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, I. Mušević

The 27th International Liquid Crystal Conference (2018年7月23日, 京都)

“Half-Skyrmions and other exotic defect structures in a thin film of a chiral liquid
crystal”

J. Fukuda

理研セミナー (2018年6月1日, **依頼講演**)

「キラル液晶が示す特異な自己組織的秩序構造」

福田順一

第126回福工大土曜談話会 (2018年4月28日, **依頼講演**)

「環状分子の固液転移」

上戸美乃, 松井淳

日本物理学会第74回年次大会 (2019年3月17日, 九州大学 伊都キャンパス)

「環状分子の固液転移」

上戸美乃, 松井淳

第124回日本物理学会九州支部例会 (2018年12月8日, 大分大学 旦野原キャンパス)

「ガラス転移近傍におけるジャンプ拡散の待ち時間分布 長時間テイルの解析」

松井淳

日本物理学会秋季大会 (2018年9月9-12日, 同志社大)

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

福田順一:

基盤研究 (B) 「ソフトマターの秩序構造の光学的直接観察をサポートする理論的枠組みの構築」 (研究代表者, 継続)

松井淳:

挑戦的研究 (開拓) 「ナノスピンドYNAMICSを基軸とした革新的流体制御技術の開拓」 (研究分担者, 継続)

藪中俊介:

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

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

福田順一:

平成30年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究課題 「コレステリックブルー相の構造とその安定性に関する理論的研究」 (研究代表者)

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

福田順一:

新エネルギー・産業技術総合開発機構「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」委託業務「液晶エラストマーのマルチスケール計算手法の開発」
(研究分担者)

学部4年生卒業研究

山下晃弘:(指導教員:福田順一):平行平板間のネマティック液晶の電場応答シミュレーション

永友建蔵:(指導教員:福田順一):ネマチック液晶の配向揺らぎによる擬似カシミール効果

学外での学会活動

福田順一:

日本物理学会 第74回年次大会 実行委員

研究集会“Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity” Organizer

SPIE OPTO “Emerging Liquid Crystal Technologies” Program Committee
Program Committee Member of the 27th International Liquid Crystal Conference

ソフトマター研究会 運営委員

日本液晶学会 物理・物性研究フォーラム主査

松井淳:

計算統計物理学研究会の開催

その他の活動と成果

福田順一:

物理学部門 部門長

Editorial Board Member of Scientific Reports

Editorial Board Member of Liquid Crystal Reviews

松井淳:

体験入学での実験演習「エントロピー」を担当 (2019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

《 大学院 博士課程 》

相場 信孝

《 大学院 修士課程 》

守屋 俊志 金子 甲二郎 加峰 悠貴 益子 通生流

《 学部 卒業研究生 》

湯 遥 永友 建蔵 藤村 啓 山下 晃弘

担当授業

中西： 基幹物理学 II, レトリック I, 解析力学, 物理学基礎演習

野村： 物性物理学 II, 相転移の統計力学, 量子統計物理学, 物理学特別講義 20

研究・教育目標と成果

1. $S = 1/2$ 一次元量子スピン系における Majumdar-Ghosh モデル近傍でのエネルギーギャップの振る舞いと整合・非整合波数 (加峰, 野村) : $S = 1/2$ 一次元量子スピン系の $J_1 - J_2$ モデルにおいて, Majumdar-Ghosh 点近傍でのエネルギーギャップを数値計算により求めた。Majumdar-Ghosh 点より上の領域では, パラメタに対してエネルギーギャップが振動する振る舞いが得られ, 先行研究の結果を確認した。現在, システムサイズと次近接相互作用係数を変えて, エネルギーギャップの零点と, 整合・非整合波数との関連を調べている。
2. ひねり境界条件を使ったイジングユニバーサリティクラスの研究と多重臨界点への応用 (守屋, 野村) : 一次元量子スピン系のイジングユニバーサリティクラスの相転移点を, y 軸ひねり境界条件と z 軸ひねり境界条件を用いて,

数値的に求めた。現象論的繰り込み群による先行研究の結果よりもサイズ依存性が小さく、相転移点をより正確に決定できた。また、求めた相転移点上で臨界指数を数値的に計算することにより、 y 軸ひねり境界条件が反周期イジング、 z 軸ひねり境界条件が周期イジングのユニバーサリティクラスに属することを確認した。

3. 一次元 $S = 1$ 量子スピン系における DT モデルの $SU(3)$ 対称性 (益子, 野村) : 2017 年に王, 桂らの研究グループによって提案された, 一次元 $S = 1$ 量子スピン系の DT モデルのハミルトニアンを, 数値対角化法を用いて調べた。 $SU(3)$ 対称性を持つ点近傍での励起スペクトルの様子を見ることで, この点近傍での相転移を議論する。系のサイズが 6 のハミルトニアンの全対角化に成功した。
4. 量子スピン系における磁化率およびエネルギー 4 階微分の発散 (相場, 野村) : 2 次元量子スピン系において, エネルギーギャップがなくなる点で磁化率が発散することが知られており, それを用いて相転移点が調べられている。本研究では, 1 次元量子スピン系でも同様の発散を用いて相転移点を決定できるかを調べた。1 次元 XXZ モデルを数値的に対角化することにより, 磁化率およびエネルギーの 4 階微分が発散することを示した。更に, 4 階微分を用いたほうが相転移点をより正確に決定できることを見出した。
5. 縦列砂丘と横列砂丘の動的安定性 (中尾, 中西) : 砂漠地帯では, 砂の量や風向, その強さや季節変動によって, 縦列砂丘, 横列砂丘, 三日月砂丘 (バルハン), 星型砂丘など, 様々な形態の砂丘が形成される。特に, 季節によって風向が変動する場合の風向きと砂丘の尾根の向きについて, 尾根を越えて流れる砂の流束が最大になるよう方向に尾根が伸びることが観察されている。我々は, 風が 2 方向から交互にふく場合の線状の砂丘の動的安定性を, 砂丘の尾根筋模型 (Crest Line Model) を用いて, 線形解析および数値シミュレーションによって調べた。その結果, 典型的なパラメタ領域において, 平均風向に対して垂直方向の横列砂丘は動的に不安定でバルハンに分裂するが, 平均風向に対して平行な縦列砂丘は線形に安定で線状砂丘が安定化することを示した。このことは, 砂丘が最大流束方向に発達するという観察結果と整合している。

[この研究は, 坂上 (青山学院大学), 西森 (広島大学) との共同研究で, 中尾 (卒業生) の修士論文研究を継承したものである。]

6. 円形井戸中の棒状自己駆動粒子の MD シミュレーション (金子, 中西) : 細

長いバクテリアを円形の井戸中に閉じ込めた際、井戸全体での単一の渦が生じることが実験で確認されている。この現象を理解するために、バクテリアを棒状の粒子にモデル化し、円形および円を2つ結合した瓢たん型の容器内に閉じ込めてMDシミュレーションを行った。容器内の棒状粒子の集団運動を特徴づけるために渦度パラメタを定義して、シミュレーションで評価し、円の半径および2つの円の中心間距離依存性を調べた。

発表論文

《原著論文》

《Proceedings》

《その他の論文》

近藤洋一郎, 中西秀, 日本物理学会誌, vol.73, No.4 (2018) 230-233. “ラトルバックのダイナミクス”

著書

講演

《海外での講演》

《国内での講演》

1. 第124回日本物理学会九州支部例会 2018年12月8日大分大学, 且野原キャンパス
 - (a) 守屋俊志, 野村清英, 「 $S=1/2$ ボンド交代 XXZ 鎖の y 軸ひねり境界条件」
 - (b) 相場信孝, 野村清英, 「量子スピン系における磁化率の異常性」
2. 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 10/31~11/2, 2018
 - (a) 守屋 俊志, 「Ashkin-Teller 多重臨界点とひねり境界条件」,
 - (b) 相場 信孝, 「量子スピン系における磁化率の異常性」
3. 第74回日本物理学会年次大会 2019年3月14日~17日, 九州大学 伊都キャンパス
 - (a) 相場信孝, 野村清英, 「 $S = 1/2$, XXZ モデルにおける磁化率の異常性と厳密解による比較」
 - (b) 守屋俊志, 野村清英, 「Ashkin-Teller 多重臨界点とひねり境界条件」 九大理

- (c) 益子通生流, 野村清英, 「一次元 $S = 1$ 量子スピン系における, DT モデルの $SU(3)$ 対称性」

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

学部 4 年生卒業研究

1. 湯 遥, 「方言の伝播に関するモデルのシミュレーション」
2. 永友 建蔵, 「ネマチック液晶の配向ゆらぎによる擬似カシミール効果」
3. 藤村 啓, 「1 次元 $S=1$ 量子ハイゼンベルグモデルの相境界図」
4. 山下 晃弘, 「平行平板間のネマティック液晶の電場応答シミュレーション」

修士論文

守屋 俊志, 「ひねり境界条件を使ったイジング ユニバーサリティ クラスの研究と多重臨界点への応用」

博士論文

学外での学会活動

中西秀, 日本物理学会 代議員, 第 74 回日本物理学会年次大会実行委員長

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 》

井上大司 仲原英駿

《 学部 卒業研究生 》

鶴田裕之 山崎幹斗

担当授業

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

研究・教育目標と成果

Si(111)Sn 表面の安定構造 (河合伸、井上大司)

従来、Si(111) 表面上の Sn 吸着安定構造は、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30° 構造であると考えられてきた。この Si(111)Sn $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30° 構造では、Sn 原子は、2次元ユニットセル内に1つだけ存在し、全ての Sn 原子は、同等である。近年、これに反する実験結果が発表されている。内殻電子線スペクトル観測結果は、低温から室温に至るまで、吸着 Sn の帯電状態が2つ存在することを示している。2.2K の Constant-Height-Mode STM の電流スペクトルは、吸着 Sn の吸着高さが2つ存在することを示している。明らかに、Si(111) 表面上の Sn 吸着安定構造は、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30° 構造ではない。

低温での Si(111)Sn 表面の安定構造を明らかにするために、大規模第一原理計算を行った。その結果、Si(111) 表面上の Sn 吸着安定構造は、特徴的なターゲットマーク状の局所構造を持っていることを明らかにした。この結果は、内殻電子線スペクトルと Constant-Height-Mode STM 電流スペクトルの実験結果を統一的に説明する。

ホール効果の Tsuji 公式の理解を深めた (成清修)

ホール効果の Tsuji 公式は高温超伝導やトポロジカル絶縁体などの周辺でときどき注目されながらも理解の深まらない公式であった。Haldane は 2005 年の arXiv 論文で、ボルツマン輸送の範囲で金属一般のホール効果の枠組みを整理した。Tsuji 公式は cubic 対称性のもとで導出されたが、Haldane は任意の対称性で成立する公式を導いたと主張している。本研究では、Haldane 公式の誤りを指摘したが、Haldane の枠組みは維持して、Tsuji 公式と Haldane 公式の中間的な結果を得た。研究ノートを QIR に公開しているが、近日中に論文投稿の予定である。[その他の論文]

無限自由度量子系では情報損失が起きている (仲原英駿、成清修)

Hawking たちの 2016 年のブラックホールのソフトヘア論文以降、ブラックホールの情報損失問題がリバイバルしている。Hawking たちはソフトヘアの情報を知ることができれば情報は保存するという提案を行ったが、それ以降に、この業界のビッグネームである Wald と Unruh は情報は失われるという論文を発表した。我々はこれらの正反対の結論が、前提としている代数構造の違いによるものであることを指摘した。Hawking たちは状態がユニタリに変化することを当然としているが、実は、ユニタリ変化は非相対論的な有限自由度の量子力学系の代数構造に過ぎない (I 型 von Neumann 環)。相対論的な場の量子論は必然的に無限自由度であり、異なる代数構造を持つ (III 型 von Neumann 環)。この無限自由度系の状態は純粋状態ではありえず、混合状態となるので、情報はブラックホールが無くても損失することになる。これらを仲原の修士論文で論じ、その抜粋を QIR で公開した。[その他の論文]

物理教育の探究課題を提案してみた (成清修)

Einstein は 1905 年の特殊相対論の論文において、ローレンツ変換の応用問題として運動する鏡による反射光のドップラー効果を導いた。高校物理の範囲で同じ結果が導けることを示し、昨年、物理教育学会九州支部研究大会にて報告した。その際の質疑応答を反映した発表資料を QIR で公開したところ、半年で 1000 件を超えるダウンロードがあった。[その他の論文]

発表論文

《その他の論文》

Note on geometrical description of weak-field Hall conductivity in metals:

O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/1957531>)

Information Loss in a Nutshell:

E. Nakahara, O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/2228908>)

Note on Information Loss: Local Quantum Physics Perspective:

E. Nakahara, O. Narikiyo

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/1955688>)

アインシュタインのドップラー効果の式を高校物理で考えてみる

成清修

QIR(<http://hdl.handle.net/2324/1955687>)

学部4年生卒業研究

鶴田裕之：(指導教員、成清修)：重力のゲージ理論

山崎幹斗：(指導教員、成清修)：ゲージ場の拘束条件

修士論文

井上大司：(指導教員、河合伸)：Si(111)Sn表面の安定構造

仲原英駿：(指導教員、成清修)：代数的量子論における局所測定の実在性

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 博士課程 》

大山耕平 田邊巧祐

《 大学院 修士課程 》

兼田基希 下迫龍一 上野裕之 馬場佳吾

《 学部 卒業研究生 》

松友寛太

《 訪問研究者 》

瀬戸誠 (京都大学複合原子力科学研究所教授)

担当授業

熱力学 (和田裕文)、素励起物理学 (和田裕文)、物性物理学 I (光田暁弘)、基幹物理学 IB (光田暁弘)、物理学総合実験 (光田暁弘)、物理学ゼミナール (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、下迫龍一)

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。今年度は磁場中で測定できる DSC 装置により (Mn,Fe)₂(P,Si) 系化合物の磁気熱量効果を測定した。この装置自体は一昨年に製作していたが、測定精度が十分でなかった。そこで昇温速度やその他のパラメータを吟味し、高い精度で測定できるように装置を改良した。その結果磁気熱量効果の値の信頼性が大きく向上した。

磁場中伝導現象の研究 (和田裕文、大山耕平、田邊巧祐、上野裕之)

昨年度に引き続き遍歴電子メタ磁性体 La(FeSi)₁₃ や価数転移物質 EuRh₂Si₂ について磁気抵抗やホール効果の測定を行っている。また、新たな遍歴電子メタ磁性体や価数転移物質の探索も行った。一方、一次転移を示す物質の熱伝導度はキュリー温度近傍で

異常を示すが、それについて新たな解釈を考えついたので、それを検証するための実験を進めている、

価数秩序物質 YbPd における温度-圧力相図の決定と高圧価数揺動相の極低温物性 (光田暁弘、和田裕文、大山耕平)

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。 $T_1 = 125$ K で正方晶への構造相転移を、 $T_2 = 105$ K で価数秩序を示す。これらの温度は圧力とともに低温へシフトし、 T_2 は 1.5 GPa 付近で消失し、 T_1 は 2 GPa 付近で突然消失すると考えられてきた。今年度は T_1 の消失する様子をより詳細に調べるとともに T_1 消失後に価数揺らぎの強い状態や磁気秩序が出現する可能性を調べた。 T_1, T_2 が圧力下で消失する様子は SPring-8 の BL10XU で高圧・低温下の粉末 X 線回折を行って調べた。 T_2 の消失はほぼ従来通りであったが、 T_1 については 4.5 GPa まで生き残っており、5 GPa で消失することが新たに判明した。 T_1 よりも高温側の価数揺動は 5 GPa 以上で最低温度まで実現していることになる。この圧力領域で極低温領域 (~ 0.5 K) の振舞を調べるために東大物性研の上床研究室で電気抵抗を測定した。電気抵抗は T^2 に依存せず、非フェルミ液体的振舞を示す。この原因として価数揺らぎの影響が考えられる。一方、新たな磁気秩序は観測されなかった。来年度はこの振舞について考察するとともに、本物質の結晶場基底状態を決定するための中性子非弾性散乱実験を計画している。

価数秩序物質 EuTX の低温・高圧下価数測定と原子置換効果 (光田暁弘、和田裕文、馬場佳吾)

六方晶 ZrBeGe 型構造をもつ EuTX ($T = \text{Pt, Pd, Ni}$, $X = \text{P, As}$) は多段の価数転移を示すとともに各相の Eu の平均価数が $2 + n/6$ ($n = 1, 2, 3, 4$) を示し、低温で磁気秩序が見られることから価数秩序の可能性が指摘されている。本年度は、EuPdP の低温・高圧下の価数測定を行い、EuNiP の原子置換効果を調べた前者は SPring-8 の BL39XU で Eu L_3 端の X 線吸収実験を行い、圧力 1 ~ 9 GPa、最低温度 10 K の範囲で Eu 価数を見積もった。1.5 ~ 2 GPa に電気抵抗異常が観測されていたが、この異常を境に価数が 2.5 価から 2.65 価へ変化しており、価数転移であることがわかった。それ以上の圧力では価数はほぼ一定であった。後者では、Ni サイトを Pd に、P サイトを As に一部置換した試料の作製に成功し、価数転移温度が変化する様子が確認された。来年度は、EuPdP について低温・高圧下の粉末 X 線回折を行い、価数秩序の振舞を調べるとともに、置換系試料のより詳細を調べる。

ナノスピンの圧力効果研究の確立 (光田暁弘、兼田基希)

スピントロニクス分野において、圧力効果の研究がほとんど行われていないことに注目し、その手法の確立を目指して研究をスタートした。本年は圧力下におけるスピンポンピングを目指して、圧力セル内で強磁性共鳴 (FMR) を観測することを目標に掲

げた。圧力セル内に入るアンテナの形状を微細加工し、同軸ケーブルの配線方法などを工夫することでFMR信号を観測することに成功したが、圧力を印加するとケーブルが断線してしまう問題が残った。断線箇所はちょうど圧力がかかっている部分と常圧部分の境界領域と考えられる。同軸ケーブルの導入の仕方を工夫する必要がある。来年度はこれを克服するとともに、強磁性/常磁性二層膜や横型スピバルブ素子の圧力効果の研究を推進する。

発表論文

《 原著論文 》

Pressure and magnetic field effects on the valence transition of EuRh_2Si_2 :

A. Mitsuda, E. Kishaba, T. Fujimoto, K. Oyama, H. Wada, M. Mizumaki, N. Kawamura and N. Ishimatsu

Physica B vol. **536** (2018) pp. 427-431.

Neutron Diffraction Studies on Valence Ordering Compound YbPd :

Kohei Oyama, Masaki Sugishima, Kousuke Tanabe, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Kenji Ohoyama, Takeshi Matsukawa, Yukihiro Yoshida, Akinori Hoshikawa, Toru Ishigaki, Kazuaki Iwasa

J. Phys. Soc. Jpn. vol. **87** (2018) pp. 1114705-1-6.

An unconventional hydrogen effect that suppresses thermal formation of the hcp phase in fcc steels:

Motomichi Koyama, Kenji Hirata, Yuji Abe, Akihiro Mitsuda, Satoshi Iikubo, Kaneaki Tsuzaki

Scientific reports vol. **8** (2018) pp. 16136-1-7.

^{195}Pt -NMR evidence for opening of partial charge-density-wave gap in layered LaPt_2Si_2 with CaBe_2Ge_2 structure:

Taisuke Aoyama, Tetsuro Kubo, Haruki Matsuno, Hisashi Kotegawa, Hideki Tou, Akihiro Mitsuda, Yutaro Nagano, Nobutaka Araoka, Hirofumi Wada, Yuh Yamada

J. Phys. Soc. Jpn. vol. **87** (2018) pp. 124713-1-5.

講演

《国内での講演》

点接合分光法を利用した $\text{EuNi}_2(\text{P}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ の電子状態の研究:

志賀雅亘, 沖村健吾, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2018 年 9 月

価数秩序物質 YbPd の点接合分光実験:

志賀雅亘, 沖村健吾, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2018 年 9 月

逐次相転移を示す YbPd の NMR による研究 II:

中西隆将, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 大山耕平, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2018 年 9 月

強磁性/常磁性二層膜構造における高圧下でのスピン依存型熱伝導現象:

松友寛太, 有木大晟, 木村崇, 光田暁弘

第 124 回日本物理学会九州支部例会, 大分大学旦野原キャンパス, 2018 年 12 月

点接合分光法を用いた YbPd の電子状態測定:

志賀雅亘, 沖村健吾, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

第 124 回日本物理学会九州支部例会, 大分大学旦野原キャンパス, 2018 年 12 月

点接合分光法を利用した EuNi_2P_2 の混成ギャップの観測:

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

第 124 回日本物理学会九州支部例会, 大分大学旦野原キャンパス, 2018 年 12 月

Eu 化合物の点接合分光実験:

志賀雅亘, 沖村健吾, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月

EuRh_2Si_2 の圧力下ホール抵抗測定:

大山耕平, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月

逐次相転移を示す YbPd の強磁場下 NMR による研究:

中西隆将, 藤井拓斗, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 大山耕平, 光田暁弘, 和田裕文, 平田倫啓

日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月

圧力・磁場下における Eu 化合物の価数転移、価数秩序:

光田暁弘

日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月

YbPd の点接合分光実験:

沖村健吾, 志賀雅亘, 光田暁弘, 和田裕文, 稲垣祐次, 河江達也

日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月

遍歴電子メタ磁性体 $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_3$ のホール抵抗測定:

田邊巧祐, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

巨大磁気熱量効果を示す一次相転移磁性体の熱伝導度研究

研究代表者：和田裕文

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

スピナノ素子の圧力効果研究の確立

研究代表者：光田暁弘

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

JST ALCA

階層構造磁気蓄熱再生器を持つ磁気ヒートポンプの開発

研究代表者:川南 剛

学部4年生卒業研究

松友寛太：(指導教員、光田暁弘)：強磁性/常磁性二層膜構造における電流、及び熱流磁気効果の圧力依存性

修士論文

下迫龍一:(指導教員、和田裕文)：磁場中示差走査熱量計(DSC)による(Mn,Fe)₂(P,Si)系化合物の測定

兼田基希：(指導教員、光田暁弘)：高圧下のナノスピンドYNAMIXSに関する研究

学外での学会活動

光田暁弘：日本物理学会第74回年次大会実行委員

その他の活動と成果

和田裕文：Elsevier社 Physica B エディター

和田裕文：九州大学理学研究院長，理学府長，理学部長

光田暁弘：九州大学低温センター運営委員

光田暁弘：九州大学理学部附属極低温実験室運営委員

光田暁弘：九州大学理学部大学説明会委員

光田暁弘：九州大学超伝導システム科学研究センター運営委員

量子微小物性 A,B

研究室構成員

渡部行男 (量子微小物性 A) 教授

荒井毅 (量子微小物性 B) 准助教

担当授業

————— 量子微小物性 A 渡部 —————
物性物理学 III (週 1 コマ)
電磁気学 II (週 1 コマ)
最先端物理学 (オムニバス方式の分担者 1 回担当)
基幹物理学 IA (週 1 コマ 全学共通教育)
基幹物理学 IB (週 1 コマ 全学共通教育)
基幹物理学 II (週 1 コマ 全学共通教育)
半導体物理学 (週 1 コマ)

上記講義数は、物理学科の一般教授の約 2 倍である。

電磁気学 II は、地球惑星科学科から約 10 名が受講。

————— 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↓では、自由電子が、本質的な役割を持ち、従来確立したと考えられている現象が、全く変わる可能性がある。これを解明する。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

しかし、現在のデータをみると、

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

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

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

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

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

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

これに関し、渡部は、強誘電体のバンドギャップが有限であることを考慮すると、巨大な反電場の下では、強誘電体は自ら、表面に電子層・ホール層を形成することを理論的に示し、これにより、従来考えられ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 141 回 (ISI?) 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 171 回

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

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

Y. Watanabe, M. Okano, and A. Masuda, Phys. Rev. Lett. 86, 332-335 (2001) 被引用 122 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 173 回

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 57,R5563(1999) 被引用 105 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 635 回

MRS Bulletin 26 (7) 489 (2001) に解説

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

が見えなくなる。このため、R-RAM や上記 (1) の機構は未解決と考えている。

Y.Watanabe, *Ferroelectrics* 349, 190-209 (2007) (自己論文の解説) 被引用 44 回

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

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

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

成立特許 4 件 (2014-2016 年)

上記の被引用回数は Google Scholar。() 内の引用数は、ISI(Web of Science(トムソン・ロイター))。各分野で運営している専用引用検索 (例:素核専用) の引用数は、ISI より約 3.5 割増しになる。

[今年度の各テーマの説明]

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

また、P C を用いる研究 (第一原理計算) で、上記の課題の解明に取り組んだ。

(1) 強誘電体酸化物の相転移での伝導異常の解明 :

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

(2) 強誘電体酸化物の表面電子層の確定:

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

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

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

この研究に関しては、今年度は、実験での進展なく、主に(3)の立場で行った。

(3) 超高真空 AFM による表面研究：

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

第一原理計算で、以下の発表論文リストにあるような計算を行った。

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

(4) 表面の効果ではなく、バルク伝導による整流現象の発見と理論：

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

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

————— 量子微小物性 B 荒井 —————

(1) 準周期構造・非反転対称等非在来型積層多層膜の熱伝導：

準周期構造・非反転対称等従来の物質研究では実験的研究の困難だった系での物性研究を熱伝導率測定から推進している。

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

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

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

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

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

発表論文

《原著論文》

Y. Watanabe, Ferroelectricity of stress-free and strained pure SrTiO₃ revealed by ab initio calculations with hybrid and density functionals, Phys. Rev. B 99, 064107-1-14 (2019)

Y. Watanabe, Calculation of strained BaTiO₃ with different exchange correlation functionals examined with criterion by Ginzburg-Landau theory, uncovering expressions by crystallographic parameters, J. Chem. Phys.148, 194702 (2018).

Y. Watanabe, Accurate semiempirical analytical formulas for spontaneous polarization by crystallographic parameters of SrTiO₃-BaTiO₃ system by ab initio calculations, Computational Materials Science 158, 315323 (2019).

Y. Watanabe, BaTiO₃ Polar Surface in Ultrahigh Vacuum Calculated by Local Density Functional Theory with a Large Supercell, Ferroelectrics. Vol. 534(1), 183-189 (2018).

《Proceedings》

Y. Watanabe ; D. Matsumoto ; Y. Urakami ; M. Okano ; A. Masuda, Origins of Conduction at Domain Boundaries, LaAlO₃/SrTiO₃ and Surface for Depolarization & Size Effect, Proc. ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM (IFAAP, Hiroshima) (2018).

Y. Watanabe, Electron/hole layer and stability of thin semiconducting ferroelectric revisited with analytical scaling theory and ab initio calculations, Ferro2018 Extended abstract 54-55 (2018).

Y. Watanabe, Accurate semi-empirical analytical formulas for spontaneous polarization by crystallographic parameters of SrTiO₃-BaTiO₃ system by ab initio calculations, Ferro2018 Extended abstract 140-141 (2018)

講演

《海外での講演》

国際会議

Y. Watanabe, D. Matsumoto, Y. Urakami and M. Okano, Polarization-Discontinuity Conductions at Domain Boundaries, Interfaces & Surfaces: Unification and Implications for Domain, Size Effects & Hyper-ferroelectricity 2018 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference IFAAP2018 (Hiroshima)

(招待講演)

Y. Watanabe, D. Matsumoto, Y. Urakami and M. Okano, Unification of conductions at

domain-boundaries, SrTiO₃/LaAlO₃ & free surface for size effect and domain theories, E-MRS (European Meeting of Materials Research Society) (Warszawa 2018) (招待講演)

Y. Watanabe, Substantially larger enhancement of ferroelectricity than conventional ab initio calculations, E-MRS (European Meeting of Materials Research Society) (Warszawa 2018)

Y. Watanabe, Simple formula of Spontaneous Polarization using Crystallographic Parameters of BaTiO₃, E-MRS (European Meeting of Materials Research Society) (Warszawa 2018)

Y. Watanabe, Electron/hole layer and stability of thin semiconducting ferroelectric revisited with analytical scaling theory and ab initio calculations, Fundamental Physics of Ferroelectrics (2018, USA)

Y. Watanabe, Accurate semi-empirical analytical formulas for spontaneous polarization by crystallographic parameters of SrTiO₃-BaTiO₃ system by ab initio calculations, Fundamental Physics of Ferroelectrics (2018, USA).

《国内での講演》

渡部、解析理論と第一原理計算による分極不連続面の電子層の再定式化、日本物理学会 (2019.3、福岡)

外部資金

《文部省科学研究費補助金》

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

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

Integrated Ferroelectrics, Editorial Board

中等教育担当教員研修事業（高校教員を対象としたリカレント教育）：設定取りまとめ
と補助

日本学術振興会関係 各種評価と審査

固体電子物性

研究室構成員

木村崇 教授

大西紘平 助教 山田和正 助教

《 博士研究員 》

山野井一人

《 大学院 博士課程 》

Nagarjuna Asam 有木大晟 Md. Kamruzzaman

《 大学院 修士課程 》

矢野大吾 伊藤大樹 藤田光翔 Hossain Towfiq

Zheng Gang

《 学部 卒業研究生 》

松田亮 屋富祖稔 宮崎圭司 須小遼河

《 研究生 》

Amany E. Harby 金晨東 Thomas Steinle

《 訪問研究者 》

Dr. Xavier Waintal Prof. Jason Robinson Prof. Mathias Klui Dr. Laurent Vila Mr. Troy Dion

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)、素励起物理学 (大西紘平)、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

CoFeAl/Ag 界面における抵抗スイッチング現象とスピン依存伝導 (伊藤 大樹、木村崇)

スピン伝導と電界誘起金属絶縁体転移現象を組み合わせた、高速度で高信頼性を有する次世代メモリストアデバイスを必要とする声が高まっている。この中でも、絶縁界面における電界誘起金属フィラメント成長を利用したデバイスに関したいくつかの研究

報告が存在するが、発生した金属フィラメントのスピントロニクス特性に関する明快に示されたものはなかった。そこで、我々は横型スピントロニクス構造を用いた非局所スピントロニクス注入法によって界面金属フィラメントのスピントロニクス特性を調査し、報告を行った。

強磁性体多層膜における非線形スピンドイナミクス観測 (屋富祖稔、木村崇)

常磁性体を強磁性体ではさんだ強磁性体多層膜を作成し、強磁性共鳴法や振動試料型磁力計等を用いて、熱による効果の観点からスピンドイナミクスの変調について系統的に評価した。本研究によって、中間層の常磁性体が FMR Heating と呼ばれる発熱現象によって弱強磁性化し、強磁性層同士を層間結合させダンピング定数が変調されることが明らかとなった。この結果から、熱によるスピンドイナミクスの制御の可能性が広がったといえる。

横型スピントロニクス構造素子によるスピネルスト効果の非局所測定 (松田亮、木村崇)

Pt と Ta のスピネルスト効果 (SNE) を非局所で測定することを目標に、横型スピントロニクス構造を基にした SNE 非局所測定用デバイスを作成して実験を行った。測定結果では、SNE が検出された際に予想される電圧変化を検出することはできたが、Pt と Ta のスピントロニクス相互作用の符号の違いを電圧変化の反転として検出することはできなかった。信号が反転しなかった原因を、異常ネルスト効果 (ANE) の発現によるものと考え、SNE と ANE を分離する解析を行い、スピネルスト角という物性値を算出するまでに至っている。

異常ネルスト効果の効果的な検出 (有木大晟、山田和正)

熱は電流に比べて制御しにくいいため、各種物性値を精度良く調べるのは、容易ではない。強磁性多層膜のナノコンタクトなどの構造を利用して、より高精度に異常ネルスト効果、及び関連現象を測定する手法を開発した。異常ネルスト効果を効果的に検出したので、研究会等にて「強磁性多層膜ナノ構造における効果的な異常ネルスト効果の検出」を発表した。

スピントロニクス超伝導電流の探索と評価 (矢野大吾、大西紘平)

超伝導体におけるスピントロニクス超伝導電流は、スピントロニクスにおけるスピントロニクス流の特性を最大限に引き出すものであり、近年、Pt と NiFe を接合させた超伝導体 Nb 中に生成できることが報告されている。そこで、本分野をリードする英国ケンブリッジ大学に長期滞在し、スピントロニクス構造におけるスピントロニクス吸収効果から、同現象を定量的に評価することを試みた。本年度は、試料作製および測定環境を立ち上げ、作製した試料においてスピントロニクス信号を確認するに至り、今後、超伝導転移に伴うスピントロニクス信号

の変化を測定する予定である。

有機物中の熱スピン流 (山田和正)

スピンゼーベック効果は温度差を利用した環境発電に利用可能である。しかし、熱伝導率の大きな無機材料を使用しているため、無駄に熱を伝え効率が良くない。そこで、性能向上のため、有機物をスピン伝導層として使用する有機スピン依存ゼーベック素子を提案した。有機はスピン緩和長が長く、よくスピン流を伝達することができると考えられる。本年度は、カーボン膜の成膜の条件出しを行った。カーボン膜のX線構造解析を行い、カーボン膜の結晶化がすすんでいないことが分かった。アニールを行い、結晶化によりカーボン膜が抵抗が小さくなることが分かった。カーボン膜の微細加工のテストを行った。

有機物中のスピン流の理解のためには、導電性ポリマーの移動度の温度依存性が重要である。詳しい解析により導電性ポリマーの移動度はポーラロン機構が支配的であることが分かった。導電性ポリマーの移動度に関する論文を国際学術雑誌に投稿し掲載された。

発表論文

《原著論文》

Possibility of Cooper-pair formation controlled by multi-terminal spin injection:

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

J. Phys.: Conference Series **969** (2018) pp. 012028

Temperature evolution of the charge and spin transport in Cu/Nb interface:

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

Jpn. J. Appl. Phys, **57** (2018) pp. 060310-1

Modification of magnetization dynamics of NiFe nanodot due to thermal spin injection:

N. Asam, K. Yamanoi and T. Kimura,

J. Phys. D : Appl. Phys, **51** (2018) pp. 224004

Thermal Spin-Valve Effect in Magnetic Multi-layered Nanowires:

Nagarjuna Asam, Kazuto Yamanoi, Kohei Ohnishi, Takashi Kimura,

Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, **32** (2019) pp. 31093113

Temperature dependence of mobility of conducting polymer polyaniline with secondary dopant:

Kazumasa Yamada, Bunju Shinozaki, Takashi Narikiyo, Yousuke Takigawa, Norihiro Kuroda, Toru Bando, Hiroaki Nakamura,
Synthetic Metals, **247** (2019) pp. 124-130

Substantial enhancement of thermal spin polarization in Py/Cu interface:

S Hu, J Zhao, L Wang, X Cui, K Ohnishi, T Arika, T Min, K Xia, T Kimura,
Physical Review Materials, **2** (10), (2018) pp. 104403

Crystal orientation effect on spin injection/detection efficiency in Si lateral spin-valve devices:

Ishikawa M., Tsukahara M., Honda S., Fujita Y., Yamada M., Saito Y., Kimura T., Itoh H., Hamaya K.,
Journal of Physics D: Applied Physics, **52** pp.085102 (2018)

Bolometric ferromagnetic resonance techniques for characterising spin-Hall effect at high temperatures:

Phu P., Yamanoi K., Ohnishi K., Hyodo J., Rogdakis K., Yamazaki Y., Kimura T., Kurebayashi H.,
Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **485**, (2019) pp. 304-307

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

Kazuto Yamanoi, Minoru Yafuso, Keishi Miyazaki and Takashi Kimura,
JPhys Mater, *in press, available online*(2019) <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ab45cc>

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

N. Asam, T. Arika, T Kimura,
Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures **117** (2020) pp.113738

Spinorbit torque-driven current-induced domain wall motion in GdFe magnetic wires:

Y. Kurokawa, M. Wakae, S. Sumi, H. Awano, K. Ohnishi, and H. Yuasa,

Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 030905-1 4 (2019).

Quasi-antiferromagnetic multilayer stacks with 90 degree coupling mediated by thin Fe oxide spacers:

G. Nagashima, Y. Kurokawa, Y. Zhong, S. Horiike, D. Schnke, P. Krautscheid, R. Reeve, M. Klui, Y. Inagaki, T. Kawae, T. Tanaka, K. Matsuyama, K. Ohnishi, T. Kimura, and H. Yuasa,

J. Appl. Phys. **126**, pp. 093901-1 8 (2019).

講演

《 海外での講演 》

Spin absorption effects into ferromagnetic metal and superconductor :

T. Kimura,

5th International Conference on Superconductivity & Magnetism 2018 2018/5/3 Antalya, Turkey

Spin Absorption Effects into Ferromagnetic Metal and Superconductor :

T. Kimura,

5th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (IcAUMS 2018) Jeju, Korea (June 2018)

Spin transport in metallic system MAINZ Summer School:

T. Kimura,

New Directions in Spintronics Research 2018 Beijing, China (Aug 2018)

Dynamical Spin Injection Based on Heating Effect due to Ferromagnetic Resonance:

T. Kimura,

SPIE conference San Diego, USA (Aug 2018)

Surface superconducting property probed by pure spin current :

T. Kimura,

Royal Society Meeting : Non-equilibrium superconductivity and spintronics 2019 2019/2/26 London, UK

Experimental demonstration of a Josephson junction under spin current injection:
K. Ohnishi,
Superconducting Spintronics Mini Conference Cambridge, United Kingdom (Jun 2018)

Influence of Thermoelectric Effect on Thermal Spin Injection:
N. Asam, T. Arika, K. Ohnishi, and T. Kimura,
One-day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Mterials,
University of Tokyo (Nov 2018)

Resistive Switching Lateral Spin Valve using CoFeAl/Ag Interface:
D. Ito, T. Arika, K. Ohnishi, and T. Kimura,
One-day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Mterials,
University of Tokyo (Nov 2018)

Lateral spin valve with memristive switching interface:
D. Ito, T. Arika, T. Hossain, K. Ohnishi, and T. Kimura,
International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronics Workshop - Topological Phenomena in Magnetism, Noyori Conference Hall, Nagoya University (Jan 2019)

Asymmetric spin signal due to heat transport phenomena in a lateral spin valve:
T. Arika, N. Asam, K. Ohnishi, and T. Kimura,
International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronics Workshop - Topological Phenomena in Magnetism, Noyori Conference Hall, Nagoya University (Jan 2019)

《 国内での講演 》

有木大晟、野村竜也、大西紘平、木村崇:
強磁性/非磁性二層膜における特異なスピン伝導現象と温度依存性
磁気記録・情報ストレージ研究会 早稲田大学共創館（東京都・新宿区）（2018年7月）

山田和正、有木大晟、野村竜也、木村崇:
強磁性多層膜ナノ構造における効果的な異常ネルンスト効果の検出
磁気記録・情報ストレージ研究会 早稲田大学共創館（東京都・新宿区）（2018年7月）

伊藤大樹、有木大晟、大西紘平、木村崇:

CoFeAl/Ag 界面における抵抗スイッチング現象とスピン依存伝導

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

宮崎圭司、屋富祖稔、金晨東、鄭剛、木村崇:

起因現象を意識した CoFeB/Pt 二層系におけるスピンドYNAMIKSの評価

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

松友寛太、有木大晟、木村崇、光田暁弘:

強磁性 / 常磁性二層膜構造における高圧下でのスピン依存型熱伝導現象

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

松田亮、須小遼河、伊藤大樹、有木大晟、Nagarjuna Asam, 木村崇:

横型スピバルブを用いたスピネルンスト効果の観測

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

須小遼河、松田亮、伊藤大樹、有木大晟、大西紘平、木村崇:

スピン依存ペルチェ - ゼーベック効果の相関関係の実験的評価:

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

屋富祖稔、宮崎圭司、Towfiq Hossain Task, 木村崇:

層間結合した強磁性多層膜における非線形スピンドYNAMIKSの観測:

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

司文、廣田壮平、伊藤大樹、稲垣佑次、木村崇、河江達也:

Resistivity Measurement of Superconducting PdHx Prepared by Low Temperature Absorption

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

矢野大吾、大西紘平、木村崇:

Nb 系超伝導細線における電荷不均衡と交差アンドレーエフ反射

第124回日本物理学会九州支部例会, 大分大学 (2018年12月)

大西紘平、矢野大吾、木村崇:

Spin-dependent quasi-particles injection into superconducting Nb

平成30年度 スピン変換年次報告会 東北大学 AIMR 本館 (宮城県・仙台市) (2019年3月)

金晨東:

Static and dynamic properties of coupled double vortices stabilized in an isosceles triangular structure

平成30年度 スピン変換年次報告会 東北大学 AIMR 本館 (宮城県・仙台市) (2019年3月)

宮崎圭司、屋富祖稔、金晨東、鄭剛、木村崇:

熱起因現象を意識した CoFeB/Pt 二層系におけるスピンドイナミクスの評価」

日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

大西紘平、木村崇:

超伝導体/常伝導体界面におけるスピン流

IEEE マグネティクス 福岡/広島ジョイントチャプタ キックオフセミナー 九州大学西新プラザ (2018年12月)

伊藤大樹、有木大晟、大西紘平、山田和正、木村崇:

Ag/Bi チャンネル層を有する横型スピバルブにおけるスピン伝導特性

日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

須小遼河、松田亮、伊藤大樹、有木大晟、大西紘平、木村崇:

CoFeAl 細線によるスピン流励起電熱現象の観測

日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

松田亮、須小遼河、伊藤大樹、有木大晟、Nagarjuna Asam、木村崇:

スピバルブ素子における第二高調波信号の非対称磁場依存性」

日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

屋富祖稔、宮崎圭司、Towfiq Hossain Task、木村崇:

層間結合した強磁性多層膜における非線形スピンドイナミクスの観測

日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

大西紘平、矢野大吾、木村崇:

Nb系超伝導細線における電荷およびスピン不均衡状態の観測
日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

司文、廣田壮平、伊藤大樹、稲垣祐次、木村崇、河江達也:
Study of Superconducting Transition in Palladium Hydride (PdH_x) Prepared by Low-temperature Absorption
日本物理学会 第74回年次大会, 九州大学 (2019年3月)

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》
文部省科学研究費補助金、新学術領域研究
ナノスピン変換科学
研究分担者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、基盤研究(A)
熱スピン注入による磁歪制御とナノスピナクチュエータの開発
研究代表者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、挑戦的研究(開拓)
ナノスピナダイナミクスを基軸とした革新的流体制御技術の開拓
研究代表者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、若手研究(B)
高効率スピン注入によるスピン偏極超伝導電流生成の実現
研究代表者：大西 紘平

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

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》
戦略的国際研究交流推進事業費補助金

ワイヤレス動作するグリーン・ナノスピンドバイスの国際研究開発拠点
主担当研究者：木村 崇

戦略的創造研究推進事業 CREST
界面マルチフェロイク材料の創製
主たる共同研究者：木村 崇

修士論文

矢野大吾: (指導教員、木村崇、大西紘平) :超伝導 Nb 細線への準粒子注入によるスピン制御に関する研究

博士論文

Asam Nagarjuna: (指導教員、木村崇) :Study of spin-dependent thermal transport and thermoelectric effects across ferromagnetic /nonmagnetic hybrid metal nanostructures.

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 》

西澤 賢治

《 大学院 博士課程 》

野口朋寛

《 大学院 修士課程 》

池田 豊和 池永匡宏 永尾渉 林原 就斗

壹岐 晃平 岩本 健太 近堂 くるみ 杉野 裕次郎

福本 昂平 三谷一晃 安藤祐貴

《 学部 卒業研究生 》

林 和気 益永 真聡 村上 幸輝 藤原 誠

白木 啓悟 江藤 高宏

担当授業

物理学の進展 (木村康之)、物理学ゼミナール (木村康之・水野大介)、振動と波動 (木村康之)、物理学特別講義C (生物物理学) (水野大介)、基礎物理実験学・同実験 (水野大介) 基幹物理学?(水野大介)、物理学総合実験 (水野大介・岩下靖孝)

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。(1,5)
- 新規なレーザートラップ手法の開発や、それによる力測定・粒子操作をコロイド系に適用し、その物性測定及び非線形挙動の解明を行なうことを目指した。(2)
- 様々なコロイド粒子の作成や、その集合的挙動および集合系の物性を解明することを目指す。(3,4)

○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。(6)

○配向に自発螺旋ねじれが存在するコレステリック液晶中に分散した粒子間に新規の粒子間相互作用の存在を確認し、これを用いた新規構造体作成を目指す。(7)

○粉体のバンド構造や局所構造の解明を目指した。(8,9,10)

○細胞骨格やコロイド系の巨視的な力学応答は、ミクロな非線形性と構成要素間の応力ネットワークの接続(トポロジー)に依存する。メソスケールの非線形性応答を広帯域計測できるマイクロレオロジーにより、ミクロとマクロの力学を繋ぐメカニズムを究明する。(11, 13,14)

○非平衡ソフトマターに現れる揺らぎと力学挙動の関係を、揺動散逸定理の破れとして現れる非平衡散逸のエネルギー論をもとに定量的に調べる。(11)

○光学的に不均質であり、かつ、巨大な揺らぎを示す非平衡ソフトマターにおいて、光捕捉による力の印加とレーザー干渉法に基づく粒子追跡を、高い時空間分解能で精密に行うための技術を開発する。(12)

○細胞骨格やコロイドガラス系の非線形かつ非アファインな力学応答に現れる普遍性の起源を、光捕捉マイクロレオロジーによる広帯域計測により実証する。(14, 15)

○代謝活動を維持できる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す。(16)

○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。(17)

○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。(18-20)

○生体組織の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FBMR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。(21)

(1) 光駆動回転粒子系での運動解明 (齋藤、岩本、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、光渦中にトラップした楕円粒子がすりこぎ運動すること、また、その回転速度を渦度と入射強度により制御することに成功した。

(2) ホログラフィック光ピンセット・顕微鏡の開発 (池田、木村)

ホログラフィを利用した新規な3次元粒子追跡手法の確立を目指した。その結果、特にレーラー・ゾンマーフェルト後方伝達関数を用いた方法により、多粒子の3次元同時追跡を可能にするシステムを実現し、複数粒子の沈降過程の観察に成功した。

(3) 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パッチを形成し、金面をイオン性チオールで被覆することで分散安定化させた。塩濃度を介して表面間の電気二重層斥力を、金の膜厚を介してファンデルワールス引力を調整し、この粒子に金表面のみを選択的に被覆させることに成功した。即ち、この被覆挙動の塩濃度依存性はDLVO理論で説明できる。実際、二次極小で吸着した粒子が熱運動し、一次極小で吸着した粒子は熱運動しないことを確認した。他方、パッチのサイズや厚さのばらつきが大きいため、粒子の被覆挙動にはかなりばらつきがあった。

(4) ヤヌス粒子を用いたガラス転移の研究 (岩下、木村)

粒径数 μm のシリカ粒子表面に金のパッチ形成し、金-シリカヤヌス粒子を作成した。顕微鏡ごと僅かな傾斜を制御できるステージを作成し、2種類の粒径の粒子を2次元的に密充填したコロイダルガラスを形成した。その状態で半透膜を介して塩濃度をin situで増加させパッチ間を結合し、凝集体(クラスター)からなるガラス状態の実現に成功した。今後、パッチ間結合の密度と構造緩和時間の関係を調べ、ガラス転移と結合キネティクスを解明したい。

(5) Induced Charge Eelectrophoresis(ICEP)の粒子形状依存性 (岩下、木村)

誘電体粒子の一部を金属で被覆し、交流電場を印加すると、液体中のイオンの泳動が粒子近傍で非対称になる。これにより、粒子が電場と垂直方向に運動(自己推進)するICEPが生じる。光反応性の樹脂(SU-8)のフォトリソグラフィを用いて異形状の粒子を作成し、ICEPの形状依存性を調べた。その結果、印加する交流電場の強さに応じて運動状態の不連続な転移が生じることを見出した。さらに障害物にぶつかった際に、自己駆動粒子が自励振動を示すことを発見した。このように、異方的な形状の粒子が示す特有の自己駆動運動を発見した。

(6) アクティブマイクロレオロジー測定システムの構築 (壺岐、木村)

媒質に分散したコロイド粒子に交流的な外力を与えてその応答を測定するアクティブマイクロレオロジー測定システムの開発を進めている。ことに、外力として交流

電場を印加し、荷電コロイド粒子を励振する電気泳動マイクロレオロジー測定システムを構築し、これを用いたソフトマター系の局所力学物性測定を進めている。

(7) コレステリック液晶コロイド系の研究 (林、木村)

分子配向に螺旋秩序を有するコレステリック液晶中にミクロンスケールのコロイド粒子を分散させると、誘起される歪場を緩和するために、粒子間に強い相互作用が働く。本研究では、液晶を薄いセルに挟んだ系を用いることで、螺旋秩序と界面配向とのフラストレーションが存在する系に分散したコロイド粒子間相互作用の解明と電場を用いた制御を目指している。本年度は、電場を用いて粒子を分散させた状態から、相互作用により粒子が凝集する過程を観察することで粒子間力の距離依存性の測定に成功した。

(8) 回転円筒容器における粉体の相分離現象の研究 (近堂、稲垣、木村)

水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体を入れ、回転させたときに観察されるサイズ分離現象について、実験を行った。従来、粉体のサイズ分離現象は、動的安息角に有意に差のある粒子の組み合わせのときによく観察されると思われていたが、実際には動的安息角に差がなくても粉粒体のサイズ分離が起きることがあるのが確認されていた。このことから、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示唆される。どのような物理量によってサイズ分離現象が起る条件を決められるか調べるために、粒子を球状のものに限定し、粒子のサイズと比重を系統的に変えることで、回転ドラムにおけるサイズ分離現象がどういうときにおこるか、実験を行った。その結果、動径方向の分離には粒子サイズの比が大きく寄与し、軸方向の分離によるバンド形成は粒子の比重差が大きく寄与していることが分かった。今後、それぞれの寄与についてより定量的に議論するために、引き続き実験を行う。

(9) 粉粒体の巨視的対流に関する研究 (内海、稲垣、木村)

水平に置いた円筒容器に、大きさの異なる二種類の粉体をほぼ完全に充填して回転させると、サイズ分離によって形成された粒子の縞模様が非常にゆっくりと円筒容器の軸に沿って動くことが分かっている。この非常にゆっくりとした縞模様の動きが、サイズ分離によって駆動されているかどうかを検証するために、単一の粒子を用いて、高充填に封入した粒子の流れ場を二つの手法で測定した。一つ目は、高速度カメラで撮影した画像をPIVで解析することによって、表面の流動層の流れ場を測定した。この結果、表面流は速度揺らぎが大きいため、縞模様と同程度の流れ場を検出することはできなかった。二つ目の手法として、一種類の粒子を複数の色に着色してから封入

し、その後回転させると、粒子が拡散しながらも、全体として一定の方向に動いていることが分かった。また、その速度は、サイズ分離した縞模様と同等であり、縞模様のダイナミクスはサイズ分離とは独立に駆動されていることを示唆する結果を得た。今後は、このゆっくりとした流れが粒子の大きさや比重によってどう決まるか、引き続き実験を行って検証する。

(10) 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。数値計算を行う際に、最終的な静的配置を得るために、速度に比例したグローバルダンピングを導入しているが、粒子間距離の分布がこのグローバルダンピングの強さに寄らないことが分かった。粒子間距離の分布は、最終的な配置に至るダイナミクスではなく、幾何学的な配置が決められていることを示唆している。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。

(11) モーターにより駆動される非平衡ソフトマターのエネルギー散逸と構造緩和 (有賀、西澤、水野)

生体ソフトマターにおいて、非平衡散逸とマイクロな構造緩和のダイナミクスが連関する機構を究明している。揺動散逸手定理の破れとして観測される非平衡揺らぎに原田一佐々関係式を適用することで非平衡散逸を求め、マイクロな非平衡散逸が構造緩和を介して試料のレオロジー特性に及ぼす効果をモーター1分子、および、その周囲媒質との相互作用まで含めたマルチスケール解析により究明している。

(12) 多重フィードバックと補償光学を用いた非平衡ソフトマターの揺らぎ応答解析 (杉野、井口、永尾、三谷、西澤、水野)

多重フィードバックを用いて試料中の揺らぎに追随しつつ、補償光学技術を用いて不均一媒質を通過する際に生じるレーザー波面の乱れを補正し、精密な力の印加と干渉パターンの生成を実現する技術開発を進めている。

(13) 胚性幹細胞の核とクロマチンの非平衡動態の研究 (Francis van Esterik, 池永、水野)

細胞の核の内部は、染色質と様々な修飾蛋白質が核原形質中に密に分散した複雑系であり、活発な転写活動を行う典型的な非平衡系でもある。マイクロレオロジーにより、染色質の局所的な構造やメカニクス (力学的性質や代謝活性) が、転写活動を制御する非平衡機構を調べる。

(14) 生きた細胞骨格の非平衡ゆらぎ (白木、杉野、井口、三谷、棚町、HeevAyade、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。

(15) 細胞骨格・コロイドガラスの非線形かつ非等方かつ非アファインな力学応答 (白木、Francis van Esterik, 江藤、林原蹴斗、本田菜月、荻原僚、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) 細胞内部環境のガラス的挙動 (藤原、杉野、西澤、池永、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。

(17) 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。

(18) 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 (福本、安藤、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たし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。

(19) 遊走バクテリア懸濁液中における非平衡揺らぎの統計分布 (福本、安藤、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。

(20) 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 (三谷、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。

(21) 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 (杉野、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 - 22) のさらなる発展、及び教育の充実。

発表論文

《原著論文》

両親媒性ヤヌス粒子による エマルションの構造,

岩下靖孝、野口朋寛、小池涼太郎、木村康之,

月刊ファインケミカル, 2019年3月号 5-11 (2019).

AC electrophoretic mobility of individual microscale colloidal particles measured using holographic video microscopy,

Toyokazu Ikeda, Haruka Eitoku and Yasuyuki Kimura,

Applied Physics Letters *114*, 153703 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5088723>

Controlled armoring of metal surfaces with metallodielectric patchy particles,

Tomohiro G. Noguchi, Yasutaka Iwashita and Yasuyuki Kimura,

Journal of Chemical Physics, *150*, 174903 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5090440>

Change in collective motion of colloidal particles driven by optical vortex with driving force and spatial confinement,

Keita Saito, Shogo Ookubo and Yasuyuki Kimura,

Soft Matter 14, C8SM00582F (2018).

Self-propelled motion switching in nematic liquid crystal droplets in aqueous surfactant solutions,

Mariko Suga, Saori Suda, Masatoshi Ichikawa and Yasuyuki Kimura,

Physical Review E 97, 062703 (2018).

光の角運動量が誘導する微粒子の自律的ダイナミクス,

木村康之、齊藤圭太,

レーザー研究 46(4), 205-209 (2018).

Nonequilibrium Energetics of Molecular Motor Kinesin,

T. Ariga, M. Tomishige, and D. Mizuno,

Phys. Rev. Lett. 121, 218101 (2018).

講演

《海外での講演》

Y. Iwashita, and Y. Kimura, "Mechanism of orientational ordering of patchy particles depends on packing density", Designer Soft Matter, 2018/6/6, Singapore, ポスター

Y. Iwashita, R. Koike, T. G. Noguchi, and Y. Kimura, "Emulsions stabilized with dually anisotropic particles", Designer Soft Matter, 2018/6/6, Singapore, ポスター

M. Suga, S. Kobayashi, M. Ichikawa and Y. Kimura, "Switching of Self-propelling Modes for Liquid Crystal Droplets in Surfactant Solution", International Liquid Crystal Conference 2018, 2018.7.26, 京都国際会議場, 口頭

Y. Tamura and Y. Kimura, "Two-dimensional Non-close-packed Nematic Colloidal Assemblies and Their Electrical Response", International Liquid Crystal Conference 2018, 2018.7.26, 京都国際会議場, ポスター

Y. Iwashita, N. Eto and Y. Kimura, "Unique motion of a highly asymmetrically-shaped self-propelled particle", Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity, 2018/12/10, 九州大学, ポスター

壹岐晃平、木村康之, "AC electrophoretic mobility of an optically trapped colloidal particle", Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity, 2018.12.10, 九州大学・福岡市, ポスター

池田豊和、木村康之, "AC electrophoretic mobility of a single colloidal particle studied by holographic video microscopy", Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity, 2018.12.10, 九州大学・福岡市, ポスター

Kurumi Kondo and Shio Inagaki, "Size and density dependency on radial segregation in a rotating cylinder", Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity, 2018.12.10, 九州大学・福岡市, ポスター

2018.12.10-12, Non-monotonic segregation dynamics in a half-filled rotating cylinder, Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity, 2018.12.10, 九州大学・福岡市, ポスター

杉野裕次郎、池永匡宏、西澤賢治、水野大介 Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity 2018.12.10 九州大学西新プラザ ポスター

三谷一晃、棚町昂平、水野大介 Rheology of active gels with microbial migrations Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity 2018.12.10 九州大学西新プラザ ポスター

安藤祐貴、栗原喬、水野大介 Non-equilibrium fluctuation in microorganism suspension Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity 2018.12.10 九州大学西新プラザ ポスター

林原就斗、江藤高宏、荻原僚、水野大介 Microrheology of dense colloidal suspension under localized force Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity 2018.12.10 九州大学西新プラザ ポスター

西澤賢治、水野大介 Glassy cytoplasm driven by non-thermal forces Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity 2018.12.10 九州大学西新プラザ 口頭

M. Ikenaga, K. Nishizawa, D. Mizuno Universal glass-forming behavior of living cy-

toplasm 8th World Congress of Biomechanics 2018.7.8-12 ダブリン アイルランド ポスター

K. Nishizawa, D. Mizuno "Mechanical activity induces fragile to strong transition of glassy cytoplasm in living cells" 8th World Congress of Biomechanics 2018.7.8-12 ダブリン アイルランド 口頭

F. Esterik, M. Ikenaga, H. Niwa, D. Mizuno "Enhanced Viscosity of the Cytoplasm at the Later Stage of Embryonic Development" 8th World Congress of Biomechanics 2018.7.8-12 ダブリン アイルランド 口頭

Kohei Tanamachi, Kazuaki Mitani, Shuhei Nara, Daisuke Mizuno "Enhanced structural relaxations in active bacterial hydrogel" 8th World Congress of Biomechanics 2018.7.8-12 ダブリン アイルランド ポスター

T. Kurihara, Y. Ando, I. Zaid and D. Mizuno Non-Gaussian limit fluctuations in active swimmer suspensions American Physical Society 2019.3.7 ボストン アメリカ 口頭

D. Mizuno Universal glass-forming behavior of in vitro and living cytoplasm its similarity to droplet suspensions? EMBO — EMBL Symposium: Cellular Mechanisms Driven by Liquid Phase Separation 2018. 5.16 ハイデルベルグ ドイツ 口頭

T. Kurihara, K. Morodome, Y. Ando, I. Zaid and D. Mizuno Non-Gaussian limit fluctuations in active swimmer suspensions Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity 2018.12.10 九州大学西新プラザ 口頭

《 国内での講演 》

岩下 靖孝、尾澤 岬, パッチ粒子によるコロイダルガラス, ガラス転移と関連分野の最先端研究, 2018/5/10, 東京大学物性研究所, ポスター

岩本健太、木村康之, 光渦中の粒子の運動, 2018年西日本非線形研究会, 2018.6.23, 広島大学東広島キャンパス, 口頭

木村康之、菅真梨子, 自走液晶液滴の運動, 2018年西日本非線形研究会, 2018.6.23, 広島大学東広島キャンパス, 口頭

岩本健太、木村康之, 光渦中でのマイクロ粒子の運動, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018.9.9, 同志社大学京田辺キャンパス, 口頭

池田豊和、木村康之, 外場下でのコロイド粒子の3次元運動追跡, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018.9.9, 同志社大学京田辺キャンパス, 口頭

岩下 靖孝、江頭 奈津実、木村 康之, 異形状粒子の Induced Charge Electrophoresis, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018/9/11, 同志社大学, 口頭

2018.9.9-12, "粉粒体のサイズと比重に依存した分離ダイナミクス Dependence of granular segregation dynamics on size and density ratios", 日本物理学会 2018年秋季大

会,2018.9.11,同志社大学京田辺キャンパス,口頭

池田豊和、木村康之,ホログラフィック顕微鏡を用いた外場下でのコロイド粒子の3次元追跡,第69回コロイドおよび界面化学討論会,2018.9.20,筑波大学・つくば市,口頭

壹岐晃平、木村康之,交流電気泳動スペクトル測定法によるコロイド分散系の物性測定,第69回コロイドおよび界面化学討論会,2018.9.20,筑波大学・つくば市,口頭

壹岐晃平、木村康之,光トラップ交流電気泳動スペクトル測定法の開発,第69回コロイドおよび界面化学討論会,2018.9.20,筑波大学・つくば市,ポスター

野口朋寛、岩下靖孝、木村康之,金属一誘電体ハイブリッド粒子による金属表面の被覆,第69回コロイドおよび界面化学討論会,2018.9.20,筑波大学・つくば市,ポスター

壹岐晃平、木村康之,光トラップ交流電気泳動測定法によるコロイド分散系の物性測定,第8回ソフトマター研究会,2018.12.7,首都大学東京・八王子市,ポスター

岩本健太、木村康之,光渦を用いたコロイド粒子の周回運動,第8回ソフトマター研究会,2018.12.7,首都大学東京・八王子市,ポスター

池田豊和、木村康之,ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド単粒子の交流易動度測定,第8回ソフトマター研究会,2018.12.7,首都大学東京・八王子市,ポスター

村上幸輝・壹岐晃平、木村康之,光トラップを用いたコロイド粒子の交流電気応答測定,第124回日本物理学会九州支部例会,2018.12.8,大分大学・大分市,口頭

林和気・木村康之,コレステリック液晶のトポロジカル欠陥,第124回日本物理学会九州支部例会,2018.12.8,大分大学・大分市,口頭

2018.12.8,回転ドラムにおける動径方向の分離現象について,第124回日本物理学会九州支部例会,2018.12.8,大分大学旦野原キャンパス,口頭

2018.12.8,回転円筒容器内の粉粒体の流れ場測定,第124回日本物理学会九州支部例会,2018.12.8,大分大学旦野原キャンパス,口頭

岩下靖孝、江頭奈津実、木村康之,交流電場下で自己駆動する異形状ヤヌス粒子の特異な挙動,日本物理学会第74回年次大会,2019/3/15,九州大学・福岡市,口頭

岩本健太、木村康之,流体相互作用を介したコロイド系の同期現象,第74回日本物理学会年次大会,2019/3/15,九州大学・福岡市,口頭

壹岐晃平、村上幸輝、木村康之,光トラップされたコロイド粒子の交流電場応答,第74回日本物理学会年次大会,2019/3/15,九州大学・福岡市,ポスター

近堂くるみ、稲垣紫緒,“回転ドラムにおける動径方向から軸方向への分離ダイナミクスの転移現象 Transition of segregation dynamics from radial to axial pattern”,日本物理学会第73回年次大会,2019/3/15,九州大学伊都キャンパス,ポスター

内海脩帆、稲垣紫緒,“回転円筒容器内の粉粒体の巨視的対流の流速測定 High-speed measurement of axial granular flow in a rotating cylinder”,日本物理学会第73回年次大会,2019/3/15,九州大学伊都キャンパス,ポスター

近堂くるみ、稲垣紫緒, Size and density dependency on segregation dynamics of granular media, 第2回九州大学女性研究者ダイバーシティシンポジウム, 2019.3.17, 九州大学伊都キャンパス, ポスター

江藤高宏 林原就斗 水野大介 光捕捉による局所的な力印加に見る濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー 第124回日本物理学会九州支部例会 2018.12.8 大分大学旦野原キャンパス 口頭

藤原誠、永尾渉、池永匡宏、水野大介 細胞死に向かう Hela 細胞のマイクロレオロジー・測 第124回日本物理学会九州支部例会 2018.12.8 大分大学旦野原キャンパス 口頭

白木啓悟、本田菜月、Francis van Esterik、水野大介 半屈曲性圧分子ゲルの局所力学応答のスケール可能性 第124回日本物理学会九州支部例会 2018.12.8 大分大学旦野原キャンパス 口頭

杉野裕次郎、池永匡宏、西澤賢治、水野大介 代謝活性を持つ細胞質のレオロジー 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル ポスター

三谷一晃、棚町 昂平、水野大介 遊走微生物懸濁ゲルのレオロジー測定 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル ポスター

福本昂平、諸留寛大、安藤祐貴、水野大介 混み合い遊走微生物懸濁液中におけるレオロジー 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル ポスター

安藤祐貴、栗原 喬、水野大介 遊走微生物系における流体揺らぎ 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡 ポスター

池永匡宏、西澤賢治、水野大介 生細胞内部の力学特性の高分子濃度依存性 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル 口頭

永尾 渉、梅田勝比呂、西澤賢治、水野大介、昆 俊亮、藤田恭之 がん化誘導細胞のマイクロレオロジー 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル ポスター

林原就斗、荻原 僚、水野大介 局所的な力印加下における濃厚コロイド懸濁液のレオロジー 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル 口頭

西澤賢治、水野大介 非熱的な力に駆動された細胞内部のレオロジー計測 第66回レオロジー討論会 2018.10.17 福岡市 リファレンス 駅東ビル ポスター

水野大介、西澤賢治、池永匡宏 アクティブガラスとしての細胞、および、細胞質の力学的性質物性研究所短期研究会「ガラス転移と関連分野の先端研究」 2018.5.11 柏 東京大学物性研究所 口頭

水野大介 光捕捉とレーザー干渉を用いた細胞力学計測 細胞（組織）サイズと力学特性 サイズ生物学ワークショップ 2019 2019.3.19 下関 口頭

水野大介 光捕捉とレーザー干渉法による細胞内揺らぎと力学の観測 レーザー学会学術講演会 第39回年次大会 日本光学会・レーザー学会共催シンポジウム 2019.1.14 東海

大学高輪キャンパス 口頭

水野大介 細胞内部のレオロジーと活きの良さの測り方 第20回レオロジー・フォーラム(第60回レオロジー討論会基調講演) 2018. 10.19 福岡 口頭

F. Esterik, D. Mizuno "Cell Body and Nuclear Mechanical Machineries Underlying Embryonic Stem Cell Differentiation 第66回レオロジー討論会 2018. 10.19 福岡 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、基盤研究(B)

時空間変化する非平衡ソフトマターの局所力学物性の解明
研究代表者：木村康之

文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)

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、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、基盤研究(C)

粉粒体のサイズ分離現象：散逸粒子系の動的秩序形成の機構解明
研究代表者：稲垣紫緒

文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)

コンバインの穀粒タンクに堆積する粳のかさ密度によるコメの登熟歩合計測法の開発
研究代表者：平井康丸 (九州大学農学研究院)
研究分担者：稲垣紫緒

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

旭硝子財団研究助成 第1分野・研究奨励

バルク材料に適用可能なガラス超安定化機構の提案と実証
研究代表者： 岩下靖孝

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

自然科学研究機構 新分野創成センター先端光科学研究分野プロジェクト

フィードバックと補償光学を用いた細胞内粒子の光捕捉操作とレーザー干渉計測

研究代表者：水野大介

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

林 和気：(指導教員、木村康之)：コレステリック液晶中の欠陥を伴った粒子の物性

村上 幸輝：(指導教員、木村康之)：コロイド粒子の光捕捉交流電場応答測定

江藤 高宏：(指導教員、水野大介)：濃厚コロイド懸濁液の牽引マイクロレオロジー

白木 啓悟：(指導教員、水野大介)：半屈曲性高分子ゲルの局所力学応答

藤原 誠：(指導教員、水野大介)：細胞死に向かう HeLa 細胞のマイクロレオロジー計測

修士論文

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の3次元ダイナミクス測定

池永匡宏：(指導教員、水野大介)：細胞質のガラス的レオロジー～スローダイナミクス計測法の開発～

永尾渉：(指導教員、水野大介)：細胞競合モデル系における癌化誘導細胞のマイクロレオロジー

林原 就斗：(指導教員、水野大介)：局所的な力印可下における濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー

博士論文

野口朋寛:(指導教員、木村康之・岩下靖孝):Elucidation and Control of Self-assembled Structures of Patchy Colloidal Particles

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 (木村)

International Liquid Crystal Conference 現地実行委員 (岩下)

その他の活動と成果

複雑流体

研究室構成員

前多裕介 准教授

《 博士研究員 》

Ziane Izri

《 大学院 博士課程 》

福山達也

《 大学院 修士課程 》

別府航早 坂本 遼太 合屋 純 白木天晴

仲間聖

《 学部 卒業研究生 》

高松 凌

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)、物理学ゼミナール (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を Soret 効果とよばれ、DNA などの生体高分子は低温側に輸送されることが知られている。Soret 効果は古くから知られている現象であるが、近年の技術的発展をうけて、荷電コロイドや荷電高分子の実験・理論の両面から精力的に研究が進められている。DNA などの荷電高分子では高温側から低温側への正の Soret 効果を示すが、さらに第 2 の溶質として 2~5% 程度の高分子 Polyethylene glycol を加えると DNA の輸送方向が反転し高温側においてリング状の局在や高温側において DNA が濃縮されることを明らかにした。これは添加された PEG が Soret 効果で濃度勾配を形成し、DNA は温度勾配と PEG 濃度勾配の競合で定常状態の分布が決まるためである。さらに、高分子溶液中の Soret 効果にはマテリアルの電磁気学的な性質によらずに分子を輸送するという特徴がある。この性質は捕捉対象が誘電体である

光ピンセット、強磁性体である磁気ピンセットなど従来の操作技術とは一線を画しており、分子や細胞を操る新たな光技術となる。

しかし、自在な分子操作という観点では、空間2次元での様々な制御が要求される。その観点で未だ理解が十分ではない点に、空間2次元を「動く」温度勾配下での輸送現象がある。高粘性流体中を伝搬する温度勾配では流動が生じることが報告されており、自在な分子操作を実現するには、Soret効果のみならず流れとの協同作用を理解しなくてはならない。そこで我々は、伝搬速度や伝搬する幾何形状を制御可能な温度勾配を実現する系を新たに構築し、動く温度勾配下のダイナミクスについて解析を行った。その結果、温度勾配が動く方向とは逆向きに溶液の流れが生じること、さらに特定の温度勾配の伝播速度で流速が最大となる共鳴的な振る舞いが生じることを見出した。熱拡散方程式およびストークス方程式から得た流速の近似解は実験結果の多くを説明し、Soret効果に起因する粘性勾配が流れの方向を決定すること、そして共鳴的な振る舞いは熱拡散と熱膨張の競合によることを明らかにした。さらに、この流れと分子輸送が協同的に作用することで、静的な温度勾配下よりも高い収率で溶質を濃縮する。動的に変化する外場によって流れや配向を制御する現象は液晶でもみられており、本研究で明らかにした連続体モデルはソフトマターを制御する理論的な基盤となる。

2.非平衡輸送現象と細胞集団運動に関する研究（前多、福山）

前述の動く温度勾配下で現れたマイクロフローは局所的な粘性の低下と収縮による流体の圧縮によって駆動される。その連続体モデルは高分子やソフトマターだけでなく、自律的に動く発動分子や細胞に対しても拡張され、同様の物理的機構によって一方向の運動が誘起されると考えられる。その有力な候補が、化学シグナルの波を検知して集団となって動く上皮細胞である。裂傷を負った皮膚では上皮細胞の集団が傷口に向かって動く。裂傷回復は皮膚組織の回復と恒常性に不可欠であり、方向性を持つ集団運動の理解は重要な課題である。裂傷シグナルが細胞間を波のように伝搬すること、ERKの波は細胞集団の運動方向を整流することは知られているが、走化性を介さずにERK波の伝播方向を検知し運動に転換する仕組みは明らかではない。近年、MAPキナーゼの一種ERKの活性化伝搬によるシグナルに沿って遡るように細胞集団運動が起きることが報告された。しかし、細胞がシグナルの方向を検知して特定の方向へ移動するかは明らかになっていない。

我々は動く温度勾配下において駆動される流動現象との類似性に着目し、細胞集団を連続体と近似した理論モデルを構築し、シグナル伝搬下での細胞集団の運動メカニズムの探求を行った。動く温度勾配下の流動現象の理論モデルを拡張し、細胞集団に置いても摩擦変化と密度変化の相乗的な作用から一方向性の運動が生じることを導い

た。これは、ERK 活性に対する接着と変形の応答によってシグナル伝搬に沿う一方向の運動が誘起されることを意味する。さらに我々は実験検証を行い、細胞集団運動速度が ERK シグナルの強度に対し 2 次関数的になることを見出した。この結果は細胞集団運動が ERK シグナルに誘起される密度変化・接着変化の相乗効果によって駆動されていることを示す。また、シグナル伝搬速度に対しては特徴的な速度で集団運動速度が最大になり、これはシグナルが速く伝搬することで多くの細胞が動けるものの、密度・接着変化の効果が小さくなることに由来するものである。類似の周波数依存性は温度勾配下の流動現象でも現れることから、物質や系の詳細に寄らないソフトマターの流動現象が高分子から細胞集団まで広く共通していることを示唆している。

3. 非平衡輸送現象と生命の起源に関する研究 (前多、白木)

DNA は遺伝情報を蓄積する分子であり、生命の根幹を支える自己複製に重要な要素である。生命を構成する要素分子や原始生命そのものの誕生を説明する仮説の 1 つに化学進化説がある。単純な分子から酵素触媒や高エネルギー反応で複雑な高分子が段階的に合成されていったとする化学進化説は、生命の構成要素の誕生に有力な手がかりを与えるが、温度・濃度一様な平衡系では、分子の重合反応や連結反応 (ライゲーション) がランダムに起こるため、再反応確率は分子の重合度に対して指数関数的に減衰することとなる。すると遺伝情報を十分保持する DNA は平衡系では極めて低い確率でしか現れないという結論に辿り着く。化学進化の濃度問題と呼ばれるこの指数関数的減衰を統計力学的視点から解決することを目的に、本研究では連結反応による DNA 成長の実験・理論解析を行った。

単純な DNA 成長の反応として、1 1 種の DNA 断片を PCR (polymerase chain reaction) で合成し、リガーゼ酵素による連結反応を行った。これらの DNA から長さや配列が異なる分子が 5 5 種類得られるが、その長さと濃度を同時に高精度検出する分析手法を開発した。その結果、温度一定・希薄溶液の条件下においては DNA の長さに対して濃度が指数関数的に減少する分布関数となり、平衡系では予想通りランダムな酵素反応が起こることを明らかにした。DNA 以外にも共存分子が存在する複雑な溶液系でライゲーション反応による DNA の長さと濃度の分布関数を計測すると、共存分子の濃度が高まるに連れて指数関数の減衰が抑えられ、長く連結した DNA の濃度が高まることがわかった。しかし、共存分子の濃度が 12% を越えると DNA の長さに対する濃度分布は指数関数的にならず、ロングテールを引くべき減衰に近い分布関数が得られることを見出した。これらの実験結果を説明する理論モデルを構築し、共存分子が指数関数的な濃度減衰を回避する詳細なメカニズムを検討している。

4. 遊泳バクテリアのアクティブマター物理学 (前多、別府)

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

細菌大腸菌 *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細菌懸濁液を封入する手法を確立し、花型の境界形状をもつ微小容器内での集団運動を PIV (Particle Image Velocimetry) から解析を行った。その結果、回転集団運動が対をなした渦ペアが形成されること、渦の回転方向が同じ向き・反対向きの渦ペアが出現することが明らかとなった。渦ペア形成をもたらす要因を明らかにするため、Vicsek モデルとよばれる群れ運動に関する基礎的モデルを平均場近似の下で解析したところ、渦ペアの向きを反転する際に幾何学的な法則が存在することを発見した。さらに、渦が奇数個の三つ子型マイクロウェルでは、隣り合う渦同士の回転軸が反平行で安定化することが許されず、パターンの転移点がシフトすることがわかった。

また、新たなデバイス作成技術の確立により、細菌懸濁液をマイクロウェルに確実に封入し、再現性の高い実験が可能となった。この実験系で幾何学的制約下の細菌集団運動における密度依存性を調査したところ、低密度から高密度への密度変化とともに無秩序相から秩序相への転移が観測された。中間的な密度領域において、渦の回転方向の対称性が破れること、そして高密度の秩序相とは異なる転移点で秩序形成を示すことが見出している。細菌以外にも、ダイニン分子モーターやキネシン分子モーターに運ばれる微小管の集団が渦形成することが知られており、この渦形成を幾何形状の設計から理解する試みも進めている。

5. アクトミオシゲルの力学と対称性の破れ（前多、坂本）

細胞は自律的に変形し、動く。力学的な視点で細胞を眺めてみると、3つの特徴が浮かび上がる。まず、細胞質には細胞骨格やオルガネラがあり、バネのような弾性を示す。さらに、分子モーターやクロスリンカーを介した骨格構造の再編成からドロドロとした蜂蜜のような粘性が生まれ、弾性と粘性が共存する流体（粘弾性流体）となる。そして、この流体は脂質膜の微小区画に内包されている。すると細胞は「小さな区画に囲まれた粘弾性流体」というモデルに帰着する。これらの要件を満たす人工細胞を

創出することから、細胞機能と分子を結ぶ物理的原理を明らかにできると期待できる。

このような動機のもと、我々はアクチンとミオシンモーターを含む *Xenopus* egg 抽出液を油中液滴に封入し、細胞サイズの区画を設けた人工細胞モデルを構築した。観察開始から数分後、アクトミオシンネットワークの収縮によって細胞小器官が凝集したクラスターが形成される。このクラスターが位置する場所は、人工細胞の中心点もしくは境界近傍かの二相に分かれていた。アクチン骨格の動態を蛍光顕微鏡で観察したところ、境界から中心に向かってリング状のアクチンゲルの収縮が起こり、クラスターを中心に移動させる内向きの力が発生していた。一方で、境界のアクチンコレククスと内部のクラスターの間がアクチン繊維で結ばれることで、クラスターを境界に運ぶ外向きの力が出現する。とりわけ、細胞内空間のサイズと細胞骨格の特徴的サイズの比が外向きの力の発生を誘起する転移現象に重要であり、2つの収縮作用の競合が対称性を破るメカニズムであることを明らかにした。本研究で得た知見は、細胞内の幾何学対称性を決定する力学機構の理解に寄与することが期待される。

6.人工細胞の合成生物学（前多、Izri、坂本、高松）

“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、ミクロンサイズのリン脂質ベシクルの形態を持ちながら、自らを複製する能力を持つミニマム細胞を構築することにある。ミニマム細胞とは、現実の細胞を模倣しながらも、可能な限り単純な仕組みで動作する人工物を意味する概念である。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、生命システム的设计原理を明らかにする。

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あらたな手法の開発を行った。25ミクロン直径のマイクロウェルを平面脂質二重膜でシールし、無細胞転写翻訳の遺伝子発現を行うマイクロ流体デバイスを作成した。これらの区画内には、水、DNA、そして必要なタンパク質分子のリボソーム、RNAポリメラーゼ、tRNA、ATP、イオン等が閉じ込められ、遺伝子発現が自律的に行われる無細胞反応系を構成している。内部にはdeGFPを発現するplasmid DNAが封入されており、自律的な遺伝子発現が起こる。遺伝子発現の計測を同時に5000個とることができ、その分布関数を解析すると外部からのエネルギー源の取り込みが、高効

率なタンパク質合成に重要であることを明らかにした。

また、このような微小なリアクターを構築する上で不可欠な影響は、区画サイズ依存性である。人工細胞デバイス内でおこる無細胞転写翻訳反応の活性度がマイクロウェル形状やサイズに依存してどのように変化するかは明らかではない。そこで我々は、遺伝子発現を行うセルフリー抽出液を微小な区画に封入した再構成系を用いて、遺伝子発現のサイズ依存性と転写制御に与える影響を解析した。中性脂質に囲まれる細胞サイズのデバイスを多数並べた人工細胞デバイスを構築した。ここに、DNA から mRNA そして緑色蛍光蛋白質 GFP への転写・翻訳を行うセルフリー遺伝子発現を実装した。すると、リアクターサイズに比例して遺伝子発現産物の濃度が上昇するサイズ依存的な反応が観察された。一方で、負の転写自己抑制を遺伝子回路に導入すると、このサイズ依存性が抑制されることがわかった。このサイズ依存性は、水滴表面における抑制的な翻訳過程を考慮した数理モデルから説明することに成功した。

発表論文

《 原著論文 》

1. Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda.
Anomalous scaling of gene expression in confined cell-free reactions, *Scientific Reports* 8, 7364 (2018)
2. Tatsuya Fukuyama, Sho Nakama, Yusuke T. Maeda.
Thermal molecular focusing: Tunable cross effect of phoresis and light-driven hydrodynamic focusing, *Soft Matter* 14, 5519-5524 (2018)
3. Kazusa Beppu, Ziane Izri, Yusuke T. Maeda, Ryota Sakamoto.
Geometric effect for biological reactors and biological fluids, *Bioengineering* 5, 110 (2018)
4. Jun Takagi, Ryota Sakamoto, Gen Shiratsuchi, Yusuke T. Maeda, Yuta Shimamoto.
Mechanically distinct microtubule arrays determine the length and force response of the meiotic spindle, accepted in *Developmental Cell*

《 その他の論文 》

5. 前多裕介, 坂本遼太, 白木天晴, セルフリー合成生物学, *生体の科学* 69(3), 269-274

(2018)

講演

《海外での講演》

1. Ryota Sakamoto, Yusuke T. Maeda, Tetsuya Hiraiwa, Masatoshi Tanabe, Shin'ichi Ishiwata and Makito Miyazaki, Boundary induced actomyosin wave and symmetry breaking of active gels, Designer Soft Matter 2018, Nanyang Technological University, Singapore, 2018年6月7日.
2. Tatsuya Fukuyama, Kazuhiro Aoki and Yusuke T. Maeda, Collective cell migration driven by cell density wave, Designer Soft Matter 2018, Nanyang Technological University, Singapore, 2018年6月7日.
3. Ziane Izri, Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux and Yusuke T. Maeda, Cell-free gene expression in picolitre micro-reactors sealed by a biological membrane, Designer Soft Matter 2018, Nanyang Technological University, Singapore, 2018年6月7日.
4. Vincent Noireaux, Albrecht Ott, Yusuke T. Maeda, Albert J. Libchaber: Towards self-reproduction of protocells and minimal cells: evolution versus engineering, 18th HFSP Awardees Meeting, Toronto, Canada, 2018年7月10日.
5. Yusuke T. Maeda: Controlling molecular and cellular fluxes by light: The interplay of scanning light-wave and hydrodynamics, Ecole Normale Supérieure, Department of Chemistry, France, 2018年11月12日.
6. Yusuke T. Maeda: Geometric principle for controlling active matters: From bacteria to active cytoskeletons, Hokkaido-Strasbourg Symposium Biotic and Abiotic Molecular Machines and Motors, Strassbourg University, France, 2018年11月14日.
7. Ziane IZRI, Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda: Geometric principle for controlling active matters: On the noise of gene expression in membrane-bound picolitre biochemical reactors, APS March Meeting 2019, Boston Convention and Exhibition Center, Boston, USA, 2019年3月4日.

8. Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda: Collective ordering of bacterial vortices controlled by geometry and frustration, APS March Meeting 2019, Boston Convention and Exhibition Center, Boston, USA, 2019年3月4日.
9. Ryota Sakamoto, Masatoshi Tanabe, Tetsuya Hiraiwa, Kazuya Suzuki, Shin'ichi Ishiwata, Yusuke T. Maeda, Makito Miyazaki: Tug-of-war by active gel shapes positioning symmetry in cell-sized compartment, APS March Meeting 2019, Boston Convention and Exhibition Center, Boston, USA, 2019年3月5日.

《国内での講演》

1. Yusuke T. Maeda: Geometry-driven collective ordering of active vortices, The 79th Okazaki Conference Synthetic, Biological, and Hybrid Molecular Engines, Institute of Molecular Science, 2018年8月30日-9月2日.
2. Kazusa Beppu, Ziane Izri, Yusuke T. Maeda: Geometry-driven collective ordering of active vortices, The 79th Okazaki Conference Synthetic, Biological, and Hybrid Molecular Engines, Institute of Molecular Science, 2018年8月30日-9月2日.
3. Tatsuya Fukuyama, Yohei Kondo, Kazuhiro Aoki and Yusuke T. Maeda: On the relation between mechanics and ERK signaling in collective cell migration, The 79th Okazaki Conference Synthetic, Biological, and Hybrid Molecular Engines, Institute of Molecular Science, 2018年8月30日-9月2日.
4. Ziane Izri, Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux and Yusuke Maeda, Cell-free gene expression in picolitre micro-reactors sealed by a biological membrane, The 79th Okazaki Conference Synthetic, Biological, and Hybrid Molecular Engines, Institute of Molecular Science, 2018年8月30日-9月2日.
5. Ryota Sakamoto, Masatoshi Tanabe, Tetsuya Hiraiwa, Shin'ichi Ishiwata, Yusuke T. MAEDA, Makito Miyazaki, Symmetry breaking of actomyosin and actin-waves in confined artificial cells, The 79th Okazaki Conference Synthetic, Biological, and Hybrid Molecular Engines, Institute of Molecular Science, 2018年8月30日-9月2日.

6. 前多裕介: Active matter, Non-equilibrium physics of autonomous and collective behavior in cells, The 3rd Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences (FRIS) retreat, 東北大学学際研, 2018年9月3日-4日.
7. 前多裕介: 上皮細胞のシグナル伝播と集団運動を結ぶ流れの非平衡力学, 東北大学理学部物理学科, 2018年9月5日.
8. 白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介: 自発的な集団運動における力学とシグナル伝播の関係, 日本物理学会 2018年秋季大会, 同志社大学, 2018年9月10日.
9. 白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介: 遺伝情報分子のライゲーシオンと選択的な成長: Rich-get-richer モデル, 日本物理学会 2018年秋季大会, 同志社大学, 2018年9月10日.
10. Kazusa Beppu, Ziane Izri, Tatsuya Fukuyama and Yusuke T. Maeda: On the geometry and mechanics in collective dynamics of active matters, 第56回日本生物物理学会年会, 岡山大学 2018年9月14日.
11. Kazusa Beppu, Ziane Izri and Yusuke T. Maeda: Geometry driven collective ordering of bacterial vortices, 第56回日本生物物理学会年会, 岡山大学 2018年9月15日.
12. Takaharu Shiraki, Ken-ichiro Kamei and Yusuke T. Maeda: Molecular origin of selective DNA ligation and information growth: The rich-get-richer model, 第56回日本生物物理学会年会, 岡山大学 2018年9月15日.
13. Ryota Sakamoto, Tetsuya Hiraiwa, Masatoshi Tanabe, Shin'ichi Ishiwata, Yusuke T. Maeda and Makito Miyazaki: Periodic contraction of actomyosin gel and nucleus-like cluster positioning in a confined geometry, 第56回日本生物物理学会年会, 岡山大学 2018年9月15日.
14. 前多裕介: To go or not to go: 波打つアクトミオシンゲルと細胞内配置の二相性, 横浜市立大学, 2018年9月27日.
15. 前多裕介: To go or not to go: 波打つアクトミオシンゲルと細胞内配置の二相性, 東北大学工学部応用物理学科, 2018年10月17日.
16. 前多裕介, 坂本遼太, 宮崎牧人: アクティブな人工細胞: 自律的制御の力学と幾何学, 細胞を創る研究会 11.0, 東北大学, 2018年10月18-19日.

17. Tatsuya Fukuyama, Kazuhiro Aoki and Yusuke T. Maeda, On the relation between mechanics and signaling in collective cell migration, APEF2018, 東京大学, 2018年11月12-15日.
18. Kazusa Beppu, Ziane Izri and Yusuke T. Maeda, Geometric principle of active polar vortices in dense and dilute bacterial suspension, APEF2018, 東京大学, 2018年11月12-15日.
19. Ryota Sakamoto, Masatoshi Tanabe, Tetsuya Hiraiwa, Shin'ichi Ishiwata, Yusuke T. Maeda, Makito Miyazaki: Actomyosin waves and percolation control nucleus-like cluster centering in a cell-sized space, APEF2018, 東京大学, 2018年11月12-15日.
20. 別府航早, 坂本遼太: アクティブマターの力学と幾何学: バクテリアの渦、アクティブゲルの波, 第26回応用物理学科セミナー, 東京理科大学, 2018年11月16日.
21. Yusuke T. Maeda: Active bacterial vortices stabilized by geometry and frustration, Advances in Physics on Emergent Order of Active Matter, 金沢四高記念館, 2018年11月19日.
22. Takaharu Shiraki, Ken-ichiro. Kamei and Yusuke T. Maeda: Molecular origin of selective DNA ligation and information growth: The rich-get-richer model, 冥王代生命科学国際シンポジウム, 2018年11月23日.
23. Ziane Izri, Ryo Takamatsu, Vincent Noireaux and Yusuke T. Maeda, On-chip membrane-bound cell-free gene expression artificial cells, 冥王代生命科学国際シンポジウム, 2018年11月23日.
24. 前多 裕介: 光と熱が誘起する流れと運動の非平衡力学, 東京工業大学発動分子科学セミナー, 2018年12月5日.
25. Yusuke T. Maeda: Tug-of-war by active actomyosin gel shapes positioning symmetry in cell compartment, 東京大学物理学専攻, 2018年12月14日.
26. 前多裕介: 発動分子の自律的運動と機能設計のエネルギー論的研究, 新学術領域発動分子科学第1階領域会議, 東京工業大学, 2019年1月26日.
27. 前多裕介: Geometric principle for controlling active matters and interacting bacterial vortices, 九州大学芸術工学科, 2019年1月30日.

28. Yusuke T. Maeda: On the mechanics between ERK wave, adhesion, and collective cell migration, 理化学研究所生命機能研究センター, 2019年2月5日.
29. 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介: 変形するアクトミオシン液滴の非接着運動と力学モデル, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月14日.
30. 白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介: 分子共存による選択的DNA成長の統計力学, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月15日.
31. 福山達也, 江端宏之, 木戸秋悟, 青木一洋, 前多裕介: 波を遡る細胞集団の力学と光遺伝学, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月15日.
32. 別府航早, Ziane Izri, 前多裕介: 低密度バクテリアが示す渦運動のキラリティと流体相互作用, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月15日.
33. 前多裕介, 別府航早, Ziane Izri, 島本勇太, 宮崎牧人: 微小管アクティブ液晶の位相欠陥と幾何学的制御, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月15日.

外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

1. 前多裕介、科学研究費補助金 新学術領域研究（計画研究）「発動分子の自律運動と機能設計のエネルギー論的研究」（研究代表）
2. 前多裕介、科学研究費補助金 基盤研究(B)「極限環境に駆動される自己複製系の成長と進化の合成生物学」（研究代表）
3. 前多裕介、科学研究費補助金 新学術領域研究（公募研究）「分裂するプロトセル：設計原理と力学機構の解明」（研究代表）

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択（学外からの受け入れを含む）

1. 前多裕介、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.））

2. 前多裕介、NTT 九大基礎科学共同研究プロジェクト「ソフトマターが拓くメカノセンシング機構の物理」(研究代表)
3. 福山達也、学術振興会特別研究員奨励費「非平衡輸送現象と流れの動的結合の解明：分子操作から分子整流へ」(研究代表)

他大学での研究と教育

学部4年生卒業研究

高松 凌 (指導教員：前多)：転写制御の理解に向けた人工細胞デバイスの構築と解析

修士論文

坂本遼太 (指導教員：前多) 人工細胞で探る細胞内の対称性と自律的反応の非平衡ダイナミクス

別府航早 (指導教員：前多) 遊泳バクテリアの集団運動における非平衡渦構造と幾何法則

合屋 純 (指導教員：前多) 集団運動の秩序形成に関する Vicsek モデルの数値計算的研究

受託研究・民間との共同研究

その他の活動と成果

2018 年度客員教授

理化学研究所 RI 応用チーム チームリーダー 羽場宏光

実験核物理分野で、2017 年度から 2018 年度までの 2 年間、羽場宏光氏 (理化学研究所 RI 応用チーム チーム リーダー) が、客員教授を勤められている。

羽場教授には、森田と共に新元素探索 (nSHE) プロジェクトを理化学研究所にて主導していただき、スタッフ及び 10 名の博士・修士課程の大学院生を受け入れた上で実験における各種の指導を行なっていただいた。また、実験の方向性や戦略の立て方に関して、大学院生への研究指導と議論を行なっていただいた。

また、大強度ビームに耐える標的開発のために加速器のビームタイムを取得して、博士課程の大学院生と協力して照射試験を行なっていただいた。特に、理研核化学チームを中心に作成した標的サンプルに照射試験をする際の実験指導、実験データの解釈のための精密なエネルギー損失の計算方法などに関して指導いただいた。新元素探索実験で使用している飛行時間測定装置の改良のため、2 次電子放出窓と重元素核の相互作用などについて、詳細な研究指導を行っていただいた。

重元素核同士の融合障壁分布の研究において、障壁分布と蒸発残留核生成断面積の比較のため、各国の施設における 106 番元素 Sg の蒸発残留核の測定手法の現状と、データの含みうる系統誤差に関して、研究指導いただいた。

羽場教授の放射性同位体 (RI) についての知識と技術に基づき、超重元素探索実験における Cm 標的や、 ^{252}Cf などの非密封放射線源の取り扱い及び安全対策について、大学院生に指導いただいた。

上記のように、羽場教授には 2017・2018 年度の 2 年間に渡り、既存の実験核物理研究室のスタッフとの緊密な連携の上で、理化学研究所における大学院生の受け入れと研究指導、新元素探索プロジェクトの遂行、必要な装置開発などを、本学大学院生を指導しながら強力に推進していただいた。羽場教授のご協力のもと、2018 年度には九州大学を拠点とする実験核物理研究室のメンバーが延べ 100 日以上、さらにジュニアリサーチアソシエイトとして理研に常駐している 2 名の大学院生が新元素探索実験に継続的に参加し、大きな貢献を果たすことができた。

文責: 森田浩介

平成30年度教職員一覧

研究グループ	教授	准教授	講師	助教
素粒子理論	鈴木博			奥村健一
理論核物理	肥山詠美子	清水良文		松本琢磨
宇宙物理理論	橋本正章			町田真美
粒子系理論物理	原田恒司+++	大河内豊+++ 小島健太郎+++		田尾周一郎+++
素粒子実験	川越清以	東城順治 吉岡瑞樹*		織田勸 末原大幹 音野瑛俊*
実験核物理	森田浩介 若狭智嗣 羽場宏光+	寺西高 坂口聡志		藤田訓裕 郷慎太郎
物性理論	福田順一		松井淳	
統計物理学	中西秀	野村清英		藪中俊介
凝縮系理論		河合伸 成清修		
磁性物理学	和田裕文	光田暁弘		
量子微小物性	渡部行男			荒井毅++
固体電子物性	木村崇			山田 和正 大西 紘平
光物性		佐藤琢哉		
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		前多裕介		

+客員 ++准助教 +++基幹教育院 *RCAPP

技術職員	加速器・ビーム応用科学センター 岩村龍典
------	----------------------

平成30年度各種委員

(○は委員長)

部門長・学科長・専攻長：福田

副部門長：鈴木、若狭

将来計画委員：○中西、川越、木村(康)、肥山、若狭、佐藤、東城

教育課程委員：○木村(崇)、鈴木、若狭、清水、河合、水野、前多、野村、松井、坂口、
松本

入試委員会委員長(全ての入試関連委員会の統括)：川越

助の会幹事：大西

社会連携委員：○渡部

奨学金資格検討委員：○橋本、肥山、東城、成清、前多

経理委員：○川越、木村(康)

業績評価部会：○木村(崇)

就職：○木村(康)、前多

成績管理：○寺西、松井

図書：○成清、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、奥村

広報委員：○若狭、吉岡、佐藤、河合、水野、末原

エントランス展示：○河合、寺西、前多

大学院説明会：○光田、松井、藤田

年次報告担当：○河合

談話会：稲垣

教員積立会計：佐藤

教員免許更新講習：○渡部、野村

衛生管理：清水、寺西、松井、山田、荒井、福田

体験入学・入学オリエンテーション実施委員：○水野、岩下、藤田、

未来の科学者：○渡部、佐藤

理学部便り編集委員：末原

障害学生支援：坂口、河合

ハラスメント関連支援室：○中西、若狭、松井、町田

なんでも相談窓口：松井、町田

留学生相談委員：松本

科研費採択率向上委員：渡辺

H30 年度 物理学教室談話会

世話人 稲垣 紫緒

第 1 回物理学教室談話会

講演題目：アキラルなソフトクリスタルの電子線による非平衡ダイナミクス(Photoexcited spin-polarized and/or spin current from nonmagnetic surfaces)

講師：多辺 由佳 氏

(早稲田大学 先進理工学術院 物理学及応用物理学専攻・教授)

日時：6月13日(水) 16:00 ~ 18:00

場所：物理部門会議室 (W1-A-711)

第 2 回物理学教室談話会

講演題目：「革新的質量分光器 MRTOF を用いた短寿命原子核の網羅的質量測定 --ニホニウムの質量測定に向けて--」

講師：和田 道治 氏

(高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・教授)

日時：7月5日(木) 16:30 ~

場所：物理会議室 (W1-B-212)

第 3 回物理学教室談話会

講演題目：Short-range entangled states and bulk-edge correspondence: Symmetry protection and Z_N Berry phases

講師：初貝 安弘 教授 (筑波大学大学院数理物質科学研究科 物理学専攻)

日時：7月17日(火) 16:00~17:30

場所：物理部門会議室 (W1-A-711)

第 4 回物理学教室談話会

講演題目：Spin-charge conversion induced magnetoresistance and related applications

講師：Yihong Wu 氏(国立シンガポール大学・教授)

日時：7月24日(火) 17:00 - 18:00

場所：物理部門会議室 (W1-A-711)

第 5 回物理学教室談話会

講演題目：超弦理論から現実的素粒子像へ向けて

講師：小林 達夫 氏 (北海道大学)

日時：9月11日(火) 16:00~

場所： W1-A-722 物理セミナー室 2

第 6 回 物理教室談話会

講演題目： SuperKEKB/Belle II 実験の状況と今後の展望

講師：飯嶋 徹 氏（名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構
現象解析センター・教授）

日時： 11 月 1 日(木) 16:40～

場所： ウエスト 1 号館 B 棟 2 階 212 号室 (W1-B-212)

第 7 回 物理教室談話会

講演題目：宇宙の大規模構造と宇宙論

講師：松原隆彦教授（高エネルギー加速器研究機構）

日時： 11 月 8 日（火） 16:00 ～ 17:30

場所： IMI オーディトリウム（ウエスト 1 号館 D 棟 4 階 413 号室）

第 8 回物理学教室談話会

講演題目：メスバウアー分光法・放射光核共鳴散乱法による物質・
生命科学の展開

講師：瀬戸 誠 氏（京都大学複合原子力科学研究所・教授）

日時： 11 月 28 日(水) 16:00～17:30

場所：物理会議室（ウエスト 1 号館 A-711 室）

第 9 回物理学教室談話会

講演題目：強相関電子系における多重光キャリア生成とシフト電流光電変換

講師：Daniel Jeans 氏（高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所
准教授）

日程： 12 月 12 日(水) 16:40 ～ 18:00

場所：物理会議室（ウエスト 1 号館 A-711 室）

第 10 回物理学教室談話会

講演題目：Min たんぱく質における波の形成と空間形状

講師：義永 那津人氏（東北大学材料科学高等研究所）

日時： 1 月 16 日（水） 14:50-16:20

場所：物理セミナー室 3（ウエスト 1 号館 A-723）

第 11 回物理学教室談話会

講演題目：新元素の核化学－反跳核分離装置を用いた新展開－

講師：羽場 宏光 氏（理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

R I 応用研究開発室・室長、九州大学 大学院理学研究院物理学部門・客員教授）

日時：1月21日（月）16:30 - 18:00

場所：教育情報システム室（W1-C-201 室）

第12回 物理学教室談話会

講演題目：青銅比準結晶と近似準結晶

講師：堂寺 知成 氏（近畿大学理工学部・教授）

日時：1月24日（木）16:30 - 18:00

場所：物理会議室 A-711（W1-A-711 室）

平成 30 年度九大原子核セミナー開催一覧

第 947 回 2018 年 4 月 20 日 (金)

講師：Dalibor Skoupil (九州大学)

演題：Electromagnetic Production of Hyperons

第 948 回 2018 年 5 月 31 日 (金)

講師：伊藤 誠 (関西大学)

演題：Evidence of an enhanced nuclear radius of the α -halo state via $\alpha + {}^{12}\text{C}$ inelastic scattering

第 949 回 2018 年 6 月 22 日 (金)

講師：初田 哲男 (理化学研究所)

演題：Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD 格子量子色力学に基づくバリオン間相互作用

第 950 回 2018 年 7 月 6 日 (金)

講師：福田 光順 (大阪大学)

演題：核反応で探る原子核構造

第 951 回 2018 年 10 月 19 日 (金)

講師：鷺山 広平 (九州大学)

演題：Fusion hindrance in heavy nuclear systems with time-dependent Hartree-Fock

第 952 回 2018 年 11 月 27 日 (火)

講師：Miguel Maeques (GANIL)

演題：First observation of the heaviest Boron and Nitrogen isotopes

平成30年度非常勤講師一覧

講師	所属	題目
小林達夫	北海道大学大学院理学研究院	Introduction to string phenomenology and cosmology
飯島 徹	名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 現象解析研究センター	高輝度フレーバーファクトリーにおける素粒子研究
和田道治	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	低速 RI ビーム生成装置の開発について
堂寺知成	近畿大学工学部	ソフトマターの幾何学
初貝安弘	筑波大学数理物質系	トポロジカル相の発見とその展開
瀬戸 誠	京都大学原子炉実験所	メスパウアー・核共鳴散乱分光法とその物質・生命科学研究における展開
多辺由佳	早稲田大学 先進理工学部 応用物理学科	キラル液晶の非平衡ダイナミクス
義永那津人	東北大学材料科学高等研究所	アクティブマター物理学
Juame Carbonell	オルセー原子核物理研究所	Exotic nuclei and hadron systems from view point of few-body problem
Wu Yihong	シンガポール国立大学工学部	Nanomagnetism and Nanospintronics

平成30年度外国人研究者等受入記録

所属・職・氏名	所在地	受入の目的	受入期間	受入者
北京航天大学・PhD・ Wu Tian-wei	中華人民 共和国・	共同研究のため	30年3月5 日～30年6 月1日	肥山
CEA Grenoble・研究員・ Xavier Waintal	フランス	国際的な活躍が期待 できる研究者の育成 事業「ナノスピンスイ エンス研究を基軸に した国際的若手研究 者の育成」	30年4月3 日～30年4 月10日	木村(崇)
University of Mainz・ 教授・Mathias Kläui	ドイツ	国際的な活躍が期待 できる研究者の育成 事業「ナノスピンスイ エンス研究を基軸に した国際的若手研究 者の育成」	30年4月5 日～30年4 月6日	(木村崇)
University College London/Imperial College London・ 博士課程学生・ Dion Troy Callum	イギリス	外国人訪問研究員 (JSPS サマープロ グラム)	30年6月19 日～30年8 月21日	木村(崇)
the French National Center for Scientific Research・Research Director・ Jaume Carbonell	フランス	研究議論のため	30年11月3 日～30年11 月27日	肥山
Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien・研究員・ Rimantas LAZAUSKAS	フランス	研究打合せ	29年11月4 日～30年11 月10日	肥山
GANIL 研究所・研究員・ MARQUES MIGUEL	フランス	研究議論のため	30年11月 25日～30年 11月26日	肥山

2018 年 4 月 1 日における委員名簿と各委員の役割

役割	担当者
委員長	木村崇
副委員長	鈴木
時間割・シラバス	若狭
学科 FD	前多
コース分属	水野
中期計画	河合、八尋、鶴田
過年度担当	松井、鶴田
学生実験	光田
特研配属	清水、坂口
カリキュラム	野村
基幹教育科目	前多
アンケート	松本
授業参観	河合
文書確認	鈴木、木村

2018 年度の教育課程委員会の活動を時系列順に列挙すると以下のようになる：

- ・ 学位審査の客観性担保に関する資料作成
- ・ 学部新生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・ 過年度生に対する個別の履修指導
- ・ 大学院生新生オリエンテーションにおける授業履修関連事項の説明、企画と実行
- ・ 学習支援室の体制の整備、役割（過年度生の学習支援など）の設定、TA の設定
- ・ 合理的配慮を必要とする学生への対応の連絡と調整 ・ 講義、シラバス入力の設定
- ・ 学生の入試形態別学力の追跡調査
- ・ 3 年次編入学生の単位認定制度の改訂
- ・ 新生 基礎学力調査の実施 ・ 「大学の実力調査」への対応
- ・ 教職免許法改正に向けた担当教員の調整

- ・ 2018年度からの基幹教育カリキュラムの変更点の点検と検討
- ・ 基幹教育科目部局担当コマに関連する調整
- ・ 初年度生の出席状況に関する基幹教育院との情報共有に関する議論
- ・ 後期の授業時間割の確認、調整
- ・ 過年度生の2年次進級判定の準備
- ・ 国際コース配属学生への対応
- ・ 学部入学者に係る個人用パソコンの仕様の設定
- ・ 次年度の講義担当希望調査、原案作成および調整
- ・ 学生実験担当者のミーティング
- ・ 授業アンケート実施・問題点への対応
- ・ 国際コースに関連した外国語を用いた科目の設定案作成、調整
- ・ 担任、アドバイザー、科目担当者等を交えた成績不振者との面談と修学指導
- ・ 過年度生のコース分属認定と専攻科目の履修に関する（個別）指導
- ・ 他学科科目の単位認定申請に対する対応
- ・ 2019年度入学者向けの専攻科目一覧案及び時間割案作成
- ・ 障がいのある学生の物理学生実験受講の対応
- ・ 理学研究院・物理学部門ファカルティディベロップメント（FD）『グループワークと活気ある授業に向けたアクティブラーニング』講師：佐藤 琢哉 先生（物理学部門）大河内 豊先生（基幹教育院）の開催
- ・ 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
- ・ 2017年度入学者対象のコース配属予備調査
- ・ 特別研究生配属調整
- ・ 次年度進級・新入生・編入生ガイダンス計画
- ・ コース配属
- ・ 次年度理学部・理学府履修の手引きの確認作業

教育課程委員会が、上記の通常の業務以外に今後特に注意すべき課題としては、カリキュラムのスリム化・改革への対応、2022年度からの本格的に改変される基幹教育に合わせた、専攻教育のクォーター化への対応などがある。また、授業に関しては、以前、一教員のあたりの担当コマ数が多いのは事実である。また、助教の人数の減少に伴い、学生実験の運営が困難となりつつあり、今後、中講座で連携して対応する必要がある。

平成30年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

「活気ある授業に向けたグループワーク・アクティブラーニング」

開催日時：平成28年12月21日（金） 16：30～17：30

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「グループワークによる授業の活性化」を主たるテーマとして、授業の中でグループワークを実践しておられるお二人の先生にご講演を依頼した。授業の活性化への効能や課題を共有することで、当研究院・当専攻の授業をより良いものにできると期待し、本部門・准教授の佐藤 琢哉先生と基幹教育院自然科学理論系部門・准教授 大河内 豊に講演を行って頂いた。

佐藤先生は基幹教育科目「基幹物理学 1B」でグループワークを取り入れた授業を実施されている。電磁気学と熱力学という古典物理学の学習内容と現代的なアクティブラーニングがどのように交わるかをご講演頂いた。グループワークを取り入れた理由の1つに、佐藤先生ご自身が学生時代に自習や自主ゼミで理解を深めたという経験があり、自習や復習を課しながら板書だけではない学生の主体的な学びが重要であるということのエピソードと共に紹介された。原田先生・小嶋先生の講義を参観し、アクティブラーニングの講義スタイルを取り入れた。2018年度講義の出席率は90%を越え、「グループワークにより理解が深まった」という多数の意見からも良好な効果が伺えた。出席者との議論では、成績評価や個別的な到達度について活発な意見が交わされた。

続いて、大河内先生に基幹教育院自然科学部門に置けるアクティブラーニングの取り組みについて講演を行って頂いた。大河内先生の担当授業は最初の15分～40分の時間にグループワークを行っている。さらに自習用のビデオを Moodle にアップし、学生が M2B 学習支援システムを用いて授業内容に簡単にアクセスできる工夫を行っている。アンケート結果でも学習意欲と双方向性のいずれも好評価であり、自由記述でも従来型の講義よりも学びの楽しさを噛み締めている様子がうかがえるものであった。成績評価でも中間試験を行わずに、発表会を行っておられる。出席者との議論においては、ビデオを用いた授業や自主学習の普及、グループワークとビデオ講義ができる TA の育成等、多角的で活発な意見交換がなされた。アクティブラーニングの実際を通じて、本学における学習教育のスキル向上について議論する参考となった。

平成30年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科	56	45 (物理学コース)
物理学科3年次編入	3	—
修士課程 (物理学専攻)	45	33
博士課程 (物理学専攻)	11	博士学位取得者5

2018年度の就職・進学状況

2018年度もここ数年同様、物理学科への求人が増える傾向にあり、学生もこれらの企業にこだわらずに就職先を選択している傾向がある。企業と学生の接触の解禁は3月1日、入社選考開始は6月1日であるが、実質的な選考は5月末を目指して行われるため、学生、企業双方とも短期決戦の様相が強くなり、双方とも知名度と個人の資質差による2極化が強まる傾向にある。ことに、経団連縛りのない企業においては、3月以前から実質的な選考を開始し、早期の人材確保を進めている。今後も表向きの就職活動期間の短縮化、およびインターンシップによる事前選考の傾向は今後も進んでいくとみられ、表面的な就職活動期間の短期化が、逆に非明示的な就職期間の拡大を加速していることは皮肉といえよう。

このような表向きの就職活動期間の短縮や企業の早期人材確保は別の側面で負の効果を生み出している点も懸念される。すなわち、「九大ブランド」による学科推薦、大学推薦が学生にとって選考プロセスの短縮化や希望の部署への優先配属等の利益をもたらすが、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きている。今後ますます学生の能力差が就職活動に与える影響が大きくなると考えられ、会話やプレゼンテーションなどの自己発信能力、エントリーシートなどにおける文章力などの基礎的な能力の涵養が学部・大学院教育でも重要になると思われる。また、学生が企業の早期人材確保を利用して、希望度の低い企業の内定を滑り止めとして複数確保するケースが見られる。企業側がよりよい人材確保を目的としていることは理解できるが、今後、行き過ぎた人材確保は従来の大学と企業の信頼関係に基づく推薦制度を不安定化する懸念がある。

就職先は例年通り多岐にわたっているが、求人に関しては情報関連企業（ベンチャー企業も含めて）が急増している。ことに人工知能やビッグデータ解析等の新しい分野においては数学と物理学の基礎をマスターしている人材への需要は高く、今後とも物理学科における基礎教育の充実が就職に関しても重要なセールスポイントになるものと予想される。

修士の進路・就職

2018年度の修了者は33名で、このうち、博士課程進学者が6名、民間企業22名、国家公務員3名（警察庁、気象庁、製品評価技術基盤機構）、教員2名であった。民間企業の主な就職先は、東芝、NTTコミュニケーションズ、NTT西日本、AGC、京セラ、沖縄電力、アーステクニカ、新日鉄住金ソリューションズ、SCSK、シンプレクス、AIG損害保険、ANA、アチーブメント、セック、日本年金機構、アスパーク、富士通九州システムズ、NECソリューションイノベータ、SHIFT、リアルグローブ。

博士の進路・就職

博士課程修了者は5名であり、国家公務員2名、PD3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38名（九大物理31名、他学府1名、他大学6名）、民間企業就職4名、公務員1名、未定2名であった。民間企業としては日本電産、アルプス技研、ファインデックス、オリズンであった。物理学科では学部で就職者が少なく、情報提供や活動方法の指導等の支援を今後強化していく必要がある。

物理学科物理学コース学生の進路

進学 38人

理学府物理学専攻への進学 31人（内数）

理学府物理学専攻以外への進学 7人（内数）

就職 5人

大学院理学府物理学専攻修士課程学生の進路

進学 6人

就職 27人

大学院理学府物理学専攻博士課程学生の進路

就職 5人

第22回 体験入学・公開講座報告

担当:水野大介

平成31年3月25日(月)～26(火)の2日間にわたって、「第22回体験物理学」を実施した^{注1}。セミナー部分を公開講座として一般向けに広く解放し、大学への3年次編入を考えている高等専門学校生への説明会を兼ねている。例年と同様に、福岡県内の全ての高校と周辺県の有力高校に案内状を送り、参加者を募集した。80名を超える応募があり、抽選で60名の参加を受け付けた^{注2}。また、同時に開催している高専生向けの公開講座・研究室見学の参加者は2名であり、最近参加人数が減少している。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。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(面白いー普通ー面白くない)と難易度(難しいー普通ー易しい)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。例年と同様の傾向であり、概ね好評であったと考えている。

昨年度から、入学者に対して体験入学参加の有無を確認しているが、残念ながら例年0～1名に留まる。学科として重視し力を入れて実施している割に、入学者の獲得という点ではあまり効果がないようであり、今後の検討課題である。

注1)理学部の他3学科の同様の活動はいずれも所要1日で開催されている。

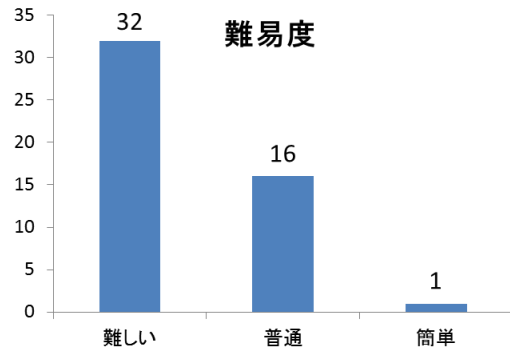
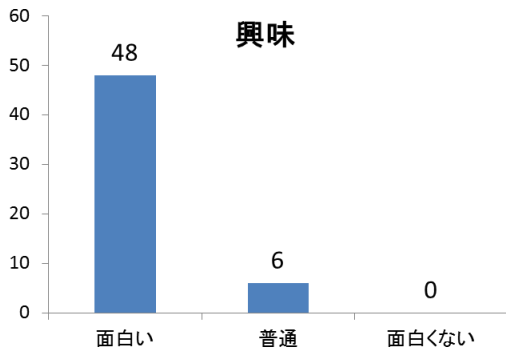
注2)例年、定員に達次第受付終了としていたが、高校教員が多数取りまとめて申し込むことが多く、個人で申し込む学生が参加できない問題があったため変更した。

[プログラム]

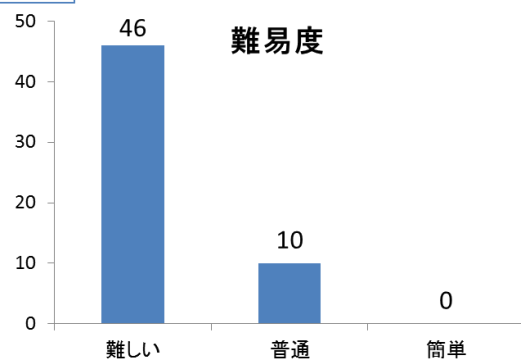
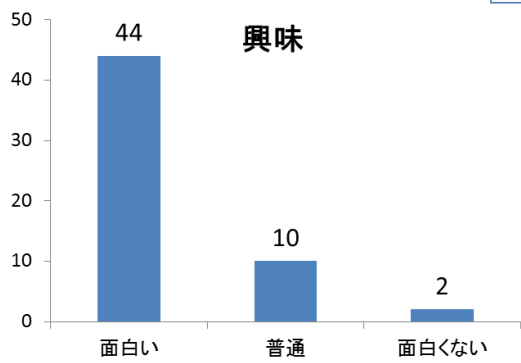
	3月25日(月)		3月26日(火)
10:15 ~ 11:00	開校式	10:00 ~ 10:05	実験の注意
11:10 ~ 12:00	「カオス～簡単なものの複雑な振る舞い～」(中西教授)	10:10 ~ 12:10	実験(A～Fから1テーマ)
12:00 ~ 13:30	昼休み	12:10 ~ 13:10	昼休み
13:30 ~ 14:20	「ミクロの世界を視る～素粒子・原子核そして宇宙～」(松本助教)	13:10 ~ 13:15	集合

14:30 ~ 15:20	「宇宙磁場とブラックホール」 (町田助教)	13:20 ~ 15:20	実験(A~F から 1 テーマ)
15:30~	体験入学：一日目終了解散 一般公開講座：閉校式 高専生向け講座：研究室訪問	15:30 ~ 15:45	閉校式

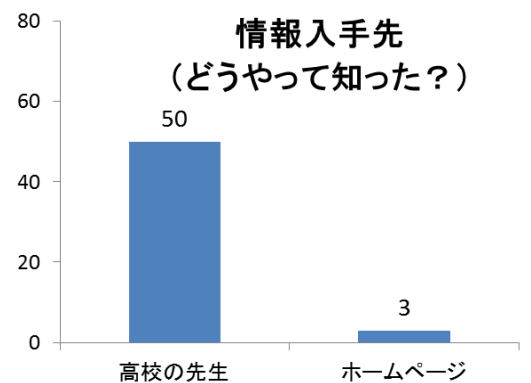
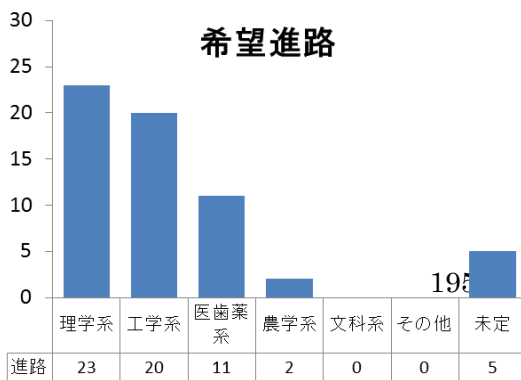
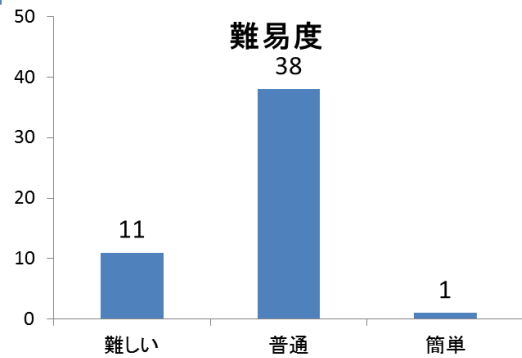
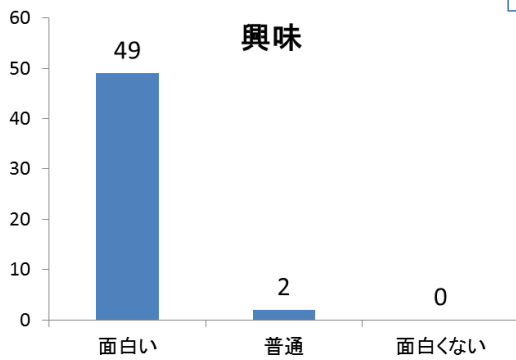
体験入学全体の印象



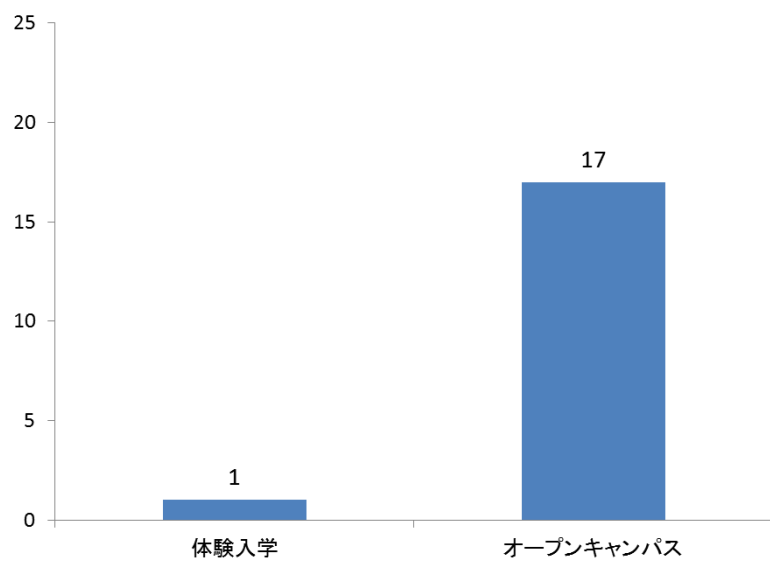
セミナー



実験



新入生に対する各行事参加アンケート



2018年度(平成30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) 福岡県立伝習館高等学校

平成30年11月14日（水） 2年生対象 40名程度
織田 勸 助教

2) 熊本県立玉名高等学校

平成30年10月18日（木） 1～2年生対象 40名程度
坂口 聡志 准教授

3) 福岡県立京都高等学校

平成30年7月27日（金） 1～2年生対象 40～60名
清水 良文 准教授

4) 福岡県立福岡高等学校

平成30年7月10日（火） 2年生対象 40名
町田 真美 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30年 8月 9日

物理学部門の講演は、

吉岡 瑞樹 准教授 (素粒子実験)

「素粒子物理学の最先端とニュートリノの小さい質量」

水野 大介 教授 (物性実験)

「アクティブマター (非平衡系) としての生き物の実験物理学」

取りまとめ 渡部 行男 教授

3) 先端科学体験事業 (体験物理学)

実施日：平成31年 3月25日(日)～26(月)

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

1. 「カオス～簡単なものの複雑な振る舞い～」(中西教授)
2. 「ミクロの世界を視る～素粒子・原子核そして宇宙～」(松本助教)
3. 「宇宙磁場とブラックホール」(町田助教)

実験

- A. 物質を透過する粒子線 (寺西 高 准教授、坂口 聡志 助教)
- B. 極低温の世界 (光田 暁弘 准教授)

- C. 超伝導を体験する (山田 和正 助教)
- D. エントロピー：ゴムの伸び縮みを考察しよう (松井 淳 講師)
- E. 光の回折と波の不思議
 ー波動の重ね合わせと高校・大学の数学ー (荒井 毅 准助教)
- F. 身の回りの放射能を調べよう (藤田 訓裕 助教)

[開講日程・内容]

[プログラム]

	3月25日(月)		3月26日(火)
10:15 ~ 11:00	開校式	10:00 ~ 10:05	実験の注意
11:10 ~ 12:00	「カオス～簡単なものの複雑な 振る舞い～」(中西教授)	10:10 ~ 12:10	実験 (A～Fから1テーマ)
12:00 ~ 13:30	昼休み	12:10 ~ 13:10	昼休み
13:30 ~ 14:20	「ミクロの世界を視る～素粒子・ 原子核そして宇宙～」(松本助教)	13:10 ~ 13:15	集合
14:30 ~ 15:20	「宇宙磁場とブラックホール」 (町田助教)	13:20 ~ 15:20	実験 (A～Fから1テーマ)
15:30～	体験入学：一日目終了解散 一般公開講座：閉校式 高専生向け講座：研究室訪問	15:30 ~ 15:45	閉校式

4) 公開講座 現代物理学入門

実施日：平成31年 3月25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30年度オープンキャンパス

実施日：平成30年8月4日(日)

内容：研究室見学、講義を行った