

物理教室年次報告書  
平成29年度

2018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29年度の研究テーマと成果	
素粒子理論	2
理論核物理	12
宇宙物理理論	23
粒子系理論物理	32
実験核物理	39
素粒子実験	51
物性理論	89
統計物理学	95
凝縮系理論	101
磁性物理学	105
量子微小物性	115
固体電子物性	123
光物性	132
低次元電子物性	141
複雑物性基礎	144
複雑流体	159
客員教授	167
教職員一覧	168
各種委員一覧	169
物理学教室談話会	170
九大原子核セミナー	173
非常勤講師一覧	175
外国人研究者等受入記録	176
教育課程委員会活動報告	178
物理学部門ファカルティ・デベロップメント報告	180
入学者数と卒業者数	181
就職・進学情況	182
体験入学・公開講座報告	183
社会活動貢献報告	185

## はじめに

本年度報告は、九州大学理学研究院物理学部門の2017年度の活動をまとめたものです。

本年度は、理学研究院の伊都キャンパスへの移転から2年が経ち、新しいキャンパス環境での物理学教室の活動も軌道に乗ってきたように思います。

まず、本年度は物理学部門内の人事面では、大きな動きがありました。4月には、物性理論研究室に福田順一教授が着任、9月には、理論核物理研究室に肥山詠美子教授着任されました。3月には、実験核物理研究室で坂口聡志助教が准教授に昇任されました。また、今年度は、長年物理学教室の研究教育活動に御尽力されて来られた八尋正信教授と鴫田昌之教授が定年退職されました。皆様の今後の御活躍を願っております。

一方、表彰関連では、森田浩介教授が、113番元素ニホニウムを発見、命名された功績に対して「第76回西日本文化賞」を受賞されました。また、若狭智嗣准教授が「平成28年度特別研究員等審査会専門委員（書面担当）表彰」を受けられています。また私事ながら、鈴木は「第11回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞」と「日本物理学会第23回論文賞」を頂くことができました。

物理学教室に関連する組織の設置としては、4月に「粒子系理論物理学」研究室が発足し、6月には理学研究院附属超重元素研究センターが設置されました。森田教授を中心にますますの研究成果を挙げて頂けることと思います。

また、和田教授が次期の理学研究院長を務められます。和田先生には、大変なお仕事ですが、理学研究院の一層の発展のために御尽力頂きたいと思います。

2018年度の物理学部門長は、着任早々ですが福田順一教授にお願いすることになりました。福田先生を中心に物理学部門の一層の発展を期待致します。

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。是非御覧下さい。

物理学部門 部門長 鈴木博

# 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 》

《 大学院 博士課程 》

笠井彩

《 大学院 修士課程 》

釘崎充規 (粒子系理論物理学)

土屋創聖 (粒子系理論物理学)

森川億人

下条昴礼

《 学部 卒業研究生 》

石川航輔

古賀一成

柴田和哉

中山聖

《 訪問研究者 》

井上研三

郷六一生

豊田文彦

## 担当授業

物理学入門 I (鈴木博)、量子力学 II (鈴木博)、物理学総合演習 (鈴木博)、物理学ゼミナール (鈴木博・奥村健一)、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 (奥村健一)、M1 ゼミナール (奥村健一)

## 研究・教育目標と成果

**Grabowska–Kaplan によるカイラルゲージ理論の格子定式化の解析** (牧野広樹、森川億人、鈴木博)

素粒子標準模型に代表されるカイラルなゲージ理論の非摂動論的定式化は古くからの難問である。この問題に対して、最近 Grabowska と Kaplan が新しいタイプの提案を行った。そこでは、カイラルオーバーラップ演算子という新しい格子上のディラック演

算子を用いることで、ディラックフェルミオンを左手型と右手型のワイルフェルミオンに分離する。さらに、左手型は元のゲージ場  $A$  に、右手型は元のゲージ場を無限の時間グラディエントフローしたゲージ場  $A_*$  と相互作用でしていると設定する。 $A_*$  は、基本的にピュアゲージになっている。この設定により、ゲージ場からは effective に左手型のフェルミオンしか見えないというシナリオである。我々は、この定式化に対し、摂動論を用いることで、フェルミオンのループが  $A$  と  $A_*$  との間に局所的な相互作用を誘導することを指摘し、その形を完全に決定した。こうした相互作用は、ゲージ対称性の破れとみなすことができ、この定式化の正当性に対する疑義を提示したことになる。

### グラディエントフローとウィルソン流くりこみ群のフロー（牧野広樹、森川億人、鈴木博）

グラディエントフローとは、場の理論に仮想的な時刻を導入し、その時刻に沿って場の変数や物理量を時間発展（フロー）させるものである。この時刻はエネルギーのスケールに対応する。この時間発展の考え方は、いわゆるウィルソン流くりこみ群に従うフローに極めて類似であり、実際、過去に、両者の関係・類似性について議論した先行研究が存在する。この研究で我々は、相関関数のスケール変換に基づく極めて単純な議論を用いることで、両者を結合定数の写像の意味で同一視できることを指摘した。さらに、この考え方の illustration として、非自明な赤外固定点を持つ場の理論、BanksZaks 固定点を持つ 4 次元の多フレーバーゲージ理論、WilsonFisher 固定点を持つ 3 次元の  $O(N)$  非線形シグマ模型におけるウィルソン流くりこみ群のフローをグラディエントフローで定義された物理量から解析した。

### グラディエントフローを用いて定義されたエネルギー運動量テンソルを用いた重力場中の軸性 $U(1)$ アノマリー（森川億人、鈴木博）

グラディエントフローを用いることで、平坦な時空のゲージ理論におけるエネルギー運動量テンソルを定義することができる。ここでは、その応用として、木村利栄によって約半世紀前、1969 年に導出された重力場中の軸性  $U(1)$  アノマリーを求めることを試みた。これは、平坦時空からの展開では、軸性  $U(1)$  カレント-エネルギー運動量テンソル-エネルギー運動量テンソルの作る 3 角形ダイアグラムの関連するウォード-高橋関係式の破れとして与えられる。この解析を通じて、グラディエントフローを用いて定義されたエネルギー運動量テンソルは、他の複合演算子と時空同一点で一致する場合には必ずしも並進ウォード-高橋関係式を満たさないことが明確になった（他の複合演算子と時空同一点で一致しない場合には正しく保存則が成り立つ）。現在、この点を解決する方法を考察しているところである。

## カイラルゲージ理論の新しい格子定式化と非対称暗黒物質（奥村健一）

カイラルゲージ理論の格子ゲージ理論による非摂動的定式化は未だに成功しておらず長年の懸案であった。最近になって D. M. Grabowska と D. B. Kaplan により候補となる定式化が提案された。この定式化ではゲージ場を仮想的な余次元方向へゲージ不変な拡散方程式によって拡散 (gradient flow) させ、カイラルフェルミオンのディラックパートナー (fluff) を導入して結合させる。無限に拡散させた極限で fluff はゲージ対称性を保ったまま脱結合し、実効的にカイラルゲージ理論が実現される。先行研究で鈴木と奥村は fluff がアノマリーを介してカイラルフェルミオンと相関を持つことを示し、標準模型においてクォークやレプトンに対応する Fluff が非対称暗黒物質となる可能性を指摘した。本年度はこの可能性をさらに具体的なモデルとして実現させるための研究を行った。fluff が QCD スケール以下の有効理論に残ると  $U_A(1)$  問題が再来し、 $\eta'$  メソンを重く出来ないか、軽い南部・ゴールドストーン粒子が現れてしまう。また fluff を暗黒物質として機能させるためにも質量を持たせる必要がある。これを実現するためには fluff にヒッグス場を結合させる必要がある。また非対称暗黒物質として機能させるためには宇宙初期に熱的に生成された fluff の粒子・反粒子対称成分を対消滅させて放射エネルギーに転嫁する必要がある。gradient flow を用いた定式化が無矛盾にこうした現象論的要求を満たすことができるかどうか考察を行った。

## 発表論文

《原著論文》

Proof of the renormalizability of the gradient flow:

Kenji Hieda, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki,

Nuclear Physics **B918** (2017), 23–51

[arXiv:1604.06200 [hep-lat]]

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

Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi,

Physical Review D **96** (2017), 014509

[arXiv:1609.01417 [hep-lat]]

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

4D  $\mathcal{N} = 1$  SYM supercurrent in terms of the gradient flow:  
Kenji Hieda, Aya Kasai, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2017** (2017), 063B08  
[arXiv:1703.04802 [hep-lat]]

One-loop perturbative coupling of  $A$  and  $A_\star$  through the chiral overlap operator:  
Hiroki Makino, Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2017** (2017), 063B08  
[arXiv:1704.04862 [hep-lat]]

Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow:  
Hiroki Makino, Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2018** (2018), 053B02  
[arXiv:1802.07897 [hep-th]]

Axial  $U(1)$  anomaly in a gravitational field via the gradient flow:  
Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki,  
[arXiv:1803.04132 [hep-th]], to appear in Progress of Theoretical and Experimental  
Physics (2018)

⟨⟨Proceedings⟩⟩

Energy–momentum tensor on the lattice: recent developments:  
Hiroshi Suzuki,  
PoS LATTICE **2016** 002 (2017)  
[arXiv:1612.00210 [hep-lat]]

Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of  $SU(3)$  gauge  
theory:  
Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Mizuki Shirogane, Naoki Wakabayashi, Kazuyuki Kanaya,

Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda,  
PoS LATTICE **2016** 058 (2017)  
[arXiv:1701.08570 [hep-lat]]

Equation of state in  $(2+1)$ -flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow:

WHOT-QCD Collaboration (Kazuyuki Kanaya,, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda),  
EPJ Web Conferences **175** 07023 (2018)  
[arXiv:1710.10015 [hep-lat]]

Energy–momentum tensor correlation function in  $N_f = 2 + 1$  full QCD at finite temperature:

WHOT-QCD Collaboration (Yusuke Taniguchi,, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda),  
EPJ Web Conferences **175** (2018) 07013  
[arXiv:1711.02262 [hep-lat]]

One-loop perturbative coupling of  $A$  and  $A_\star$  through the chiral overlap operator:

Hiroki Makino, Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki,  
EPJ Web of Conference **175** (2018) 11013  
[arXiv:1710.00536 [hep-lat]]

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

Kenji Hieda, Aya Kasai, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki,  
EPJ Web of Conferences **175** (2018) 11014  
[arXiv:1710.07001 [hep-lat]]

《その他の論文》

## 著書

特集・発展する場の理論「格子場の理論」:  
鈴木博,  
数理科学, 2017年11月号

最近の研究から「格子ゲージ理論におけるエネルギー・運動量テンソルの構成: Gradient flow の方法」:

鈴木博,

日本物理学会誌 73 巻第 3 号

## 講演

《 海外での講演 》

Asymmetric dark matter in fluffy standard model:

Ken-ichi Okumura,

The 13th International Workshop on the Dark Side of the Universe

2017 年 7 月 10 日–14 日、Lecture Building, KAIST Munji Campus, Daejeon, Korea

A dilaton and pion mass relation:

Ken-ichi Okumura,

Technical Advances in Lattice Field Theory

2017 年 12 月 4 日–8 日、CP3-Origins, Odense, Denmark

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

Aya Kasai,

parallel talk at The 35th International Symposium on Lattice Field theory (LATTICE2017)、2017 年 6 月 21 日、Palace of Congress, Granada, Spain

One-loop perturbative coupling of  $A$  and  $A_*$  through the chiral overlap operator:

Okuto Morikawa.

parallel talk at The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2017)、2017 年 6 月 23 日、Palace of Congress, Granada, Spain

《 国内での講演 》

グラディエント・フローによる 4 次元  $\mathcal{N} = 1$  超対称ヤン・ミルズ理論における超対称カレントの構成

鈴木博

益川塾セミナー、2017年7月18日、京都産業大学益川塾

A new domain-wall lattice formulation of chiral gauge theories

Hiroshi Suzuki

Yukawa Institute Workshop Strings and Fields 2017、2017年8月10日、京都大学基礎物理学研究所

グラディエント・フローによる4次元  $\mathcal{N} = 1$  超対称ヤン・ミルズ理論における超対称カレントの構成

鈴木博

筑波大学素粒子論研究室セミナー、2017年8月25日、筑波大学

Reconstruction of the tunneling amplitude from the perturbation series

Hiroshi Suzuki

RIMS-iTHEMS International Workshop on Resurgence Theory、2017年9月8日、理化学研究所（神戸）

One-loop perturbative coupling of  $A$  and  $A_*$  through the chiral overlap operator

鈴木博

日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 14 日、宇都宮大学

Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow

鈴木博

日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 14 日、宇都宮大学

SYM supercurrent in terms of the gradient flow

鈴木博

名古屋大学理学部 E 研セミナー、2017 年 11 月 21 日、名古屋大学

Energy momentum tensor on lattice

鈴木博

研究会「加速器を用いた重力研究 2017」、2017 年 11 月 30 日、KEK 東海キャンパス

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—場の量子論における対称性と普遍性—

鈴木博

2017年度（第11回）湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞・記念講演、2018年1月17日、京都大学基礎物理学研究所

Gravitational axial  $U(1)$  anomaly via the gradient flow

鈴木博

日本物理学会第73回年次大会、2018年3月23日、東京理科大学野田キャンパス

グラディエントフローを用いた  $\mathcal{N} = 1$  SYM 理論における超カレントの構成

笠井彩

第123回日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

グラディエントフローを用いた  $\mathcal{N} = 2$  SUSY における超カレントの構成

笠井彩

日本物理学会第73回年次大会、2018年3月23日、東京理科大学野田キャンパス

$\mathcal{N} = 2$  ランダウ・ギンツブルグ模型の数値シミュレーション

森川億人

日本物理学会2017年秋季大会、2017年9月14日、宇都宮大学

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

森川億人

瀬戸内サマーインスティテュート、2017年9月28日、山口県由宇青少年自然の家

Conformal field theory and the Landau–Ginzburg description

森川億人

セミナー講演、2017年11月17日、北海道大学

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

森川億人

セミナー講演、2017年11月17日、北海道大学

2次元超対称 Landau–Ginzburg 模型の数値的研究

森川億人

第123回物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

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

森川億人

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大学野田キャンパス

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、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

《 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)

## 他大学での研究と教育

### 学部 4 年生卒業研究

石川航輔：(指導教員、奥村健一)：場の量子論の研究

古賀一成：(指導教員、奥村健一)：場の量子論の研究

柴田和哉：(指導教員、奥村健一)：場の量子論の研究

中山聖：(指導教員、奥村健一)：場の量子論の研究

## 修士論文

森川億人：(指導教員、鈴木博)：2次元超対称 Landau–Ginzburg 模型における低エネルギー臨界現象の数値的研究

## 学外での学会活動

鈴木博：

日本物理学会第 71～72 期代議員

理化学研究所仁科加速器研究センター初田量子ハドロン研究室客員研究員

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

日本物理学会素粒子論領域領域代表

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

Progress of Theoretical and Experimental Physics 編集委員

## その他の活動と成果

鈴木博：

研究「格子ゲージ理論におけるグラディエントフローとエネルギー運動量テンソルの研究」に対して、「第 11 回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞」受賞

鈴木博：

論文 “Energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow,” Progress of Theoretical and Experimental Physics **2013** (2013), 083B03 に対して、「日本物理学会・第 23 回論文賞」受賞

# 理論核物理

## 研究室構成員

八尋 正信 教授      肥山 詠美子 教授

清水 良文 准教授

松本 琢磨 助教

《 博士研究員 》

石井 優大      豊川 将一

《 大学院 博士課程 》

菅野 淳平      宮原 昌久      開田 丈寛

《 大学院 修士課程 》

牛谷 征貴      堀ノ内 亮      小川 翔也      山田 悠真

《 学部 卒業研究生 》

青木 宏平      大野 晃      菊田 弘樹      久保 昂大

## 担当授業

物理数学演習 (松本琢磨)、物理学特別講義 1 (清水良文)、量子力学 I・同演習 (清水良文)、量子力学 III(清水良文)、物理学特別研究 I(八尋正信・清水良文・松本琢磨)、物理学特別研究 II(八尋正信・清水良文・松本琢磨)

## 研究・教育目標と成果

ヘビーペンタクオークの構成子クオーク模型による 5 体計算 (肥山詠美子、保坂淳 [阪大 RCNP]、岡真 [東工大、JAEA]、J-M.Richard[Ryon Univ.] )

2015 年に 5 つのクオーク ( $qqqC\bar{C}$ ) で構成されるヘビーペンタクオークが LHCb によって発見された。実験値によれば、4380 MeV に 205MeV の共鳴幅、4449.8MeV に 39 MeV という 2 つの状態が観測された。この 2 つのピークのスピン・パリティはいまだ確定はされていない。このような状況で、理論的には、様々な模型を活用して、このペンタクオークの構造を研究が行われてきた。このような状況で、肥山および共同研究者らは、構成子クオーク模型を活用した 5 体問題として、この問題にとりかかった。実際に活用する計算法としては、量子少数多体系計算法の一つのガウス展開法と

real scaling method をドッキングすることによって、実験値を再現できるのか、つまり、ペンタクオークの共鳴エネルギーと共鳴幅を再現できるのかという課題に取り組んだ。結果として、本研究では、実験値あたりのエネルギー領域には、共鳴は理論的に見つけることができず、代わりに 4700MeV あたりに非常に幅の狭い共鳴を見つけたことができた。この構造は非常にコンタクトなペンタ的な共鳴状態であることを指摘した。本研究で実験を再現できなかった理由の一つは、本研究では、メソン-バリオンの共鳴状態を記述できないという理由からではないかと推測できる。すなわち、LHC b で発見された 2 つのピークはメソン-バリオンの共鳴状態であることを間接的に指摘した。

#### $\pi, \sigma$ 中間子遮蔽質量の実数化学ポテンシャル依存性-純虚数化学ポテンシャル領域からの外挿- (八尋正信, 河野宏明 [佐賀大学], 石井優大 (PD))

ハドロンの質量は、量子色力学 (QCD) の真空構造と密接に関係している。ハドロンの質量の温度・密度依存性をみることで、真空構造の変質を捉えることができる。実際、重イオン衝突実験や中間子-原子核束縛系において  $\rho$  中間子や  $\eta'$  中間子の質量変化が観測されており、その結果はカイラル対称性や  $U(1)_A$  対称性の部分的な回復を示唆している。これらの現象は QCD の第一原理計算 (格子 QCD) から理解されるべきものであるが、高密度や非平衡過程では格子 QCD 計算が困難となるため、対称性の回復が起こっているか否かの確証は未だ得られていない。この問題に対して、我々は「有効模型による格子 QCD 計算結果の外挿」をおこなう。格子 QCD 計算が可能な領域で、格子 QCD 計算結果と整合する有効模型を構築し、この信頼性の高い有効模型を用いて格子 QCD 計算が困難な領域の現象を解明する。

今年度では、格子 QCD 計算が実行可能な純虚数化学ポテンシャル  $\mu_I$  領域から実化学ポテンシャル領域  $\mu_R$  へ外挿する新しい方法を考案した。さらに有効模型を用いて外挿法の有用性を確かめた。具体的には Entanglement Polyakov-loop extended Nambu-Jona-Lasinio 模型 (EPNJL 模型) を用いて  $\pi, \sigma$  中間子の遮蔽質量を計算し、外挿した結果と有限  $\mu_R$  で直接計算した結果とを比較した。従来の外挿では、温度  $T$  を固定して  $\mu_I$  依存性を多項式で fit されている。解析接続 ( $\mu_I \rightarrow -i\mu_R$ ) により外挿をおこなうと、カイラル相転移温度付近の低い温度では  $\mu_R/T \leq 0.4$  程度の狭い領域でしか直接計算と一致しないことが分かった。特に  $\sigma$  中間子では多項式の項数を増やすにつれて、直接計算との一致が悪くなることが明らかとなった。新しい外挿法では温度  $T$  に  $\mu_I$  依存性を考慮し、 $\mu_I$ - $T$  平面上のカイラル相転移線に沿うような軌跡上で外挿をおこなった。この手法を用いると、 $\sigma$  中間子では  $\mu_R/T \leq 0.8$  まで外挿が有効であり、 $\pi$  中間子にいたっては  $\mu_R/T \leq \pi/3$  まで直接計算と整合していた。今後は新しい外挿法を  $\rho$  中間子へと適用し、重イオン衝突実験の結果と比較することで、カイラル対称性の部分的な回

復を検証する予定である。

本研究は石井氏を中心に推進された。

### 虚数化学ポテンシャル領域における 2+1 フレーバー QCD の相構造 (八尋 正信, 河野 宏明 [佐賀大学], 管野 淳平 (D3))

クォークのダイナミクスは量子色力学 (QCD) によって記述される。QCD は強い非摂動性を持っているため、解析的に解くことは大変難しい。そこで、格子 QCD 計算によって数値的に解くことが試みられており、ゼロ密度・有限温度領域において成功を収めている。しかし、有限密度領域では符号問題が生じ、実質上計算が不可能になる。符号問題を避ける手法として、虚数化学ポテンシャル領域において格子 QCD 計算を実行し、解析接続によって実数化学ポテンシャル領域の情報を引き出すというものがある。この手法では、虚数化学ポテンシャル領域においては符号問題が存在しないという性質が利用されており、2 フレーバー系で広く用いられてきた。近年では 2+1 フレーバー系への適用も進んできており、種々の物理量の計算が行われている。しかしながら、虚数化学ポテンシャル領域における相構造を予言した研究はなかった。

そこで本研究では、虚数化学ポテンシャル領域における 2+1 フレーバー系の相構造を有効模型を用いて調べることを行った。2 フレーバー系においては、Roberge-Weiss (RW) 相転移線と呼ばれる一次相転移線が温度・虚数化学ポテンシャル平面のある点から温度方向にまっすぐ伸びることが知られている。本研究では、軽クォークとストレンジクォークの化学ポテンシャルがアンバランスな場合では RW 相転移線が高化学ポテンシャル側へ曲がることを明らかにした。このことは、2+1 フレーバー系では解析接続に利用できる領域が 2 フレーバー系よりも広くなることを示唆している。

本研究は管野氏を中心に推進され、その成果は Physical Review D 誌に掲載された。

### 虚数化学ポテンシャル領域における中間子遮蔽質量の計算 (八尋 正信, 河野 宏明 [佐賀大学], 管野 淳平 (D3))

中間子遮蔽質量は量子色力学 (QCD) の持つカイラル対称性・ $U(1)_A$  対称性の破れ・回復の良いプローブであり、さらには核力の到達距離を決める物理量でもある。そのため、遮蔽質量の温度・密度依存性を調べることは、重イオン衝突実験の解析、および天体物理学における様々な計算のインプットである状態方程式の決定にとって重要である。

これまで、格子 QCD 計算によって中間子遮蔽質量の計算がなされていたが、それらは Taylor 展開法を用いたものであった。本研究では虚数化学ポテンシャル領域からの解析接続によってパイオンおよび  $\rho$  中間子の遮蔽質量を求めた。これは世界初の試みである。

本研究は管野氏を中心に推進され、Physical Review D 誌に論文を投稿する予定である。

#### **QCD 不等式を用いた虚数アイソスピン領域におけるパイオン凝縮の解析 (八尋 正信, 河野 宏明 [佐賀大学], 管野 淳平 (D3))**

実数アイソスピン化学ポテンシャル領域においては符号問題が生じず、格子 QCD 計算を実行することができる。しかし、アイソスピン化学ポテンシャルがパイオン質量 (定義によってはその半分) に等しくなると荷電パイオン凝縮が発生し、格子 QCD 計算が破綻することが知られている。

本研究では虚数アイソスピン化学ポテンシャル領域に着目し、QCD 不等式を用いて荷電パイオン凝縮の有無を調べた。その結果、フェルミオン行列式が満たす  $\gamma^5$ -共役性の違いによって、虚数アイソスピン化学ポテンシャル領域では荷電パイオン凝縮が発生しないことを示した。

本研究は管野氏を中心に推進され、Physical Review D 誌に論文を投稿する予定である。

#### **クォーク・ハドロン転移の有効モデルによる解析 (八尋正信、河野宏明 [佐賀大学]、石井優大 (PD)、宮原昌久 (D2))**

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

本研究では、ハドロン相を自由ガス模型、クォーク相をグルーオン背景場中におけるクォークかの伝搬を記述する独立クォーク模型によって表した。その二つの模型間を系の状態因子によって組み合わせ、ハイブリッド模型を構築した。得られたハイブリッド模型によって種々の熱力学量を解析した。ハイブリッド模型によって格子 QCD 計算の結果を解析し、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すことができた。これにより、系がハドロン相からクォーク相へ遷移する様相を定義することができ、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。最終的に、これまで対称性の回復・非回復で解析されてきた QCD 相図をより直観的な自由度の遷移で評価することができた。

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による格子計算 (八尋 正信、河野 宏明 [佐賀大学]、管野 淳平 (D3)、開田 丈寛 (D1))**

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 の格子計算を行った。

今年度は、有限化学ポテンシャル領域での計算の準備段階として、化学ポテンシャルが 0 の場合の格子計算プログラムを構築し、構築されたプログラムを使用して数値計算を行った。また、格子 QCD の有効模型として effective Polyakov-line 模型を  $Z_3$  対称化して数値計算を行い、模型レベルでの符号問題の振る舞いを調べた。さらにこの模型で、従来使われてきた符号問題の対処法を改良し、符号問題の改善度合いを調べた。

その結果、化学ポテンシャルが 0 の場合の格子計算プログラムは期待通りに動作することを確認した。また、有効模型での計算では、改良した対処法によるパラメータ依存性や体積依存性を確認した。

本研究は、開田氏を中心に推進されている。

### **SU(2) 純ゲージ理論におけるスケール設定と熱力学量の測定 (伊藤 悦子 [高知大学]、八尋 正信、河野 宏明 [佐賀大学]、開田 丈寛 (D1))**

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、高知大学の伊藤氏を中心に推進されている。

### **グラウバー模型に基づく入射核励起効果を考慮した微視的光学ポテンシャルの構築 (堀ノ内亮 (M2)、豊川将一 (PD)、小川翔也 (M1)、松本琢磨、八尋正信)**

不安定核を入射核とした原子核反応を精密に記述するためには、微視的光学ポテンシャルが必要となる。この微視的光学ポテンシャルを導出する方法の一つに、グラウバー模型に基づいた方法がある。グラウバー模型を利用すると微視的に構築した核子-標的核間の光学ポテンシャルから入射核の励起効果を近似的に考慮した微視的光学ポ

テンシャルの導出が可能となる。

本研究では、このグラウバー模型に基づいた微視的光学ポテンシャルの正当性をグラウバー模型に用いられているアイコンール近似の有効性と共に確かめた。重陽子分解反応を対象とし、分解効果を精密に記述できる連続状態離散化チャネル結合法の結果と比較することにより、アイコンールポテンシャルの正当性を議論した。さらに、アイコンールポテンシャルの物理的な意味と適用範囲について検証を行った。これらの内容は修士論文にまとめた。

### 芯核励起を考慮した $^{11}\text{Be}$ の励起エネルギースペクトルにおける各チャネルへの分離 (小川翔也 (M1), 豊川将一 (PD), 松本琢磨)

中性子ハロー核は、芯核 (コア) に1つまたは2つの中性子が弱く束縛した原子核である。最近では  $^{11}\text{Be}$  や  $^{31}\text{Ne}$  などのコアが変形した変形ハロー核が注目されており、理論・実験の両面で盛んに研究されている。先行研究において、変形ハロー核ではコアの変形 (コア励起) による観測量への寄与が指摘されてきた。その効果を取り入れた計算方法として Particle-Rotor Model (PRM) が挙げられる。

本研究では  $^{11}\text{Be}$  を  $^{10}\text{Be}$  と  $n$  の2体系で記述し、コアの  $^{10}\text{Be}$  の励起に  $0^+$  と  $2^+$  を取り入れた PRM を考えた。さらに、連続状態や共鳴状態を Complex Scaling Method (CSM) で記述し、ハロー構造を反映する E1 遷移を解析した。その解析において各チャネルへの励起エネルギースペクトルに分離できるか議論を行い、CSM のみを用いた場合は厳密解である Numerov 法の計算との差が見られた。一方で、CSM と Lippman-Schwinger 方程式を組み合わせた方法 (CSLS) を用いて同様の解析を行った結果、各チャネルへの分離が可能であることを示した。

### $^{12}\text{C} + \text{核子散乱}$ を通した $^{12}\text{C}$ の共鳴状態の研究 (山田悠真 (M1), 豊川将一 (PD), 松本琢磨)

炭素同位体ではクラスター構造が発達し、 $\alpha$  粒子のガスの状態とみなされる様々な励起共鳴状態が現れることが示唆されている。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、 $^{12}\text{C}$  の共鳴・非共鳴状態の効果を調べるために  $^{12}\text{C} + \text{核子散乱}$  の解析を

行った。この解析では、 $^{12}\text{C}$ を $3\alpha$ クラスター構造とみなした3体計算で束縛状態とともに共鳴、非共鳴状態を求めこれらの間のチャンネル結合計算を行った。このとき、 $^{12}\text{C}+$ 核子間の相互作用は有効相互作用としてJLMを用いた畳み込み模型で求めた。核子- $^{12}\text{C}$ 散乱問題に関しては、共鳴・非共鳴状態を含んだ計算を取り扱える連続状態離散化チャンネル結合法(CDCC)を用いて弾性・非弾性散乱断面積の計算を行った。計算した断面積と実験結果の比較を行い、 $^{12}\text{C}$ の共鳴・非共鳴状態や状態間の遷移の効果について議論した。

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

カイラル有効理論に基づいた2核子力や3核子力の系統的決定によって、QCDに立脚した原子核の記述や、3核子力効果の理解が飛躍的に進んできた。本研究では、カイラル有効理論の核力を用いたBrückner-Hartree-Fock法によって新たにg行列有効相互作用を構築し、微視的手法である畳み込み模型に適用することで核反応解析を行った。

本研究で構築したカイラル有効理論の核力に基づくg行列有効相互作用により、 $^3,^4\text{He}$ 原子核弾性散乱をパラメタフリーに記述した。また弾性散乱における3核子力効果は散乱角後方で顕著に現れ、断面積を減らすことで実験データの過大評価が改善された。本研究の新しいg行列は局所解析関数で表現されており、そのパラメタを公表することで今後様々な解析に用いられることが期待される。

本研究は豊川氏を中心に推進され、その成果を纏めた論文はProgress of Theoretical and Experimental Physics誌に掲載された。

**$^{11}\text{Li}(p, p')$  反応の微視的解析による $^{11}\text{Li}$ 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])

$^{11}\text{Li}$ 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、 $^{11}\text{Li}$ の共鳴状態を探索する。

解析では $^{11}\text{Li}$ 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ン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。現在、この結果をまとめPhysical Review Letterに投稿中である。

本研究は松本氏を中心に推進された。

## 発表論文

### 《原著論文》

Properties of 2+1-flavor QCD in the imaginary chemical potential region:  
A model approach:

J. Sugano, H. Kouno, and M. Yahiro,

Physical Review D **96** (2017) pp. 014028-1–10.

Crossover-model approach to QCD phase diagram, equation of state  
and susceptibilities in the 2+1 and 2+1+1 flavor systems:

Akihisa Miyahara, Masahiro Ishii, Hiroaki Kouno, Masanobu Yahiro,

International Journal of Modern Physics A **Vol. 32**, No. 36 (2017) 1750205–24

Sign problem in a  $Z_3$ -symmetric effective Polyakov-line mode:

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

Physical Review D **96**, (2017) pp. 074013-1–17.

Effects of chiral three-nucleon forces on  $^4\text{He}$ -nucleus scattering  
in a wide range of incident energies:

Masakazu Toyokawa, Masanobu Yahiro, Takuma Matsumoto, and Michio Kohno,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2018, 023D03.

### 《Proceedings》

## 講演

### 《海外での講演》

以下、ポスター発表.

### 《国内での講演》

QCD 不等式による虚数アイソスピン化学ポテンシャル領域の解析:  
管野淳平, 河野宏明, 八尋正信  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 鹿児島大学

現象論模型によるクォーク・ハドロン転移線の決定:  
宮原昌久, 鳥越悠平, 河野宏明, 八尋正信  
原子核三者若手夏の学校 2017, 2017 年 8 月 22 日, 国際オリンピック記念センター

クォーク・ハドロンハイブリッド模型による格子 QCD 計算の解析 IV:  
宮原昌久, 鳥越悠平, 河野宏明, 八尋正信  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 鹿児島大学

Effective Polyakov-line model における符号問題:  
開田 丈寛, 管野 淳平, 河野 宏明, 高橋 純一, 八尋 正信  
三者若手夏の学校, 2017 年 8 月 22 日, 国際オリンピック記念センター

Effective Polyakov-line model における符号問題:  
開田 丈寛, 管野 淳平, 河野 宏明, 高橋 純一, 八尋 正信  
日本物理学会秋季大会, 2017 年 9 月 12 日, 宇都宮大学

SU(2) 純ゲージ理論におけるスケール設定と物理量の測定:  
開田 丈寛, 伊藤 悦子  
日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 鹿児島大学

SU(2) 純ゲージ理論におけるスケール設定と熱力学量の測定:  
開田 丈寛, 伊藤 悦子, 河野 宏明, 八尋 正信  
日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 24 日, 東京理科大学

グラウバー模型に基づいた重陽子散乱における微視的光学ポテンシャルの導出: 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨, 八尋正信  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 鹿児島大学

Glauber 模型に基づく核-核散乱光学ポテンシャルの性質: 小川翔也, 堀ノ内亮, 豊川将一, 松本琢磨  
日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学

Complex-Scaling 法による芯核励起を考慮した励起エネルギースペクトルの解析: 小川翔也, 豊川将一, 松本琢磨第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 鹿児島大学

陽子非弾性散乱の微視的解析による  $^{12}\text{C}$  共鳴状態の解明に向けて: 山田悠真, 松本琢磨, 豊川将一第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 鹿児島大学

$^{12}\text{C}$  散乱における共鳴・非共鳴状態を含んだ 4 体 CDCC 解析: 山田悠真, 松本琢磨, 豊川将一第 73 回物理学会年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学

Microscopic reaction analysis based on chiral effective field theory: Masakazu Toyokawa, Masanobu Yahiro, Takuma Matsumoto, and Michio Kohno, One-day workshop at RIKEN "Current status of microscopic description of nucleon-nucleus scattering". 2017 年 11 月 18 日, 理化学研究所

$^{11}\text{Li}(p,p')$  の微視的反応理論解析による  $^{11}\text{Li}$  共鳴状態の新奇性の研究:  
松本琢磨, 田中 純貴, 緒方 一介  
日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 12 日, 宇都宮大学

Borromean Feshbach resonance in  $^{11}\text{Li}$  studied via  $^{11}\text{Li}(p,p')$ :  
T. Matsumoto, J. Tanaka, and K. Ogata  
International workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017, 2017 年 12 月 20 日, 理化学研究所

以下、ポスター発表.

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文科省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

有効模型と格子 QCD 計算に基づいた QCD 相図の高密度領域の解明  
研究者代表: 管野淳平

《 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)

管野淳平、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

#### 学部 4 年生卒業研究

[前期] 青木 宏平、大野 晃、菊田 弘樹、久保 昂大 (担当 : )

[後期] 青木 宏平、大野 晃、菊田 弘樹、久保 昂大 (担当 : )

#### 修士論文

堀ノ内亮:(指導教員 松本琢磨): グラウバー模型に基づく入射核励起効果を考慮した  
微視的光学ポテンシャルの構築

#### 博士論文

管野淳平: (指導教員、八尋正信): Approach to QCD phase diagram based  
on the imaginary chemical potential method (虚数化学ポテンシャル法に基づく QCD  
相図の研究)

#### その他の活動と成果

# 宇宙物理理論

## 研究室構成員

橋本 正章 教授

町田真美 助教

《テクニカルスタッフ》

E. P. B. A. Thushari 松尾 康秀

《大学院 博士課程》

福田 遼平

《大学院 修士課程》

有村 幸大 大村 匠 酒見 はる香 中尾 美穂

長野 源生 山田龍王

《学部 卒業研究生》

土肥 明 多良 淳一

《訪問研究者》

中村 理央

## 担当授業

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

## 研究・教育目標と成果

**Observational constraints of cosmological models with variable equation of state**  
(橋本正章, E. P. B. A. Thushari)

We have constrained a cosmological model which is physically reasonable, mathematically tractable, and extend the study of the dark matter models to the case where the equation of state (EOS) for matter and dark energy (DE) vary with time (J. Ponce de Leon 2012). We focus on how the evolving EOS for matter and DE can modify the standard cold dark

matter paradigm constrained the parameters using type Ia Supernovae (SNIa) observations in the redshift range  $0.01 < z < 2$ . This model is containing six inherent parameters  $K$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\gamma$ , and  $n$ . Parameterization accommodate an alternative cosmological models. We could identify dark matter and DE density evolutions approximate to the cold dark matter model at the early universe or low redshift range and significantly differ from the high redshift range. We investigated for the certain values of parameters like  $\alpha = 1$  and  $n = 1/3$ , matter mixture recover their individual identities and separates into radiation and dust. When  $z < 1$  DE becomes dominant than matter and at that stage we could observe some transition from dark matter to DE dominant eras. We constrained the model with minimum reduced  $\chi^2 = 0.99$  for  $-0.1 \leq \omega \leq -1.5$  and  $\gamma = -1.5$  for  $n = 1$ . For  $n = 0$ ,  $\omega = \gamma$ ,  $n = 0$  approximates to the  $\Lambda$ CDM model. To constrain these parameters we fixed  $K = 10$ ,  $\beta = 20$ ,  $\alpha = 100$  with considerable reasons. Since these alternative models with different parametrization are really affective in the high redshift range we will focus on CMB observations to constrain this model for future work.

#### HCNO サイクルを考慮した質量降着中性子星の光度曲線 (橋本正章, 松尾康秀, Helei Liu)

恒星と中性子星からなる X 線連星ではしばしば X 線アウトバーストと呼ばれる増光現象が観測される。これは中性子星への質量降着率が大きくなることで明るくなると考えられている。この期間はアウトバースト期と呼ばれ、その間の暗い期間は静穏期と呼ばれる。いくつかの X 線連星系でアウトバーストが終わって静穏期になるまでの間の中性子星の表面温度の時間進化が観測されている。その中で MAXI J0556-332 の表面温度の時間進化が興味深い。これは他の天体と比べて非常に表面温度が高く、それまで考慮されていた加熱(クラスト加熱)では観測を説明できなかった。そこで Deibel らは中性子星のアウトークラストに人工的な加熱 (shallow heating) を入れて観測を説明しているが、この起源については分かっていない。

そこで我々はこの観測を説明するために中性子星表面で起こる HCNO サイクルと呼ばれる安定な H 燃焼で説明できる可能性はないか調べた。まずは簡単のため、シンプルな HCNO サイクルの加熱率の表式を用いて計算した。その結果、shallow heating を加えなくても HCNO サイクルを考慮することで観測を説明できる可能性があることを確かめた。ただしこれは HCNO サイクルによって H が減っていくことを考慮してないので、やや表面温度を過大評価している可能性がある。したがって今後は元素合成計算を取り入れてより現実的な計算を行う必要がある。

#### Ia 型超新星爆発とガンマ線バーストの観測によるダークエネルギーの状態方程式の制限 (橋本正章, E.P.B.A. Thushari, 中村理央, 一政遼太郎)

ダークエネルギーは我々の宇宙の進化に対する重要な役割を担っているため、ダークエネルギーの状態方程式の時間変化を明らかにすることは宇宙論における重要な課題の一つである。近年の観測によると、近傍の宇宙ではダークエネルギーが宇宙の主な構成要素となっており、これによって宇宙が加速膨張していることが明らかとなっている。特に、ダークエネルギーの振る舞いは状態方程式の値  $w = -1$  を境に異なる振る舞いをする。赤方偏移の小さい近傍の宇宙におけるダークエネルギーの性質を明らかにするため、Ia 型超新星爆発の観測がしばしば用いられる。これに加えて、より遠方の観測対象であるガンマ線バーストのデータも利用できるようになってきている。我々は時間発展する状態方程式に対して、これら二つの観測結果から各赤方偏移における状態方程式の値に対して制限を行った。その結果、状態方程式  $w$  の値は  $w < -1 \rightarrow w > -1$  へと変化するモデルが好ましいことが分かった。しかしながら、ダークエネルギー が宇宙定数として振る舞う場合との有意差は認められなかった。更に詳細な議論をするために、宇宙背景放射の観測結果もあわせて議論する必要がある。

#### 磁気粘性駆動型超新星爆発と r-process (橋本正章, 町田真美, 松尾康秀)

r-process とは、金やウランといった鉄よりも重い中性子過剰核を合成する過程である。中性子を連続的に捕獲し、ベータ崩壊を繰り返すことによって安定核へと変化していく。r-process の理論は半世紀以上前に提言されたものであるが、これが宇宙のどの天体で起きて、どのようにしてわれわれの身の回りに存在するようになったかは未だ解明されていない部分が多い。

現在最も有力視されているのは中性子星の合体である。近年行われたシミュレーションによって、中性子星合体で r-process が起きることが確かめられただけでなく、2017年8月に観測された重力波放出天体からの赤外線観測によって、観測的にも中性子星合体が r-process 起源天体であることがわかった。しかし、銀河初期の星の r-process 元素組成比を満足に説明することができないという欠点があるため、中性子星合体以外に銀河初期に r-process 元素を放出する天体が存在する可能性がある。そこで、本研究では collapsar と呼ばれる超新星爆発モデルに着目し、r-process が起きるかをシミュレーションによって確かめることを目的とし、FLASH と呼ばれる天体シミュレーションコードを導入した。まず自己重力と核物質の状態方程式を取り入れ、通常の超新星爆発で起きる重力崩壊を再現することに成功した。続いて、中心に点源の質量があると仮定したシミュレーションを行った。これはブラックホールを模したもので、近似的に一般相対論的重力を取り入れている。このモデルに回転を加えることによって、collapsar モデルにおける降着円盤を作るところまで再現することができた。さらに、降着円盤からのアウトフローをシミュレーションするために、磁気粘性を近似した粘性項を取り入れること、ニュートリノの効果を取り入れることが必要であるが、そこまでには至らなかった。

#### 近赤外線を用いた分子雲ループの観測 (橋本正章, 町田真美, 有村幸大)

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

#### 宇宙ジェットの電子温度構造を明らかにする宇宙ジェット伝搬磁気流体シミュレーション (橋本正章, 町田真美, 大村匠)

宇宙ジェットは、降着円盤によって解放されたコンパクト天体の重力エネルギーを駆動源として、超音速で伝搬する細く絞られたプラズマ流である。ジェットは中心天体近傍にある高エントロピーガスを遠方へと伝える役割を持っている。さらに、ジェットが遠方の星間ガスと相互作用することで宇宙環境に大きな影響を与えることが知られている。また、強い衝撃波を持つジェットは、高エネルギー粒子の生成場所としても注目されている。

ジェットは高温低密度なプラズマである。したがって、電子と陽子のクーロンエネルギーによる緩和時間が流体の運動時間よりも長くなるため、電子と陽子の温度が異なる2温度状態となることが期待される。輻射は電子が担うため、観測量であるスペクトルや表面輝度の計算には、ジェットの電子温度構造を明らかにする必要がある。しかし、ジェットの2温度構造に着目した研究はこれまで行われていない。そこで、電子と陽子のエネルギー交換を取り入れた磁気流体計算コードを開発し、ジェット伝搬シミュレーションを行った。

計算時間の短くて済む2次元軸対称計算でのジェット伝搬計算を行った。その結果、初期に電子と陽子が等温状態から計算を始めにも関わらず、衝撃波によって陽子が選択的に加熱され、

2 温度構造を持つことが解った。特に、ジェットの最も活動的な場所であるホットスポットでは、電子は陽子と比べて1桁温度が低くなる結果が得られた。また、制動放射によるジェットの表面輝度計算を行い、はくちょう座 X-1 の観測結果と同様にジェットのバウショックで明るく輝くことを示すことができた。今後は、3次元での計算やジェットの主となる輻射機構であるシンクロトロン放射・逆コンプトン散乱を取り入れたシミュレーションを行う必要がある。

### SS433 ジェット先端領域の磁場構造解析と星間物質との相互作用 (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る。ジェットの駆動や構造の形成には、磁場が関係していることがこれまでの研究から示唆されている。そこで、観測的研究により直接ジェットの磁場構造を解明することが重要となる。また、ジェットはその先端領域で周辺の星間物質と相互作用し、分子雲の形成や宇宙線粒子加速を起こすと考えられている。ジェットが周辺に及ぼす影響について理解するためには、周辺の星間物質との相互作用の様子を明らかにする必要がある。そこで我々は、天の川銀河系内に存在し、比較的構造がよく分解されるジェット天体 SS433 に着目して研究を行った。特に、SS433 ジェットの先端が到達していると考えられている星雲 W50 の東端領域に注目し、磁場構造解析と周辺の星間物質の解析を試みた。

W50 の解析には、Australia Telescope Compact Array により観測された 1.4 – 3.0 GHz の電波連続波のデータを用いた。また周辺の星間物質の解析には、“なんてん”により観測された一酸化炭素のデータ、“アレシボ”により観測された HI のデータ、Isaac Newton Telescope により観測された H $\alpha$  のデータを用いた。

W50 の磁場構造解析を行った結果、W50 東端に存在するフィラメント状の構造に平行に沿った磁場を発見した。また、このフィラメント状構造の磁場が、南北で異なる性質を示すことを初めて明らかにした。また、同領域に X 線で観測されているリング状の構造が、不連続であることが確認された。加えて W50 東端表面に巻きつくらせん状構造の磁場が、同様にらせん状をしていることを解明した。今後はより広帯域・高空間分解能の観測データを用いてジェット先端磁場の3次元構造を明らかにすることを目指す。

また、W50 周辺の星間物質の解析を行った結果、W50 と衝突している可能性の高い分子雲・HI 雲を発見した。また、磁場構造解析の結果と H $\alpha$  の観測結果に相関があることを明らかにした。今後はより高空間分解能を持つ望遠鏡でこれらの星間物質を追観測することを目指す。

### 重力崩壊型超新星爆発と r-process (橋本正章, 長野源生)

r-過程は鉄より重い元素の約半分を作り、金やウランも生成する。この反応が起こると考えられている天体はいくつか挙げられているが、それぞれに問題点があり、r 元素の組成比がどのように重なり合って今日の太陽系組成比になったのかを全て説明するには至っていない。従って、r 元素の起源として新たなシナリオを考える意義があると言える。そこで、そのシナリオとしてコラプサーモデルを考え、r-過程を調べた。本研究では主系列段階で様々な質量のモデルを用いて、回転軸対称を仮定した流体シミュレーションを行った。初期の回転の強さと降着円盤の粘性をパラメータとして与えた。その結果、どのモデルも r 元素を生成できることがわかった。従って、コラプサーは軽い r 元素を銀河に供給できる可能性がある。

### 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。

我々の先行研究で構築された近似核反応ネットワーク (Approximation Network; APRX) 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) と比較して、バースト後の水素の量が  $\sim 1/10^2$  と著しい乖離が見られた。そこで、考慮する核種を追加し、核反応の経路を見直すことにより、バースト後の水素量を FNRN の 1/2 程度にまで改善した。それに伴い、燃焼後のバーストも従来の APRX と比べ FNRN に近い挙動を示した。今後は、APRX の FNRN に対する再現性をさらに高めるとともに、改良した APRX を multi zone モデルの恒星進化計算コードに実装し、中性子星の内部構造がバーストに与える影響を解析する。

#### 非一様ビッグバン元素合成における Be, B 生成 (橋本正章, 中村理央)

ビッグバン元素合成 (BBN) は、ビッグバンから数分後に起こった軽元素の生成であり、温度が  $T \sim 0.1$  MeV で水素 (および同位体の重水素),  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  が生成される。BBN の標準的なモデルでは、密度分布が一様と仮定している。一方で、非一様な物質分布を仮定した非一様 BBN の研究も行われており、高密度領域の物質密度によっては、Ni, Eu などの重元素も生成される (Matsuura et al. 2005; R.N. et al. 2013)。

本研究では、非一様 BBN モデルにおいて、旧対称な高密度領域を仮定した 2 ゾーンモデルを採用し、 $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  が生成されるかどうかを調査した。高密度領域と低密度領域の各領域で生成された  $^4\text{He}$  と重水素の平均値が、それぞれの観測結果と矛盾しないパラメータの範囲内で、 $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  がどの程度生成されるか調べた。その結果、 $^9\text{Be}$  についてはほとんど生成されなかったが、B は García López (1998) らが報告している値の 1% 程度生成されることがわかった。しかし、その場合  $^7\text{Li}$  の値が、観測値の 10 倍以上多く生成されていたことから、非一様 BBN で Be や B を生成するのは難しいと結論づけた。

#### 銀河ガス円盤の大局的数値実験 (町田真美)

銀河は平均で数  $\mu\text{G}$  の磁場を持つ。磁場の起源とその活動性を調べるために、銀河ガス円盤の 3 次元磁気流体数値実験を行った。その結果、初期に弱い磁場は銀河の差動回転によって増幅される事、磁気圧とガス圧が同程度になると、ハロー領域に噴出することで、銀河ガス円盤内部の磁場強度が準定常状態に保たれることがわかった。また、磁場の大局的な成分は、渦状構造を示し、観測される渦状銀河の腕構造と同様の分布を示すことがわかった。数値計算結果から、密度分布や磁場ベクトル分布などの物理量を求めることができる。一方、観測は輻射を測定しているため、観測結果と数値実験の結果を比較するためには、物理量から放射を求める必要がある。そこで、我々は、物理量から、数 GHz の帯域で観測されるシンクロトロン放射強度などを導出し、観測との直接比較を行った。その結果、大局磁場の形状は、観測の見込み角に大きく依存すること、弱い渦状構造を持つ銀河と同様の分布を持つ事を示した。

#### 天の川銀河中心の時期的活動性に関する MHD 数値実験 (町田真美)

天の川銀河中心領域 300pc の範囲は、分子雲が卓越し、Central Molecular Zone (CMZ) と呼ばれている。分子雲の平均の速度分散は 10km/s 以下、温度は 10K 程度が平均であるが、CMZ の速度分散は 100km/s 以上、分子雲ガスの温度 30-100K と非常に高温である事が知られている。この領域の形成は、一般には銀河中心のバーポテンシャルによると考えられているが、中心近傍にバーの存在の証拠は確認されていない。我々は、銀河ガス円盤と同様に、CMZ 領域でも磁気活動性によって乱流が駆動されると考え、中心近傍領域の MHD 数値実験を行い、その性質を調べた。その結果、磁気回転不安定性によって増幅された磁場は、パーカー不安定性によって浮上し、動径方向外側から内側に向かう質量降着を誘起することが示された。

#### 磁気回転不安定性の角運動量輸 (町田真美)

ブラックホール天体の活動性の起源は、中心天体であるコンパクト星自身ではなく、その周りを回転するガス円盤であることが分かっている。この時、重要となるものが、磁気回転不安定性である。この不安定性は、差動回転するガス円盤中に少量でも磁場が存在すると、指数関数

的に不安定性が増大し、磁気乱流を誘起する。これを確認するために、多数の MHD 数値実験が行われているが乱流を取り扱うため、結果が解像度に依存する可能性が指摘されていた。そこで、我々は、学際連携機構の有する Oakforest-PACS を用いて、磁気回転不安定性の成長に関する解像度依存性を調べた。その結果、分解能が低い場合には、飽和値が大きな値を示す傾向があることがわかった。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

- Quiescent Light Curve of Accreting Neutron Star MAXI J0556-332: H. Liu, Y. Matsuo, M. Hashimoto, T. Noda, and M. Y. Fujimoto, Journal of Physical Society of Japan, 2017, 86, 123901.
- Magnetic field analysis of the bow and terminal shock of the SS 433 jet : H. Sakemi, M. Machida, T. Akahori, H. Nakanishi, H. Akamatsu, K. Kurahara, J.S. Farnes, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2018, Vol. 70, Issue 2, id. 27
- Cosmic magnetism in centimeter- and meter-wavelength radio astronomy: T. Akahori, M. Machida et al. (16 名中 10 番目)、PASJ, 70, issue1, id.R2 (2018)
- Magnetic activity in the Galactic Centre region - fast downflows along rising magnetic loops: K. Kakiuchi, T. K. Suzuki, Y. Fukui, K. Torii, R. Enokiya, M. Machida, R. Matsumoto, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 476, Issue 4, p.5629-5638

## 講演

### 《 国内での講演 》

- 二温度プラズマのジェット伝搬シミュレーション：  
大村匠、町田真美、中村賢仁、工藤祐己  
星間ガス進化と磁気流体現象、九州大学西新プラザ、2017年5月25-26日
- ATCAによるW50/SS433の偏波解析：  
酒見はる香、町田真美、赤堀卓也、中西裕之、赤松弘規、藏原昂平、Jamie Farnes  
星間ガス進化と磁気流体現象、九州大学西新プラザ、2017年5月
- 3次元ジェット伝搬シミュレーションの観測的可視化  
町田真美、朝比奈雄太、大村匠  
星間ガス進化と磁気流体現象、九州大学西新プラザ、2017年5月
- 二温度磁気流体計算によるジェットの構造進化解析：  
大村匠、町田真美、工藤祐己、朝比奈雄太、松元亮治、  
磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会、海洋研究開発機構東京事務所、2017年8月28日-30日

- SS433 ジェット先端領域の磁場構造解析：  
酒見はる香, 町田真美, 赤堀卓也, 中西裕之, 赤松弘規, 藏原昂平, Jamie Farnes  
磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会, 海洋研究開発機構東京事務所, 2017年8月
- 銀河ガス円盤シミュレーションとその観測的可視化  
町田真美, 赤堀卓也, 中村賢仁, 工藤祐己, 中西裕之, 松元亮治  
磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会, 海洋研究開発機構東京事務所, 2017年8月28日-30日
- Two-temperature magnetohydrodynamic Simulation of Structure and Dynamics for Astrophysical Jets :  
大村匠, 町田真美, 中村賢仁, 工藤祐己, 朝比奈雄太, 松元亮治  
日本流体力学会 2017年, 東京理科大学, 2017年8月30日-9月1日
- ブラックホール降着円盤からの二温度ジェット伝搬計算：大村匠, 町田真美, 中村賢仁, 工藤祐己, 朝比奈雄太, 松元亮治  
日本天文学会 2018年秋季年会, 北海道大学, 2017年9月11日—13日
- W50 東端の Faraday Tomography による磁場構造解析：  
酒見はる香, 町田真美, 赤堀卓也, 中西裕之, 赤松弘規, 藏原昂平, Jamie Farnes  
日本天文学会 2017年秋季年会, 北海道大学, 2017年9月
- パー効果を考慮した銀河ガス円盤の観測的可視化  
町田真美, 赤堀卓也, 中西裕之, 中村賢仁  
日本天文学会 2017年秋季年会, 北海道大学, 2017年9月12日
- 二温度磁気流体計算による宇宙ジェットの構造解析：  
大村匠, 町田真美, 中村賢仁, 工藤祐己, 朝比奈雄太, 松元亮治,  
宇宙物理合同セミナー九重共同研修所, 2017年9月18日-20日
- 二温度磁気流体計算による BHXB ジェット解析  
大村匠, 町田真美, 中村賢仁, 工藤祐己, 朝比奈雄太, 松元亮治  
ブラックホール降着流ミニワークショップ, 千葉大学, 2018年3月5日
- SS433 ジェットターミナルショックのファラデートモグラフィ：  
酒見はる香, 町田真美, 赤堀卓也, 中西裕之, 赤松弘規, 藏原昂平, Jamie Farnes  
ブラックホール降着流ミニワークショップ, 千葉大学, 2018年3月5日
- 磁気回転不安定性の飽和値に対する方位角方向解像度依存性  
町田真美, 川島朋尚, 工藤祐己  
ブラックホール降着流ミニワークショップ, 千葉大学, 2018年3月5日
- X線連星電子-イオン二温度ジェットに関する3次元磁気流体数値実験：ジェットの構造とダイナミクス：  
大村匠, 町田真美, 中村賢仁, 工藤祐己, 朝比奈雄太, 松元亮治  
日本天文学会 2018年春季年会, 千葉大学, 2018年3月14日-17日
- W50 と周辺の星間ガスの電波観測から探る相互作用の可能性：  
酒見はる香, 町田真美, 山本宏昭, 立原研悟, 中西裕之, 藏原昂平, 赤堀卓也, 赤松弘規, Jamie Farnes  
日本天文学会 2018年春季年会, 千葉大学, 2018年3月

- 磁気回転不安定性の飽和値に対する方位角方向解像度依存性  
町田真美、川島朋尚、工藤祐己  
日本天文学会 2018 年春季年会, 千葉大学, 2018 年 3 月 17 日

## 外部資金

### 《 文部省科学研究費補助金 》

- 基盤研究 (C)  
「X 線バーストシミュレーションによる中性子星内部構造の解明」(H27-H29)  
研究代表者：橋本正章
- 基盤研究 (B)  
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 》

- 二温度磁気流体計算によるジェット構造の解析：大村匠、東京大学情報基盤センター若手・女性利用者推採択課題 平成 29 年度（インターン）
- 二温度磁気流体計算によるジェット構造の解析：大村匠、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 萌芽型共同研究課題採択
- High Resolution and Broadband Polarimetry of the W50 East : Haruka Sakemi  
The National Radio Astronomy Observatory (NRAO) 運営 the Karl G. Jansky Very Large Array (VLA) 2018 年度観測提案採択
- 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  
東京大学情報基盤センター若手・女性利用者推採択課題 平成 29 年度（前期・後期）

## 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)

### 学振特別研究員 DC1

「時記念性駆動型長背申請爆発と r-process～重元素の起源の解明に向けて～」  
研究代表者:福田遼平

## 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。
- 福田遼平：久留米工業高等専門学校にて「応用物理 II」の講義を行った。

#### 学部4年生卒業研究

- 多良 淳一 (指導教員：橋本正章、町田真美)：SS433のX線スペクトル解析  
Kubota et al. の再現と超臨界降着流の解析
- 土肥 明 (指導教員：橋本正章)：クオークコアを持つ中性子星の構造による  
Bag 定数の制限

#### 修士論文

- 有村 幸大 (指導教員：橋本正章, 町田真美)：近赤外線を用いた分子雲ループの観測
- 大村 匠 (指導教員：橋本正章、町田真美)：電子-イオン二温度磁気流体計算による宇宙ジェットのダイナミクス解析
- 酒見 はる香 (指導教員：橋本正章, 町田真美)：SS433 ジェット先端領域の磁場構造解析と星間物質との相互作用
- 長野 源生 (指導教員：橋本正章)：重力型超新星爆発と r-過程

#### 学外での学会活動

- 町田真美：日本天文学会 年会実行委員会

#### その他の活動と成果

- 町田真美：宇宙を学べる大学 in 九州 (大分) にて、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

## 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 》

釘崎充規      土屋創聖

《 訪問研究者 》

佐合紀親 (基幹教育院)      中里健一郎 (基幹教育院)

## 担当授業

素粒子理論 (原田恒司)、基幹物理学 II (大河内豊)、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 (原田恒司、大河内豊、小島健太郎)、基幹教育セミナー (原田恒司、大河内豊、小島健太郎、田尾周一郎)、レトリック基礎 (原田恒司)、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)、プログラム・ゼミ I, III (田尾周一郎)、プログラム・ゼミ VI, VIII (田尾周一郎)、プログラム・ゼミ V, VII (田尾周一郎)、チュートリアル I, III, V, VII (田尾周一郎)、チュートリアル II, 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)

## 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) 非相対論的な核子を基本自由度とする核子系有効場理論を格子上に乗せて数値シミュレーションを行う場合、核子の接触相互作用を補助場で表し、フェルミオン行列式の形で表す必要があるが、この際に「符号問題」が生じる。これを避けるために繰り込み群に基づく再加重法を提案したが、化学ポテンシャルの大きな領域では、期待したほど良い振る舞いをしないことが問題となっている。この問題の原因の考察と、計算が安定的に行える範囲にある低密度領域での物理的応用について研究を行った。

### 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。この成果は現在論文として執筆中である。

### $SO(10)$ 大統一理論におけるヒッグスの質量分離とニュートリノ質量の解析 (小島健太郎、釘崎充規)

超対称性を持たない  $SO(10)$  大統一模型に関するこれまでの研究の多くは、 $SO(10)$  の表現として導入されるヒッグス多重項の可能な質量構造のうち、限られたパターンのみに着目していた。本研究では、ヒッグス多重項の可能な質量分離構造を論じ、ヒッグス多重項の質量スペクトルに応じて、大統一スケールや  $B-L$  対称性の破れのスケールの大きさがどのように変化するかを解析した。また、シーソー機構を通じて軽いニュートリノ質量が実現する場合に、ヒッグス多重項の質量分離パターンに制限が得られることを示した。

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

コンパクトな余剰次元として  $T^2/Z_3$  オービフォールドを持つ、高次元時空上の大統一理論を構築した。この模型では、diagonal embedding と呼ばれる特殊な境界条件を導入することで、ゲージ場の余剰次元方向の成分の自由度が真空期待値を持つ細谷機構を通じて、ヒッグススカラーの導入なしに、大統一对称性の自発的な破れが可能になる。本研究では、境界条件と細谷機構によって、 $SU(5) \times SU(5) \times SU(5) \rightarrow SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  という対称性の破れが実現可能なことを具体的に示した。また、余剰次元のゲージ場が作る Wilson line phase に対する有効ポテンシャルを導出し、模型に含まれる物質場の種類と対称性の破れのパターンの関係を解析した。

## 発表論文

### 《原著論文》

The Standard Model Gauge Symmetry from Higher-Rank Unified Groups in Grand Gauge-Higgs Unification Models:

Kentaro Kojima, Kazunori Takenaga, Toshifumi Yamashita,

Journal of High Energy Physics, 1706 (2017) 018 [arXiv:1704.04840]

Learning analytics of the relationships among self-regulated learning, learning behaviors, and learning performance:

Masanori Yamada, Atsushi Shimada, Fumiya Okubo, Misato Oi, Kentaro Kojima, Hiroaki Ogata,

Research and Practice in Technology Enhanced Learning (2017), Vol.12, No.1, pp. 1-17

総合的且つ多面的な評価に基づく入学者選抜とその学修成果の可視化 ー九州大学 21 世紀プログラムの事例ー:

木村拓也, 田尾周一郎, 林篤裕, 副島雄児,

名古屋高等教育研究, 18, pp. 177–198, (2018)

### 《Proceedings》

### 《その他の論文》

## 著書

## 講演

### 《海外での講演》

### 《国内での講演》

未履修クラスでの物理学概論 (II):

副島雄児, 小島健太郎,

第 34 回 物理教育研究大会, 2017.08

ピア・インストラクション型講義の実践とグループワーク改善の取り組み:  
小島健太郎, 原田恒司,  
第 34 回 物理教育研究大会, 2017.08

初期宇宙における触媒効果とマルチバース: 大河内豊,  
京都大学白眉センター主催 白眉の日 2017.8

格子上の核子系有効場理論の繰り込み群に基づく再加重法:  
原田恒司, 佐々部悟, 八尋正信,  
日本物理学会, 2017.09

初年次教養系物理学科目における反転学習の試み:  
原田恒司, 小島健太郎,  
第 66 回九州地区大学教育研究協議会, 2017.09

大学初年次文系学生を対象とした反転授業の試みと課題:  
小島健太郎,  
第 7 回大学の物理教育研究会 (UPEC), 2017.11

Decay of False Vacua via Impurities in String Landscape:  
大河内豊,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2017, 2017.12

ヒッグス多重項の質量分離を考慮した  $SO(10)$  大統一モデルの構築:  
釘崎充規, 小島健太郎,  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017.12

6次元時空上の大統一理論における細谷機構と対称性の破れのパターン:  
土屋創聖, 小島健太郎,  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017.12

$SO(10)$  大統一理論におけるヒッグス質量分離とニュートリノ質量:  
小島健太郎, 釘崎充規,  
日本物理学会第 73 回年次大会, 2018.03

研究大学における早期の研究体験:

田尾周一郎, 田中岳, 副島雄児, 飯嶋裕治,

Q-Conference2017, 2017.12

## 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、新学術領域 (研究領域提案型)

ニュートリノで探る素粒子の起源と宇宙の構造

研究代表者：北野龍一郎、研究分担者：大河内豊

文部省科学研究費補助金、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

小島健太郎：鹿児島大学で余剰次元の物理に関する大学院生向けの集中講義を行った。

## 修士論文

釘崎充規: (指導教員、小島健太郎): ヒッグス多重項の質量分離を用いた SO(10) 大統一モデルの解析

土屋創聖: (指導教員、小島健太郎) 6次元時空上の大統一理論における細谷機構と対称性の破れのパターン

## 学外での学会活動

大河内豊:

日本物理学会年次大会 Jrセッション審査員 2018年3月23日、東京理解大学野田キャンパス

国際研究会 YITP Workshop "Strings and Fields 2017" 2017年8月7-11日 世話人

小島健太郎:

九州地区大学教育研究会, 会計

日本物理学会九州支部, 幹事

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

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

原田恒司, 大河内豊, 小島健太郎:

基幹物理学FD・基幹教育院次世代型大学教育開発センターの事業として「大学の物理教育におけるアクティブ・ラーニングへの挑戦」を企画・運営し, 講演を行った (2017.10)

小島健太郎, 田尾周一郎:

平成29年度福岡県高校生知の創造力育成セミナー事業実施協議会委員を担当した

小島健太郎:

基幹教育院次世代型大学教育開発センターの事業として「九州大学アクティブラーニング教室 大学院生に向けたアウトリーチ教育」-大学院基幹教育における実践例 (公

開授業) -」を企画・運営し, 講演を行った (2017.10)

基幹教育院次世代型大学教育開発センターの事業として「基幹教育セミナー公開体験授業」を企画・運営し, 講演を行った (2017.10)

福岡県修猷館高等学校において出前授業の講師を担当した (2017.11)

# 実験核物理

## 研究室構成員

森田浩介 教授

若狭智嗣 准教授      寺西高 准教授      坂口聡志 准教授

藤田訓裕 助教

岩村龍典 技術職員

《 大学院 博士課程 》

田中泰貴

《 大学院 修士課程 》

上野熊紀      岡祥平      庭瀬暁隆      平野剛

光岡駿      入部弘太郎      大城久典      後藤秀兵

真部健太      密本普治      齋藤堯夫      吉田郭治      坂東慶伍

《 学部 卒業研究生 》

白坂和也      猪野元大樹      笠原妃奈      神原龍

坂井秀充      末川慶英      豊原一輝      平位勇磨

## 担当授業

実験核物理学（森田浩介・寺西高）、物理学ゼミナール（森田浩介・寺西高）、物理学入門（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（寺西高・藤田訓裕）、物理学総合実験（藤田訓裕、坂口聡志）、物理学入門II（坂口聡志）

## 研究・教育目標と成果

**超重元素の合成研究**（田中泰貴、庭瀬暁隆、光岡駿、平野剛、齋藤堯夫、坂東慶伍、真部健太、藤田訓裕、森田浩介）

理研仁科加速器研究センターにおいて新元素探索実験が進行中で、これまでに $^{51}\text{V}$  ( $Z = 23$ ) ビームと $^{248}\text{Cm}$  ( $Z = 96$ ) 標的を用いた原子番号119番の元素合成実験が行われている。反応確率は10 fb程度という極小の値が予想されており、大強度ビームや、それに耐えることの出来る標的の開発が行われている。現在、加速器のアップデートのために、質量分離装置GARIS-IIを含む実験装置一式をリングサイクロトロン施設に移設

した。その後、コミッショニング実験として $^{51}\text{V}$  ビームと $^{139}\text{La}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  標的を用いた、Hg(80 番元素) や Db(105 番元素) の合成実験を行い、GARIS-II の最適化や検出器の性能評価などを行った。Db 合成実験においては、アルファ崩壊を低バックグラウンドで測定する手法としてウィンドウディスクリミネータを用いたビーム ON/OFF 法の開発を行った。生成した超重核が検出器に入射した瞬間にビームを OFF にするシステムを構築し、これによって、アルファ崩壊測定による核種同定を高精度で行うことが出来るようになった。Db 生成実験においては生成断面積と寿命を高確度で決定することに成功した。コミッショニング実験後は 119 番元素の合成実験が進行中である。

#### **超重元素からの X 線測定 (庭瀬暁隆、光岡駿、平野剛、藤田訓裕、森田浩介)**

118 番、119 番元素をはじめとする超重元素の探索実験においては、従来のアルファ崩壊系列を測定する手法以外の核種同定法が求められている。そのため、アルファ崩壊に加えて特性 X 線測定を測定することによって原子番号を直接同定するための装置開発を行った。X 線検出器としては入射窓が薄い炭素膜で構成される Ge 検出器を用いて、新たに設計したシリコン検出器と組み合わせることで、アルファ線と X 線 (+ガンマ線) の同時測定が行える検出器系を制作した。その後、開発した検出器の性能評価として、理研リングサイクロトロンを用いて、 $^{51}\text{V} + ^{139}\text{La}$ ,  $^{51}\text{V} + ^{208}\text{Pb}$  反応を用いた Hg, Db の生成実験を行った。生成した重イオンは反跳分離装置 GARIS-II を通った後、検出器系に入射された。 $^{185}\text{Hg}$  からのアルファ線と X 線 (+ガンマ線) との同時測定データを得ることに成功し、娘核の励起状態からの特性 X 線が正しく観測できていることが確認できた。 $^{205}\text{Db}$  に関しても同時測定データの取得に成功しており、現在解析中である。これによって、GARIS-II を用いた超重元素実験において、原子番号の直接測定や核分光学的な解析が可能となった。

#### **ブラッグカーブ検出器を用いた超重元素の核種同定 (齋藤堯夫、坂東慶伍、真部健太、藤田訓裕、森田浩介)**

従来の新元素探索における原子番号の同定には、アルファ崩壊の系列を既知核までたどるという間接的な測定手法が用いられてきたが、最近の 119, 120 番元素の実験においては、原子番号を直接測定する手法が求められている。そこで、119, 120 番元素のような生成断面積が非常に小さく、かつミリ秒以下の寿命と予測される核に対しても測定可能な手法として、ブラッグカーブ測定による原子番号の直接測定を目指し、イオンチェンバーをベースに検出器を開発した。超重元素実験で測定される予定の核子あたり 0.2 MeV 程度のイオンではブラッグピークを作らないことが予想されているため、FADC を用いたデジタル信号解析によってブラッグカーブ全体の形状で核種の識別を行うことを可能とした。 $\alpha$  線源を使ったテスト測定の後、九大タンデム加速器か

ら供給される重イオンビームを用いた性能評価を行った。 $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ビームを用いた実験では 1.2 MeV/u 程度の低エネルギー領域においても十分なエネルギー分解能と原子番号の識別能力を持っていることが確認された。今後は  $^{127}\text{I}$  ビーム等のより質量の重い核でも原子番号を識別できるかどうかのテストを進めてゆく計画である。

#### 超重元素核の質量測定 (庭瀬暁隆)

将来の新元素合成では、従来の崩壊連鎖や交差反応法では合成した核の識別が不可能になると予想され、原子核の  $Z$  や  $A$  を直接測定する方法が求められている。原子核の質量は核種固有の物理量であるため、精密な質量測定を行うことによって核種を一意に識別することが可能となる。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 を用いた単寿命核の精密質量測定を行っており、昨年度は  $\text{Md}(Z = 101)$  や  $\text{No}(Z = 102)$  をはじめとした 80 核種あまりの直接質量測定に成功した。本年度は将来の質量測定実験へ向けた中核検出器として、原子核の精密質量と崩壊特性 (エネルギー/半減期) を相関測定できる  $\alpha$ -ToF 検出器を開発した。 $\alpha$ -ToF は既存のイオン検出器に崩壊エネルギー検出用の Si 半導体を埋めこんだものである。高電圧の印加された検出器からの信号を光通信によって伝達・処理する専用回路の設計及び開発を行った。オフラインテストにより、エネルギー分解能  $141 \pm 0.9$  keV および時間分解能  $251.5 \pm 6.8$  ps という値が得られ、重イオンの飛行時間とエネルギーの相関測定の実現可能性、及び超重核の質量測定実験のための十分な性能を実証することに成功した。 $\alpha$ -ToF は、今後の MRTOF を用いた質量測定実験において中核的役割を果たすことが期待される。

#### 陽子ノックアウト ( $\bar{p}, 2p$ ) 反応を用いた原子核の分光学的研究 (大城久典、後藤秀兵、密本晋治、坂口聡志、若狭智嗣)

近年の不安定核の研究によって中性子過剰核では魔法数が安定核とは異なっていることが見いだされ、その原因のひとつとしてテンソル力の働きが提唱されている。我々は Ca 同位体を対象として、スピン軌道 ( $LS$ ) 分離エネルギーの同位体依存性からテンソル力の働きを調べることを目指している。具体的には、 $J_{>} = \ell + 1/2$  状態と  $j_{<} = \ell - 1/2$  状態の分光学的因子と励起エネルギーを精度良く求め、分光学的因子で荷重平均をとった重心エネルギーから分離エネルギーを求める。実験は、大阪大学核物理研究センター (RCNP) において 197 MeV の偏極陽子ビームを用いた核内陽子ノックアウト ( $\bar{p}, 2p$ ) 反応の測定を行った。今回は  $^{40}\text{Ca}$  に対して、励起エネルギー 20 MeV 程度まで、運動量移行で 200 MeV/c 程度までのデータ収集に成功した。エネルギー分解能で 200 keV 程度を達成し、残留核である  $^{39}\text{K}$  の低励起状態に対して、 $(e, e'p)$  反応で報告されている状態や分光学的因子と無矛盾な結果が得られている。今後は、更に高励起状態の解析

を進め、多重極展開の手法を組み合わせる事で、連続状態を含めて分光学的因子を決定し、分離エネルギーを精度良く決めると共に、他の同位体への測定を進める。

**飛行時間測定法を用いた ( $^3\text{He}, n$ ) 反応測定による  $^3\text{He}$  分解反応の研究** (猪野元大樹、笠原妃奈、平位勇磨、坂口聡志、若狭智嗣)

$^3\text{He}$  分解反応の性質や、 $^3\text{He}$  内部の中性子の運動量分布を理解することを目的として、( $^3\text{He}, n$ ) 反応測定を行った。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なった。 $^{nat}\text{C}-^{197}\text{Au}$  の 6 標的に 86.6 MeV の  $^3\text{He}$  ビームを照射し、( $^3\text{He}, n$ ) 反応により放出された中性子のエネルギーを、飛行時間測定法 (TOF 法) により求め、( $^3\text{He}, n$ ) 反応の二重微分断面積を測定した。 $^3\text{He}$  分解反応の質量数依存性に関しては、ピーク断面積が質量数  $A$  のおよそ  $A^{1.5/3}$  に比例する結果が得られた。この事は、 $^3\text{He}$  から分解した中性子の一部が標的に吸収されることを示唆している。また、ピークエネルギーについては、元の  $^3\text{He}$  ビームの約 1/3 になり、その弱い質量数依存性は、クーロン場の影響により定性的に説明可能であるとの知見を得た。さらに、ピークの半値幅については、フェルミガス模型から期待される  $^3\text{He}$  内部の中性子運動量分布からの寄与で説明出来る事が確かめられた。

**RI ビーム実験のための反跳陽子検出器系の開発** (岡祥平、上野熊紀、寺西高)

RI ビームを用いた逆運動学実験における反跳陽子検出器系に関して、以下の 2 つの開発に取り組んだ。

1) タンデム加速器による核子あたり 2.33 MeV の  $^{12}\text{C}$  ビームを陽子標的 (ポリエチレン) に照射し、逆運動学陽子共鳴散乱の試験測定を行った。反跳陽子の測定には有感面積  $24 \times 24 \text{ mm}^2$ 、一層目の厚さ約  $48 \mu\text{m}$ 、二層目の厚さ約  $1500 \mu\text{m}$  の  $\Delta E$ - $E$  型シリコン半導体検出器テレスコープを用いた。既知の  $^{12}\text{C}+p$  共鳴スペクトルを解析することにより、検出器系の分解能を評価することができた。また、解析に使用するエネルギー阻止能の計算に用いる SRIM コードの誤差が共鳴エネルギー決定の際の大きな系統誤差になりうる事が示された。

2) 小型 ( $5.5 \times 5.5 \times 5.5 \text{ mm}^3$ ) の CsI(Tl) シンチレーター単体での陽子識別の試験を行った。シンチレーション光検出器として用いた SiPM の信号波形をデジタルオシロスコープにより一イベントごとに読み取り総発光量からエネルギーを、早い成分と遅い成分の強度比から粒子識別を行った。陽子エネルギー 3 ~ 12 MeV の範囲で、陽子と重陽子の識別が十分可能であることが確認できた。SiPM 読み出し回路として新たにトランスインピーダンスアンプを作成した。

**タンデム加速器における励起関数測定系の開発** (寺西高)

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。当面想定している測定対象は、変形共存核として知られる  $^{118}\text{Sn}$  の陽子共鳴弾性・非弾性散乱である。本年度は、まず現状のビームラインおよび制御系の問題点を把握するため、 $^{118}\text{Sn}+p$  共鳴散乱の励起関数を 7 から 10 MeV の範囲で大まかに測定するテスト実験を行った。ターミナル電圧および分析電磁石の設定精度向上、スリット系の整備、各種電源の安定化等の対策が必要であることがわかった。次年度にこれらを行う予定である。

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

本年度は、2016 年度に理研 RIBF で行った  $^6\text{He}$ –偏極陽子弾性散乱実験のデータ解析及び理論解釈を進めた。取得した微分散乱断面積データは、既存のどのデータよりも高い運動量移行領域である  $1.7\text{--}2.8\text{ fm}^{-1}$  をカバーしており、 $^6\text{He}$  核の内部領域における密度分布を反映していると期待される。相対論的インパルス近似による解析により、得られたデータの、ハロー中性子分布半径及びコア分布半径に対する感度を評価したところ、後者は前者の 15 倍と高く、高運動量移行陽子弾性散乱が内部領域の密度分布に対する良いプローブとなりうることを確認した。また、 $^6\text{He}$  内部領域の中性子分布として、陽子分布と同一の分布を仮定したものがデータをよく再現することから、 $^6\text{He}$  内部に  $\alpha$  コアが存在するという予想と矛盾しない結果を得た。さらに、得られた陽子分布半径は、レーザー核分光による既存の測定結果と誤差の範囲で一致する値となり、高運動量移行領域の陽子弾性散乱を用いた核内部の密度分布導出法の確立に大きく寄与する結果を得た。上記の内容を投稿論文として発表した。ベクトル偏極分解能のデータ解析も進めている。

#### 発表論文

##### 《原著論文》

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

T. Tanaka, Y. Narikiyo, K. Morita, K. Fujita, D. Kaji, K. Morimoto, S. Yamaki, Y. Wakabayashi, K. Tanaka, M. Takeyama, A. Yoneda, H. Haba, Y. Komori, S. Yanou, B.J. Gall, Z. Asfari, H. Faure, H. Hasebe, M. Huang, J. Kanaya, M. Murakami, A. Yoshida, T. Yamaguchi, F. Tokanai, T. Yoshida, S. Yamamoto, Y. Yamano, K. Watanabe, S. Ishizawa, M. Asai, R. Aono, S. Goto, K. Katori, and K. Hagino, *J. Phys. Soc. Jpn* **87**, 014201 (2018).

※Papers of Editors' Choice, Journal of the Physical Society of Japan, December 14th, 2017 に選出

Proton-induced knockout reactions with polarized and unpolarized beams:

T. Wakasa, K. Ogata, and T. Noro.

Prog. Part. Nucl. Phys. **96**, 32 (2017).

First measurement of  $^{30}\text{S} + \alpha$  resonant elastic scattering for the  $^{30}\text{S}(\alpha, p)$  reaction rate:

D. Kahl, H. Yamaguchi, S. Kubono, A.A. Chen, A. Parikh, D.N. Binh, J. Chen, S. Cherubini, N.N. Duy, T. Hashimoto, S. Hayakawa, N. Iwasa, H.S. Jung, S. Kato, Y.K. Kwon, S. Nishimura, S. Ota, K. Setoodehnia, T. Teranishi, H. Tokieda, T. Yamada, C.C. Yun, L.Y. Zhang,

Phys. Rev. C **97**, 015802 (2018).

GARIS-II+MRTOF を用いた短寿命核精密質量分析:

庭瀬暁隆、和田道治、P. Schury、伊藤由太、木村創大、M. Rosenbusch、加治大哉、森本幸司、羽場宏光、山木さやか、田中泰貴、森田浩介、高峰愛子、宮武宏也、平山賀一、渡辺裕、J. Y. MOON、向井もも、H. Wollnik,

放射化学 第37号 2018年3月

Proton elastic scattering at 200 A MeV and high momentum transfers of  $1.7\text{--}2.7\text{ fm}^{-1}$  as a probe of the nuclear matter density of  $^6\text{He}$ :

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, J. Zenihiro,

Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 053D01 (2018).

Exclusive quasi-free proton knockout from oxygen isotopes at intermediate energies:

S. Kawase, T. Uesaka, Tsz Leung Tang, D. Beaumel, M. Dozono, T. Fukunaga, T. Fujii,

N. Fukuda, A. Galindo-Uribarri, S. Hwang, N. Inabe, T. Kawabata, T. Kawahara, W. Kim, K. Kisamori, M. Kobayashi, T. Kubo, Y. Kubota, K. Kusaka, C. Lee, Y. Maeda, H. Matsubara, S. Michimasa, H. Miya, T. Noro, Y. Nozawa, A. Obertelli, K. Ogata, S. Ota, E. Padilla-Rodal, S. Sakaguchi, H. Sakai, M. Sasano, S. Shimoura, S. Stepanyan, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takaki, H. Takeda, A. Tamii, H. Tokieda, T. Wakasa, T. Wakui, K. Yako, J. Yasuda, Y. Yanagisawa, R. Yokoyama, K. Yoshida, K. Yoshida, and J. Zenihiro,

Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 021D01 (2018).

Systematic analysis of inelastic alpha scattering off self-conjugate  $A = 4n$  nuclei:

S. Adachi, T. Kawabata, K. Minomo, T. Kadoya, N. Yokota, H. Akimune, T. Baba, H. Fujimura, M. Fujiwara, Y. Funaki, T. Furuno, T. Hashimoto, K. Hatanaka, K. Inaba, Y. Ishii, M. Itoh, C. Iwamoto, K. Kawase, Y. Maeda, H. Matsubara, Y. Matsuda, H. Matsuno, T. Morimoto, H. Morita, M. Murata, T. Nanamura, I. Ou, S. Sakaguchi, Y. Sasamoto, R. Sawada, Y. Shimizu, K. Suda, A. Tamii, Y. Tameshige, M. Tsumura, M. Uchida, T. Uesaka, H. P. Yoshida, and S. Yoshida,

Phys. Rev. C **97**, 014601 (2018).

Complete set of deuteron analyzing powers from  $dp$  elastic scattering at 190 MeV/nucleon:

K. Sekiguchi, H. Witala, T. Akieda, D. Eto, H. Kon, Y. Wada, A. Watanabe, S. Chebotaryov, M. Dozono, J. Golak, H. Kamada, S. Kawakami, Y. Kubota, Y. Maeda, K. Miki, E. Milman, A. Ohkura, H. Sakai, S. Sakaguchi, N. Sakamoto, M. Sasano, Y. Shindo, R. Skibinski, H. Suzuki, M. Tabata, T. Uesaka, T. Wakasa, K. Yako, T. Yamamoto, Y. Yanagisawa, and J. Yasuda,

Phys. Rev. C **96**, 064001 (2017).

Neutron production cross sections for  $(d, n)$  reactions at 55 MeV:

T. Wakasa, S. Goto, M. Matsuno, S. Mitsumoto, T. Okada, H. Oshiro, and S. Sakaguchi,

Prog. Theor. Exp. Phys. **2017**, 083D01 (2017).

Cross sections and analyzing powers for  $(p, np)$  reactions of  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^6\text{Li}$ , and  ${}^{12}\text{C}$  at 296 MeV:

T. Wakasa, J. Yasuda, M. Dozono, T. Fukunaga, S. Gotanda, K. Hatanaka, K. Ishibashi, Y. Kanaya, S. Kimura, Y. Maeda, Y. Maeda, Y. Nishio, T. Noro, T. Nozoe, K. Ohnaka,

S. Sakaguchi, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, T. Taguchi, and Y. Wada,  
Phys. Rev. C **96**, 014604 (2017).

《Proceedings》

Deuteron Analyzing Powers for  $dp$  Elastic Scattering at Intermediate Energies and  
Three-Nucleon Forces:

K. Sekiguchi, Y. Wada, A. Watanabe, D. Eto, T. Akieda, H. Kon, K. Miki, N.  
Sakamoto, H. Sakai, M. Sasano, Y. Shimizu, H. Suzuki, T. Uesaka, Y. Yanagisawa,  
M. Dozono, S. Kawase, Y. Kubota, C.S. Lee, K. Yako, Y. Maeda, S. Kawakami, T.  
Yamamoto, S. Sakaguchi, T. Wakasa, J. Yasuda, A. Ohkura, Y. Shindo, M. Tabata,  
E. Milman, S. Chebotaryov, H. Okamura, and T.L. Tang,  
Few-Body Systems **58**, 48 (2017).

《その他の論文》

Measurement of barrier distribution for  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V} + ^{248}\text{Cm}$  and  $^{51}\text{V} + ^{208}\text{Pb}$  reactions:  
T. Niwase, Y. Yamano, K. Watanabe, K. Morita, K. Fujita, T. Hirano, S. Mitsuoka,  
K. Morimoto, D. Kaji and H. Haba,  
RIKEN Accel. Prog. Rep. **50**, 69 (2017).

## 講演

《海外での講演》

Elastic scattering of polarized proton from  $^6\text{He}$ :

S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration,

SAMURAI International Collaboration Workshop 2017, Darmstadt, Germany, 8 Au-  
gust 2017.

《国内での講演》

GARIS-II+MRTOF を用いた短寿命核精密質量分析:

庭瀬暁隆、和田道治、P. Schury、伊藤由太、木村創大、M. Rosenbusch、加治大哉、森  
本幸司、羽場宏光、山木さやか、田中泰貴、森田浩介、高峰愛子、宮武宏也、平山賀  
一、渡辺裕、J. Y. MOON、向井もも、Wollnik

2017 日本放射化学会年会 第 61 回放射化学討論会、2017 年 9 月 6 日、筑波大学

超重核質量と崩壊特性の相関測定へ向けた  $\alpha$ -ToF 検出器の開発:

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

日本物理学会 第73回年次大会、2018年3月22日、東京理科大学

重陽子分解反応における中性子生成の標的依存性の研究:

密本晋治、若狭智嗣、坂口聡志、大城久典、岡田智香、後藤秀兵、松野雅樹

日本物理学会 第73回年次大会、2018年3月22日、東京理科大学

超重核精密質量分析へ向けた  $\alpha$ -ToF 検出器の開発:

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

第123回 日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

超重元素領域における核種同定用イオンチェンバーの開発:

齋藤堯夫、平野剛、光岡駿、庭瀬暁隆、藤田訓裕、森田浩介

第123回 日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

超重核研究のための Si-Ge 検出器アレイの開発:

光岡駿、平野剛、庭瀬暁隆、加治大哉、森本幸司、羽場宏光、藤田訓裕、森田浩介

第123回 日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

回転式連続放射線測定装置 MANON の高度利用技術の開発:

平野剛、光岡駿、庭瀬暁隆、加治大哉、森本幸司、羽場宏光、藤田訓裕、森田浩介

第123回 日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

重陽子分解反応による中性子ビームの検討:

後藤秀兵、若狭智嗣、坂口聡志、大城久典、岡田智香、松野雅樹、密本晋治

第123回 日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

重陽子分解反応の測定と断面積の質量数依存性:

大城久典、若狭智嗣、坂口聡志、岡田智香、後藤秀兵、松野雅樹、密本晋治

第123回 日本物理学会九州支部例会、2017年12月9日、鹿児島大学

MPPC を用いた CsI(Tl) シンチレーション検出器の開発:

上野熊紀、寺西高、岡祥平、入部弘太郎、吉田郭治、坂井秀光、豊原一輝

第 123 回 日本物理学会九州支部例会、2017 年 12 月 9 日、鹿児島大学

逆運動学陽子共鳴散乱実験のための検出器系の開発:

岡祥平、寺西高、上野熊紀、入部弘太郎、吉田郭冶、坂井秀光、豊原一輝

第 123 回 日本物理学会九州支部例会、2017 年 12 月 9 日、鹿児島大学

## 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)

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

研究分担者：若狭智嗣 (研究代表者 東北大学大学院理学研究科 関口仁子)

文部省科学研究費補助金、基盤研究 (C) 「スピン偏極を取り入れた非束縛核分光法の開発」 (寺西高 2015~2017 年度)

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

## 他大学での研究と教育

若狭智嗣: The 16th CNS International Summer School (CNSSS17) にて「Gamow-Teller and Spin-Dipole Resonances and Experimental Methods for Spin Excitations」の題目で講義を行った。

## 学部 4 年生卒業研究

末川慶英：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)： ${}^7\text{Li} + {}^{51}\text{V}$  反応における軽粒子放出チャンネルの解析

神原龍：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)： ${}^7\text{Li} + {}^{51}\text{V}$  融合障壁のチャンネル結合法による解析

白坂和也：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)： ${}^7\text{Li} + {}^{51}\text{V}$  準弾性散乱の断面積測定

猪野元大樹：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた ( ${}^3\text{He}, n$ ) 反応によるヘリウム3分解反応の研究

笠原妃奈：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた ( ${}^3\text{He}, n$ ) 反応測定によるヘリウム3分解反応の研究

平位勇磨：(指導教員、若狭智嗣)：飛行時間測定法を用いた ( ${}^3\text{He}, n$ ) 反応測定による ${}^3\text{He}$  分解反応の研究

坂井秀光：(指導教員、寺西高)：MPPC を用いたプラスチックシンチレータ検出器の作成及びイオンビームの測定

豊原一輝：(指導教員、寺西高)：MPPC を用いたプラスチックシンチレータ検出器の作成及びイオンビームの測定

## 修士論文

庭瀬暁隆：(指導教員、森田浩介)：超重核精密質量分析のための  $\alpha$ -ToF 検出器の開発

平野剛：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)：Window Discrimination を用いた超重核の崩壊事象選別に関する研究

光岡駿：(指導教員、森田浩介・藤田訓裕)：超重核研究のための Si-Ge 検出器の開発

上野熊紀：(指導教員、寺西高)：CsI(Tl) シンチレーターと SiPM を用いた陽子検出器の開発

岡祥平：(指導教員、寺西高)：逆運動学陽子共鳴散乱のための測定系の開発

## 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

森田浩介：

- 第76回西日本文化賞 受賞 2017年11月3日
- 新元素「ニホニウム」の新年度教科書や広辞苑収録に関する各種取材対応
- 別府鶴見ヶ丘高等学校 講演会「新元素発見『現代の錬金術』」 2017年9月
- 豊後高田市高田高等学校 講演会「新元素発見『現代の錬金術』」 2017年10月
- 別府市野口病院 甲状腺学会 特別講演 2017年10月
- 九州大学アカデミックフェスティバル 九州大学の“今”がよくわかるトークショー 2017年10月
- 福岡市科学館開会式典ビデオメッセージ 2017年8月

若狭智嗣：

- 平成28年度特別研究員等審査会専門委員(書面担当)表彰を受賞(2017年9月7日)

庭瀬暁隆：

- The 16th CNS International Summer School において Young Scientist Award を受賞(2017年8月2日)。  
発表題目: High-precision mass measurements of short-lived nuclei with MRTOF + GARIS-II
- 2017日本放射化学会年会 第61回放射化学討論会において若手優秀口頭発表賞を受賞。  
発表題目: GARIS-II+MRTOF を用いた短寿命核精密質量分析

体験入学・実験「物質を透過する粒子線」、2018年3月27日(寺西高・坂口聡志)

体験入学・実験「身の回りの放射能体験」、2018年3月27日(藤田訓裕)

# 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

《 大学院 博士課程 》

大石 航      調 翔平      富田 龍彦      中居 勇樹

角 直幸      高田 秀佐

《 大学院 修士課程 》

眞玉 将豊      伊藤 拓実      古賀 淳      斉藤 貴士

関谷 泉      山口 尚輝      山城 大知      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

《 学部 卒業研究生 》

上杉 悠人      川島 僚介      佐田 智也      出口 遊斗

永野 智也      彌吉 拓哉

《 研究生 》

Hernandez Barahona Jocsan Ariel

## 担当授業

- 川越  
基幹物理学 IA (前期)×2、物理学ゼミナール (後期)
- 東城  
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)
- 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 圭一)

スイス・ジュネーブ郊外にある欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、国際共同研究 ATLAS 実験を推進している。LHC 加速器では、2015 年から設計値に重心系エネルギー 13 TeV での運転を再開し、実験を継続している。今年度は、シリコン半導体飛跡検出器の運転・維持・改良、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)

ビーム衝突点から発生する多数の荷電粒子の検出において、ATLAS 検出器最内層に配置した内部飛跡検出器が重要な役割を果たす。我々のグループは、内部飛跡検出器の 1 つであるシリコン半導体飛跡検出器 ( Semiconductor Tracker : SCT ) の運転に精力的に取り組んできた。SCT 検出器の運転に参加する国内研究機関の中で、九州大学は唯一スタッフが CERN に常駐する大学である。2013 年までは東城が国内研究機関が連携して研究を進める上での中心となり、それ以降は音野がその役割を引き継いでいる。音野は、2013 年 11 月より SCT data quality coordinator を務め、2015 年の LHC の運転開始以降、CERN に常駐をしている博士 3 年の調と共に、ビーム衝突時における SCT 検出器の性能評価を行い、順調なデータ取得を実現した。2016 年 2 月から、織田が SCT 検出器の offline software coordinator を務め、検出器ソフトウェア全般において責任を持っている。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。2017 年、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  $20.6 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$  に到達し、設計値を  $10 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$  を大きく超えて 1 年間で  $50.4 \text{ fb}^{-1}$  と過去最高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、6.6%及び6.4%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 勲)**

我々のグループは、ヒッグス粒子が  $Z$  粒子対に崩壊し、各  $Z$  粒子がレプトン ( $l$ 、電子またはミューオン) 対に崩壊する、4レプトンチャンネル ( $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ ) の解析を 2012 年から行っている。このチャンネルには背景事象が少なく、ヒッグス粒子を完全に再構成できるという利点がある。織田は DAOD と呼ばれる解析用データの作成を担当した。2016 年 10 月までに取得した積分ルミノシティ  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  の重心系エネルギー 13 TeV のデータを用いた解析結果を 2017 年 5 月から 2018 年 3 月にかけて公表した。ヒッグス粒子の生成断面積は  $68_{-10}^{+11} \text{ pb}$  であり、素粒子の標準模型に基づく理論計算の結果  $55.6 \pm 2.5 \text{ pb}$  とおおむね一致している。生成過程ごとの生成断面積などのヒッグス粒子の性質は  $2\sigma$  の不定性の範囲内で標準模型の予測と一致した。質量は  $124.88 \pm 0.37(\pm 0.37(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})) \text{ GeV}$  と求まり、ヒッグス粒子が光子対に崩壊するチャンネルでの測定結果  $125.11 \pm 0.42(\pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.36(\text{syst})) \text{ GeV}$  より、系統誤差 (syst) が小さいために、合計の誤差としても小さい結果が得られた。2017 年 11 月までに積分ルミノシティ約  $86 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得し、その解析を進めた。

- **新粒子の探索 (音野 瑛俊、調 翔平)**

ヒッグス粒子の発見によって素粒子標準模型から未発見粒子は無くなったが、謎は依然として多く残されている。一例として、ダークマターは天体観測から存在が示唆されているが候補となる粒子は素粒子標準模型に無い。LHC ではダークマターを直接生成できる可能性があるため、ATLAS 実験はこれまでも精力的に探索を行ってきた。ただし、ATLAS 実験の標準的な物理解析はヒッグス粒子のようにビーム衝突点で生成後に即座に崩壊する粒子をターゲットとしている。そこで、我々のグループでは SCT の一層目のある 300 mm までを飛程とするような長寿命の新粒子の探索に 2014 年から取り組んでいる。音野は標準模型の枠組みにある粒子の超対称性パートナーが長寿命粒子となる可能性に着目した。Run1 の取得データを用いて探索したが新粒子発見の兆候は残念ながら得られなかった。並行して、長寿命粒子を生む新たなシナリオを理論研究者らと考案し、2015 年に論文誌に受理されている。2016 年はこれらのシナリオについて実際に Run2 の取得データを用いて探

索を進め、完了させた。発見には至らなかったが、2017年3月の国際学会で結果を公表し、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、山口 尚輝、藤野 圭一)

現行の LHC 加速器は、2023 年まで運転して積分ルミノシティ  $300 \text{ fb}^{-1}$  を実験に提供する予定である。その後は、加速器改良により瞬間ルミノシティを  $(5-7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  に増強し、2026 年から高ルミノシティ LHC (HL-LHC) として再稼働させ、エネルギーフロンティア物理をさらに推進する計画である。HL-LHC 計画に対応し、ATLAS 実験では検出器をアップグレードする計画を進めている。我々のグループは、内部飛跡検出器全体を高放射線耐性シリコン検出器にアップグレードする計画に参画しており、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。今年度は、シリコンピクセル検出器の量産化に向けた組立手法に重点を置き、試作機の開発を行った。シリコンピクセル検出器は、シリコンセンサーと読み出しチップをバンプボンディングで接合したセンサーモジュール、読み出し・制御用のフレキシブル基板で構成される。センサーモジュールとフレキシブル基板を絶縁性接着剤で接着し、 $25 \mu\text{m}$  アルミ線ワイヤーを用いたワイヤーボンディングで接合する。アルミ線ワイヤーは、保護のために樹脂で封止する。開発要素として、部材の放射線耐性、高位置精度の接着、品質管理のための検出器読み出し手法がある。センサーモジュール・接着剤・封止剤の部材については、東北大学 CYRIC 加速器施設で陽子ビーム照射を行い、耐放射線性の研究を行った。特に、接着剤については実機に使用することができる候補を選定することができた。接着手法にはステンシル法を用いる。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。ステンシル法を用いて、最小量の物質量・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た。高位置精度の組立では、治具の開発が鍵である。高精度機械加工による治具試作機を製作し、繰り返し位置精度の要求値である  $50 \mu\text{m}$  以内を達成することに

成功した。今後、読み出し試験の手法・環境を整備し、検出器開発をさらに進展させる予定である。

**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、山城 大知、三浦 裕、森 涼介)

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)

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、今まで継続してきたカロリメータの読み出しのために開発されたASICであるSKIROC2およびSKIROC2Aの評価を続けるとともに、新型プロトタイプの設計およびファームウェアの改良にも取り組んだ。ASICの評価については、今後のプロトタイプの大量製作に備え、多数のASICを半自動的に評価する手法の開発に取り組むとともに、実際に数10個のASICを評価し、性能の比較を行った。また、既存のプロトタイプのビーム試験をフランスと共同でドイツ・DESY研究所で行い、学生を派遣するとともに、新型プロトタイプ製作のための検討・設計をフランスと共同で行った。九州大学では主にASICが実装された基板と外部のシステムを接続する部分の開発を新規に行い、日本で製作してフランスにも供給した。また、プロトタイプの動作に用いるFPGAファームウェアの開発に携わった。

- **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、山城 大知、森 涼介)

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エ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の基礎特性を調べ、放射線測定への可能性を探った。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。本年度は昨年度の結果を踏まえ、様々な構造を持つ PSD を浜松ホトニクスと共同で設計し、製作を行った。

- **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、山城 大知)

ILCは従来の500 GeVから計画が変更され、まずヒッグス精密測定に適した250 GeVで運転を行う計画となった。250 GeVでも新物理探索を行う一つの方法として、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は重要度が増している。本研究では、従来行われていなかったフルシミュレーションによる研究を行い、また250 GeVをターゲットとして各終状態の微分断面積を求め、測定感度を求めた。また従来この解析にて検討されていた各種の $Z'$ モデルに加え、Gauge Higgs Unification (GHU)を仮定した場合の影響、またダークマターの候補である重い中性粒子WIMPのループによる影響による角度分布への影響も調べた。また、2クォークの終状態においてはクォークの電荷測定が重要となるが、これも簡易的なものではあるが取り入れ、測定感度に加えた。結果として、特にGHUモデルにおいてILCの偏極電子による効果でモデル特定が容易に可能であることを示すとともに、WIMPの影響の測定においても、直接測定よりも高い感度を得られることを示した。

- **ミューオン・電子転換過程の探索** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、大石 航、中居 勇樹、齊藤 貴士、橋本 奨平、宮崎 祐太)

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設J-PARCのハドロン実験施設において、ミューオンが電子に転換する過程を探索するため、COMET実験(J-PARC E21 実験)を国際共同研究で進めている。世界最高強度のパルスミューオンビームを生成するための実験施設は、建屋が完成し、専用ビームラインの建設が進んでいる。我々の研究グループは、ミューオン-電子転換過程を探索するための検出器の開発を行っている。COMET実験の第一段階(Phase-I)では、 $\mathcal{O}(10^{-15})$ の発見感度での実験を計画しており、円筒型ドリフトチェンバーとトリガー検出器を組み合わせた検出器システムが主要な役割を果たす。さらに、Phase-Iで初めて生成するミューオンビームの性質を詳細に調べることが不可欠であり、 $\mathcal{O}(10^{-17})$ の発見感度を目指した第二段階(Phase-II)へ進むためにも重要である。Phase-Iにおけるミューオンビームの研究とPhase-IIにおける物理測定では、ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータを用いる計画である。

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

Phase-Iの物理測定に用いるトリガー検出器の開発を進めている。電子をトリガーするため、UVアクリルをチェレンコフ輻射体とし、信号-背景比の向上とタイミング情報を得るため、プラスチックシンチレータを組み合わせる。光検出器としてファインメッシュ型光電子増倍管 (FM-PMT) を用いたプロトタイプ検出器の開発を進めた。特に、FM-PMTの後段に設置する前置増幅回路、放射線耐性、検出器筐体の設計に重点を置いた。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つつ、並行して、一部の部品以外は放射線耐性を持つものを選定し、試作機を製作した。今後、検出器・FM-PMTと組み合わせて、性能評価試験を行う予定である。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 の開発を進めた。COTTRIの試作機を製作し、前置増幅器との整合性の研究、及び、ファームウェアの開発を行った。その性能評価では、要求するレート耐性とトリガー効率を持つことを示すことができ、実機開発に向けて大きく前進した。トリガー検出器全体の設計も進行した。検出器全体を配置・支持し、実験環境下における背景事象の対する遮蔽、円筒型ドリフトチェンバー部のヘリウムに対する遮蔽を兼ね備えるデザインの開発が課題であり、引き続き開発を行っていく予定である。

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

Phase-Iのミュオンビームの研究、及び、Phase-IIの物理測定に用いる、電磁カロリメータの開発を進めている。電磁カロリメータは、高計数率環境下で信号電子のエネルギーを測定し、事象トリガーを生成するために重要な役割を果たす。磁場がある真空中で動作させ、高エネルギー分解能と速い時間応答を必要とするため、LYSO結晶をアバランシェ・フォトダイオード (APD) で読み出す。LYSO結晶を選定した後、ほぼ実機仕様である試作機を開発・製作し、東北大学電子光理学研究センターにおいてビーム試験を行った。今年度はそのデータ解析を行い、その結果、エネルギー分解能・位置分解能・時間応答で要求性能を満たすことを示した。最終結果を提出するまでに必要な詳細な解析はまだ残っており、今後も継続して研究する予定である。ビーム試験の後、実機に仕様するベースラインとなる結晶、及び、その他の候補となる結晶の詳細な実験室での性能比較も行い、ベースラインとする結晶の性能が優れていることも示した。さらに、波形記録回路を改良して次期試作

機を開発するため、ノイズ評価・時間較正の詳細な研究も行った。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、改良・性能評価を行う予定である。

**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、伊藤 拓実、堤 裕樹)

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 J-PARC E34 実験を国際共同研究で進めている。 $g-2$  の測定は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E821 実験が 0.54 ppm の精度で素粒子標準模型 (SM) から  $3.3\sigma$  のずれを発表し、SM を超える物理 (BSM) の探索において重要な位置を占めている。また、EDM の測定は、BNL E821 実験が  $1.9 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$  の上限値を与えた。有限の EDM は時間反転対称性を破るため、CPT 定理を仮定すれば CP 非保存を意味し、それを生み出す BSM の存在を示唆する。本実験は、極冷ミューオンビームを生成・加速し、収束電場を用いずに超高精度磁場中にミューオンを蓄積することにより、 $g-2$  を 0.1 ppm の精度で、EDM を  $10^{-21} e \cdot \text{cm}$  の感度で、それぞれを分離して測定し、BSM を探索する野心的な計画である。我々のグループは、本実験に用いるシリコンストリップ検出器を開発している。検出器は、ミューオンを蓄積する磁場内に設置し、ミューオンの崩壊で生成される陽電子の飛跡をヒット情報から再構成する。平均ヒット計数率は 1 ストリップあたり 1.2 MHz から二桁低い領域まで変動する。その環境下で計数率に対して安定であり、高検出効率が要求される。

● **シリコンストリップ検出器用読み出しチップの開発** (川越 清以、東城 順治、吉岡 瑞樹、末原 大幹、山中 隆志、堤 裕樹)

シリコンストリップ検出器に用いる読み出しチップの開発を進めている。これまでに、64 チャンネルを有するアナログチップ Slit2013、128 チャンネルを有するアナログ部 Slit2014 とデジタル部 GM2DV2 を備えた混載チップ SliT128A を開発してきた。SliT128A の性能評価の結果、信号-雑音比・ゲイン・ノイズ・ダイナミックレンジにおいては要求を満たすが、パルス幅とタイムウォークでは要求を満たさなかった。そのため、改良を加えたアナログチップの SliT2016TEG を開発し、その性能評価を行った。主な変更は、微分回路を導入してゼロクロッシングを用いることにより、タイムウォークの要求を満たすことである。性能評価のための評価基板を設計・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。暫定的な結果として、タイムウォークの要求を満たすことを示した。一方、ノイズの増加・バイアス供給等について課題があることが分かり、次期開発で克服する計画である。

次期開発では、SliT2016TEG の結果に基づいて、アナログ・デジタル混載の実機仕様のチップを製作する。性能を満たすことを示せば、最終版のチップとなる。

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

シリコンストリップ検出器に用いるシリコンセンサーの開発を進めている。今年度は、実機仕様のシリコンセンサーの設計と製作を行った。センサーは、*p-in-n* 型の AC 結合で、6 インチウエハ上の最大面積を利用した。ピッチは 190  $\mu\text{m}$ 、ストリップ数は 1024 本である。一つのデザインで二方向の読み出し、検出器モジュールのデザインと整合性を保つため、ダブルメタル手法を用いて読み出しパッドをセンサー外縁部に配置した。そのため、センサーを 90° 回転した場合も読み出しパッドの位置は同一である。センサーのデザインを完了後、その製作を行い、基礎的な性能評価を行った。性能評価では、プローバーを用いて、センサー背面にチャックから高電圧を印加し、プローブによる直接接触により漏れ電流・静電容量を測定し、良好な結果を得た。評価項目として、センサー全体の特性である完全空乏化電圧・漏れ電流、各ストリップの特性であるバイアス抵抗・ストリップ容量・カップリング容量・ストリップ電流等を検討した。それらを測定する計測システムを大量生産時に使用できるレベルまで開発をほぼ完了させた。

- **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、構造体を投下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し、さらに原子炉・氷河・ピラミッド等へも応用され、注目を集めている。九州大学は、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、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。その活動の一環として、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。検出器のタイプとして、比較的標準的なプラスチックシンチレータを用いる。飛来方向を測定するために 3 層構造とし、各層には水平・鉛直 2 方向にプラスチックシンチレー

タを配置した。プラスチックシンチレータの総数は 144 本である。従来は光電子増倍管を用いることが多かったが、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 モジュールを用いる。今年度は、これまでに開発し準備してきた検出器の調整と読み出しの開発を重点的に行った。特に、各 MPPC のゲイン調整、論理回路の構成と実装、データ収集システムを行った。九州大学キャンパス内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ができるとを示した。今後、実際の観測に向けて、野外での運転に必要なモニター・設置方法・電源の検討を行う。

#### 中性子を用いた基礎物理 (吉岡 瑞樹、富田龍彦、角直幸、高田秀佐、古賀淳、上原英晃)

- **高精度中性子崩壊寿命測定実験** (吉岡瑞樹、富田龍彦、角直幸、上原英晃)  
我々は茨城県東海村の J-PARC 加速器を用いて中性子崩壊寿命を高精度で測定する実験を推進している。中性子寿命を導出するためには入射中性子の流量と  $\beta$  崩壊の量を知る必要があるが、これまで行われてきた実験では中性子と壁との相互作用や流量に関する系統誤差が問題となっていた。これに対し、我々の実験では入射中性子流量と  $\beta$  崩壊電子を TPC 検出器で同時測定することにより、これまでの実験に伴っていた系統誤差を回避することが可能となる。我々は、この新たな手法を用いて 0.1% の精度で中性子の寿命を測定することを目指している。本年度は既取得データの解析を集中的に行なった。詳細なデータ解析の結果、本実験による初の物理結果を公表した。またデータ解析より、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た。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行った。本データから得られた中性子寿命は通常ガス圧での結果と誤差の範囲で無矛盾であることを示した。また、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た。新規実験では TPC 検出器の電極位置を変更する必要があるため、検出器試作機の作製を行った。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、現在は実機の作製を開始している。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った。次年度はソレノイド磁石と検出器実

機の統合試験を行う予定である。

- **複合核状態における時間反転対称性の破れの探索実験**（吉岡瑞樹、高田秀佐、古賀淳）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のデータ取得およびデータ解析を行った。その結果、スズの共鳴分布に角度依存性があることを世界で初めて確認した。今後はより高統計のデータを取得したのち、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に着手した。本年度は結晶の作製および次年度のビーム試験に向けた各種調査を行った。
- **低エネルギー中性子の小角散乱を用いた未知相互作用の探索実験**（吉岡瑞樹）我々は低エネルギーの中性子と希ガス原子の散乱によりナノメートルスケールで未知の相互作用を探索する実験計画を立案している。実験装置は全て J-PARC/MLF/BL05 に設置済みであり、本年度は昨年度に引き続きデータ取得を行い、取得データの解析を行った。解析の結果、ナノメートル以下で世界最高感度を達成し、投稿論文として公表した。今後はより小さい運動量移行領域でのデータ取得が可能となるよう実験装置の改良を行う。また、系統誤差の研究のため、ガス種を変えたデータ取得を行う。

## 発表論文

《原著論文》

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of supersymmetric states in scenarios with compressed mass spectra at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **97**, 052010 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a  $W$  or  $Z$  boson and a Higgs boson in final states with leptons and  $b$ -jets in  $36 \text{ fb}^{-1}$  of

$\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector”, JHEP **1803**, 174 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson coupling properties in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1803**, 095 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross-sections of a single top quark produced in association with a  $W$  boson at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with ATLAS”, Eur. Phys. J. C **78**, 186 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector”, JHEP **1801**, 126 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with bottom or top quarks in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **78**, 18 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly charged Higgs boson production in multi-lepton final states with the ATLAS detector using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, Eur. Phys. J. C **78**, 199 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections of isolated-photon plus heavy-flavour jet production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **776**, 295 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for  $WW/WZ$  resonance production in  $\ell\nu qq$  final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1803**, 042 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for pair-produced resonances in four-jet final states at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **78**, 250 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for B-L R -parity-violating top

squarks in  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp collisions with the ATLAS experiment”, Phys. Rev. D **97**, 032003 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D **97**, 052012 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into  $WW$  in the  $e\nu\mu\nu$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **78**, 24 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in high-mass final states with a photon and a jet from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **78**, 102 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “ $ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$  cross-section measurements 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], “Search for additional heavy neutral Higgs and gauge bosons in the ditau final state produced in  $36 \text{ fb}^{-1}$  of pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1801**, 055 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Direct top-quark decay width measurement in the  $t\bar{t}$  lepton+jets channel at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C **78**, 129 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $\tau$  polarisation in  $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$  decays in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **78**, 163 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of quarkonium production in proton-lead and proton-proton collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **78**, 171 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of longitudinal flow decorrelations in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$  and 5.02 TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **78**, 142 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for heavy  $ZZ$  and  $ZW$  resonances in the  $\ell\ell qq$  and  $\nu\nu qq$  final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* **1803**, 009 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates produced in association with a  $Z$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* **776** 318 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the direct production of charginos and neutralinos in final states with tau leptons in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **78**, 154 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for diboson resonances with boson-tagged jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* **777**, 91 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the exclusive  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  process in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* **777**, 303 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of long-range multiparticle azimuthal correlations with the subevent cumulant method in  $pp$  and  $p + Pb$  collisions with the ATLAS detector at the CERN Large Hadron Collider”, *Phys. Rev. C* **97**, 024904 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $W$ -boson mass in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **78**, 110 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section for producing a  $W$  boson in association with a single top quark in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with ATLAS”, *JHEP* **1801**, 063 (2018).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Drell-Yan triple-differential cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV”, JHEP **1712**, 059 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section for electroweak production of dijets in association with a Z boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **775**, 206 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of lepton differential distributions and the top quark mass in  $t\bar{t}$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 804 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of ordered hadron chains with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D **96**, 092008 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the jets plus missing transverse momentum final state at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1712**, 085 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with  $b$ -tagged jets and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1711**, 195 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D **96**, 112010 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the  $H \rightarrow b\bar{b}$  decay with the ATLAS detector”, JHEP **1712**, 024 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in final states with two leptons in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 898 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of inclusive and differential

cross sections in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1710**, 132 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with large jet multiplicities and missing transverse momentum using large-radius jets and flavour-tagging at ATLAS in 13 TeV  $pp$  collisions”, JHEP **1712**, 034 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the lepton+jets channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector”, JHEP **1711**, 191 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for the  $Z\gamma$  decay mode of the Higgs boson and for new high-mass resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1710**, 112 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a  $W$  or  $Z$  boson and a Higgs boson in the  $q\bar{q}^{(\prime)}b\bar{b}$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **774**, 494 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Heavy Higgs Bosons  $A/H$  Decaying to a Top Quark Pair in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. **119**, 191803 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of  $WW\gamma$  and  $WZ\gamma$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV and search for anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C **77**, 646 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Analysis of the  $Wtb$  vertex from the measurement of triple-differential angular decay rates of single top quarks produced in the  $t$ -channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1712**, 017 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in high-mass diphoton final states using  $37 \text{ fb}^{-1}$  of proton–proton collisions collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **775**, 105 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying to high- $p_T$  W bosons and b quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1710**, 141 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of detector-corrected observables sensitive to the anomalous production of events with jets and large missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 765 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC”, JINST **12**, P12009 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the strong coupling constant  $\alpha_s$  from transverse energy-energy correlations in multijet events at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 872 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1710**, 182 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top quark decays  $t \rightarrow qH$ , with  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions using the ATLAS detector”, JHEP **1710**, 129 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Dark Matter Produced in Association with a Higgs Boson Decaying to  $b\bar{b}$  using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. **119**, 181804 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet  $p_T$  correlations in Pb+Pb and  $pp$  collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **774**, 379 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in events with a Higgs or  $Z$  boson, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV

*pp* collisions with the ATLAS detector”, JHEP **08**, 006 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to two photons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D **96**, 112040 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with two same-sign or three leptons and jets using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 13$  TeV *pp* collision data with the ATLAS detector”, JHEP **1709**, 084 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive jet cross-sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1709**, 020 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}\gamma$  production cross section in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1711**, 086 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $WW/WZ \rightarrow \ell\nu qq'$  production with the hadronically decaying boson reconstructed as one or two jets in *pp* collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with ATLAS, and constraints on anomalous gauge couplings”, Eur. Phys. J. C **77**, 563 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of vector-like top quarks in events with one lepton, jets, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV *pp* collisions with the ATLAS detector”, JHEP **1708**, 052 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the dimuon decay of the Higgs boson in *pp* collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. **119**, 051802 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of multi-particle azimuthal correlations in *pp*, *p*+Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 428 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $b$ -hadron pair production with the ATLAS detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV”, JHEP **1711**, 062 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification and rejection of pile-up jets at high pseudorapidity with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 580 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of  $Z\gamma$  production in association with a high-mass dijet system in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1707**, 107 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in a lepton plus high jet multiplicity final state with the ATLAS experiment using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collision data”, JHEP **1709**, 088 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Track Reconstruction Algorithms in Dense Environments in LHC Run 2”, Eur. Phys. J. C **77**, 673 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter at  $\sqrt{s} = 13$  TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 393 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of integrated and differential cross sections for isolated photon pair production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D **95**, 112005 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Femtoscopy with identified charged pions in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with ATLAS”, Phys. Rev. C **96**, 064908 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $k_t$  splitting scales in  $Z \rightarrow \ell\ell$  events in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP **1708**, 026 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet reconstruction and performance using particle flow with the ATLAS Detector”, *Eur. Phys. J. C* **77**, 466 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **96**, 072002 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in dijet events using  $37 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **96**, 052004 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of electroweak  $Wjj$  production and constraints on anomalous gauge couplings with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **77**, 474 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross section in the  $\tau + \text{jets}$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **95**, 072003 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the  $W$   $tb$  vertex structure in t-channel single-top-quark production and decay in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* **1704**, 124 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Top-quark mass measurement in the all-hadronic  $t\bar{t}$  decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* **1709**, 118 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker in Run 1 of the LHC: tracker properties”, *JINST* **12**, P05002 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross section of a  $Z$  boson in association with jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **77**, 361 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $W^+W^-$  production

cross section in  $pp$  collisions at a centre-of-mass energy of  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment”, Phys. Lett. B **773**, 354 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fiducial, total and differential cross-section measurements of  $t$ -channel single top-quark production in  $pp$  collisions at 8 TeV using data collected by the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 531 (2017).

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

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet fragmentation in Pb+Pb and  $pp$  collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector at the LHC”, Eur. Phys. J. C **77**, 379 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross section for inclusive isolated-photon production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **770**, 473 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the  $e\mu$  channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 292 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Precision measurement and interpretation of inclusive  $W^+$ ,  $W^-$  and  $Z/\gamma^*$  production cross sections with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C **77**, 367 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the W boson polarisation in  $t\bar{t}$  events from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in the lepton + jets channel with ATLAS”, Eur. Phys. J. C **77**, 264 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction of primary vertices at the ATLAS experiment in Run 1 proton-proton collisions at the LHC”, Eur. Phys. J. C **77**, 332 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Trigger System in 2015”, *Eur. Phys. J. C* **77**, 317 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “High- $E_T$  isolated-photon plus jets production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, *Nucl. Phys. B* **918**, 257 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $W^\pm W^\pm$  vector-boson scattering and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* **96**, 012007 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity produced in top-quark events with an electron, a muon and two  $b$ -tagged jets in the final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **77**, 220 (2017).

G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of algorithms that reconstruct missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions in the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **77**, 241 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of long-range azimuthal anisotropies and associated Fourier coefficients for  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 5.02$  and 13 TeV and  $p$ +Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. C* **96**, 024908 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive cross-sections of single top-quark and top-antiquark  $t$ -channel production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *JHEP* **1704**, 086 (2017).

M. Aaboud *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of forward-backward multiplicity correlations in lead-lead, proton-lead, and proton-proton collisions with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. C* **95**, 064914 (2017).

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

H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, “Extending the LHC Reach for New Physics with Sub-Millimeter Displaced Vertices”, *Phys. Lett. B* **771**, 568 (2017).

V. Balagura, S. Bilokin, J. Bonis, V. Boudry, J.-C. Brient, S. Callier, T. Cheng, R. Cornat, C. De La Taille, T.H. Doan, M. Frotin, F. Gastaldi, H. Hirai, S. Jain, Sh. Jain, D. Lacour, L. Lavergne, A. Lleres, F. Magniette, L. Mastrolorenzo, J. Nanni, R. Poeschl, A. Pozdnyakov, A. Psallidas, M. Ruan, M. Rubio-Roy, N. Seguin-Moreau, K. Shpak, T. Suehara, A. Thiebault, J. Wright, D. Yu, “SiW ECAL for future  $e^+e^-$  collider”, 2017 JINST **12** C07013.

J. Repond *et al.* [CALICE Collaboration], “Construction and Response of a Highly Granular Scintillator-based Electromagnetic Calorimeter”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **887** (2018) 150-168.

T. Suehara, I. Sekiya, S. Callier, V. Balagura, V. Boudry, J.-C. Brient, C. de la Taille, K. Kawagoe, A. Irles, F. Magniette, J. Nanni, R. Poeschl, T. Yoshioka, ILD SiW-ECAL group, “Performance study of SKIROC2/A ASIC for ILD Si-W ECAL”, 2018 JINST **13** C03015.

Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Keisuke Fujii, Akiya Miyamoto, “Study of fermion pair productions at the ILC with center-of-mass energy of 250 GeV”, *Proc. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2017)*, arXiv:1801.04671.

川越清以、“特集:「素粒子物理の現状と展望」- 標準理論を超えた次なるステージへ - 「エネルギーフロンティア実験とこれからの素粒子像」”, *数理科学* 2018年1月号 No.655.

K. Oishi on behalf of the COMET collaboration StrECAL group, “Development of Electromagnetic Calorimeter Using LYSO Crystals for the COMET Experiment at J-PARC”, *Proceedings of Science, EPS-HEP2017*, 800 (2018).

K. Ueno, P. Evtoukhovitch, Y. Fujii, E. Hamada, S. Mihara, A. Moiseenko, H. Nishiguchi, K. Oishi, T. Saito, A. Samartsev, J. Tojo, Z. Tsamalaidze, N. Tsverava, “Development of a thin-wall straw-tube tracker for COMET experiment”, *Proceedings of Science*,

EPS-HEP2017, 524 (2018).

C. C. Haddock, T. Yoshioka *et al.*, "A Search for deviations from the inverse square law of gravity at nm range using a pulsed neutron beam", Phys. Rev. D **97**, 062002 (2018).

T. Okudaira, J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, "Angular Distribution of  $\gamma$ -rays from Neutron-Induced Compound States of  $^{140}\text{La}$ ", Phys. Rev. C **97**, 034622 (2018).

S. Takada, J. Koga, T. Yoshioka *et al.*, "Characterization of Germanium Detectors for the Measurement of the Angular Distribution of Prompt gamma-rays at the ANNRI in the MLF of the J-PARC", Journal of Instrumentation 13(02) (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 Conference Proceedings (2017).

N. Sumi, T. Yoshioka *et al.*, "Precise Neutron Lifetime Measurement with a Solenoidal Coil", JPS Conference Proceedings (2017).

H. Shimizu, J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, "Discrete Symmetry Tests In Neutron-induced Compound States", Proceedings of Science, Volume 281, (2017).

N. Oi, T. Yoshioka *et al.*, "Measurement Of Neutron Scattering With Noble Gas To Search For A Short-range Unknown Force", Proceedings of Science, Volume 281, (2017).

T. Okudaira, J. Koga, S. Takada, T. Yoshioka *et al.*, "Measurement Of Angular Correlations In The  $(N, \gamma)$  Reaction For T Violation Search", Proceedings of Science, Volume 281, (2017).

N. Nagakura, N. Sumi, T. Tomita, T. Yoshioka *et al.*, "Precise Neutron Lifetime Experiment Using Pulsed Neutron Beams At J-PARC", Proceedings of Science, Volume 281, (2017).

《Proceedings》

講演

《海外での講演》

Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector :

Hidetoshi Otono

European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP) 2017, July 2017, Venice, Italy

The ILC project and its status :

K. Kawagoe

An invited seminar during ILD Software and Technical Meeting, April 2017, IPNL Lyon, France

Study of fermion pair production at the ILC at 250 GeV :

Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Keisuke Fujii, Akiya Miyamoto, Jacqueline Yan

2017 Americas Workshop on Linear Colliders (AWLC17), June 2017, SLAC, Menlo Park, CA, United States

Performance study of SKIROC2 and SKIROC2A with Power pulsing :

I. Sekiya, K. Kawagoe, T. Yoshioka, T. Suehara, H. Hirai, H. Yamashiro, C. Taille, S. Callier, ILD ECAL group

CALICE Collaboration meeting, September 2017, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Low Gain Avalanche Detector for ILD ECAL :

Ryosuke Mori, Hiroaki Yamashiro, Takumi Ito, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Kiyotomo Kawagoe

CALICE Collaboration meeting, September 2017, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

SK2 Pedestal and retrigger studies :

Yu Miura *et al.*

CALICE Collaboration meeting, September 2017, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Plan of production of SiW-ECAL slabs in Japan :

Taikan Suehara

CALICE Collaboration meeting, September 2017, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Performance study of SKIROC2/A ASIC for ILD Si-W ECAL :

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

Calorimetry for the High Energy Frontier (CHEF) 2017, October 2017, IPNL, Lyon, France

Detector Development :

K. Kawagoe

ICFA seminar, November 2017, Ottawa, Canada

Activities in Kyushu for SiW-ECAL :

T. Suehara, I. Sekiya, H. Yamashiro, Y. Miura, R. Mori, T. Yoshioka, K. Kawagoe

International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2017), October 2017, Strasbourg, France

Study of fermion pair productions at the ILC with center of mass energy of 250 GeV :

Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Keisuke Fujii, Akiya Miyamoto

International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2017), October 2017, Strasbourg, France

New SLAB and SMB production :

Taikan Suehara, Yu Miura

CALICE Collaboration meeting, March 2018, JGU Mainz, Mainz, Germany

Performance study of SKIROC2 & 2A :

Izumi Sekiya, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara

CALICE Collaboration meeting, March 2018, JGU Mainz, Mainz, Germany

Semi-automatic measurement of 36 SKIROC2A chips :

I. Sekiya, T. Suehara, Y. Miura, R. Mori, K. Kawagoe, S. Callier

CALICE Collaboration meeting, March 2018, JGU Mainz, Mainz, Germany

Status of COMET  $\sim \mu$ - $e$  Conversion Search in J-PARC  $\sim$  :

Yuki Nakai on behalf of the COMET Collaboration

The 2nd Flavour Physics Conference, August 2017, Guy Nhon, Vietnam.

Development of Electromagnetic Calorimeter Using LYSO Crystals for the COMET Experiment at J-PARC :

Kou Oishi on behalf of the COMET Collaboration

2017 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2017), July 2017, Venice, Italy

The COMET Experiment to Search for  $\mu$ - $e$  Conversion at J-PARC :

Kou Oishi on behalf of the COMET Collaboration

The 26th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2017), June 2017, California, US

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

Junji Tojo for the J-PARC E34 Collaboration

The 26th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2017), June 2017, California, US

Silicon Tracker for the J-PARC muon  $g$ -2/EDM experiment :

Taikan Suehara for the J-PARC  $g$ -2/EDM (E34) collaboration

International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP2017), May 2017, Beijing, China

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

Takashi Yamanaka on behalf of the J-PARC E34 Collaboration

The 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA), January 2018, Nagoya, Japan

Epithermal-neutron spin filter with DNP using photo-excited triplet electron for searching T-violation in compound nucleus :

Shusuke Takada

The 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets and Polarimetry, October 2017, Daejeon, Korea

Precise neutron lifetime measurement with solenoid coil :

Naoyuki Sumi

International Conference on Neutron Optics (NOP2017), July 2017, Nara, Japan

Neutron spin polarizer with dynamic nuclear polarization using photo-excited triplet states of electron spin for T-violation search in compound nucleus :

Shusuke Takada

International Conference on Neutron Optics (NOP2017), July 2017, Nara, Japan

Measurement of  $(n, \gamma)$  reaction of  $^{117}\text{Sn}$  for T violation search by using compound nucleus :

Jun Koga

International Conference on Neutron Optics (NOP2017), July 2017, Nara, Japan

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

Tatsuhiko Tomita

Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, July 2017, Osaka, Japan

Precise neutron lifetime measurement with a solenoid magnet :

Naoyuki Sumi

Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, July 2017, Osaka, Japan

Neutron spin polarizer with dynamic nuclear polarization using photo-excited triplet states of electron :

Shusuke Takada

Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, July 2017, Osaka, Japan

T violation search by using compound nucleus reaction :

Jun Koga

Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, July 2017, Osaka, Japan

《国内での講演》

超周辺衝突での光子・光子散乱

織田 勸

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるビーム衝突点から離れて崩壊する新粒子の探索

音野 瑛俊

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組み立て  
工程の開発

小林 大

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの探索

調翔平

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器組み立てに  
おける接着剤と封止材の塗布手法の開発

山口 尚輝

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組み立て  
に用いる部材の放射線耐性の評価

藤野 主一

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた新型シリコンピクセル検出器 組み立てにおける接  
着剤塗布方法の開発

山口尚輝

第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月, 鹿児島大学

HL-LHC のための ATLAS 実験新型ピクセル検出器組立に用いる部材の評価

藤野 主一

第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月, 鹿児島大学

Overview of the LLP searches in LHC experiments

Hidetoshi Otono

Workshop on Long-lived Particles Searches in Collider Experiment, 2017 年 9 月、東京工業大学

Displaced vertex searches in LHC experiments

Shohei Shirabe

Workshop on Long-lived Particles Searches in Collider Experiment, 2017 年 9 月、東京工業大学

ATLAS 実験運転状況と 13TeV データを使った SUSY 探索

音野 瑛俊

日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月、宇都宮大学

LHC-ATLAS 実験における長寿命中性レプトンの探索に向けた背景事象の研究調翔平

日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月、宇都宮大学

LHC-ATLAS 実験アップグレードに向けた新型シリコンピクセル検出器の組立手法の開発

山口 尚輝

日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月、宇都宮大学

Power pulsing を用いた ILC 電磁カロリメーターの読み出し ASIC の性能評価

関谷 泉

日本物理学会 2017 年秋期大会、2017 年 9 月、宇都宮大学

ILC 測定器概要

川越 清以

日本応用物理学会秋季講演会シンポジウム「国際リニアコライダー計画とその技術」、

2017年9月、福岡国際会議場

ILC シリコン電磁カロリメータのための評価基板を用いた ASIC 検査システムの開発  
関谷泉

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

SKIROC2 評価基板を用いたセンサー性能評価システムの開発  
末原大幹

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

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  
三浦裕

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

COMET 実験電磁カロリメータに用いる LYSO 結晶の性能評価  
斉藤貴士

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

COMET 実験ストロー飛跡検出器用読み出し回路の性能評価  
橋本奨平

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

COMET 実験で用いるトリガーフロントエンド回路の性能評価  
宮崎祐太

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学

COMET 実験ストロー飛跡検出器用読み出し回路の性能評価  
橋本奨平

第 123 回日本物理学会九州支部例会、2017 年 12 月、鹿児島大学

COMET 実験用トリガーフロントエンド回路の性能評価  
宮崎祐太

第 123 回日本物理学会九州支部例会、2017 年 12 月、鹿児島大学

COMET 実験のための飛跡検出器・電磁カロリメータ試作機の電子ビームを用いた性

能評価

大石航

日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学

COMET 実験トリガー検出器の性能評価

中居勇樹

日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学

COMET 実験ストロー飛跡検出器用読み出し回路の性能評価

橋本奨平

日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学

COMET 実験用トリガーフロントエンド回路の性能評価

宮崎祐太

日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験：シリコンストリップ検出器の実機製作に向けた開発状況

山中隆志

日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験：シリコンストリップセンサーの性能評価および品質保証システムの開発

伊藤拓実

日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学

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

堤裕樹

日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学

J-PARC muon g-2/EDM 実験：シリコンストリップセンサーの性能評価および品質保証システムの開発

伊藤拓実

日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学

J-PARC muon g-2/EDM : SliT2016TEG の性能評価

堤裕樹

日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学

宇宙線ミューオンを用いた火山の透視システムの開発

中居勇樹

日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学

宇宙線ミューオンを用いた火山モニターシステムの開発

中居勇樹

第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年 12 月, 鹿児島大学

J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験:低ガス圧運転での取得データの解析

富田 龍彦

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学野田キャンパス

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

角直幸

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学野田キャンパス

複合核共鳴における時間反転対称性の破れ探索実験のための Triplet-DNP を用いた中性子スピフィルターの開発

高田秀佐

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学野田キャンパス

複合核共鳴の時間反転対称性の破れ -  $^{117}\text{Sn}$  の  $(n, \gamma)$  反応の角分布測定 -

古賀淳

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学野田キャンパス

ソレノイド磁場を用いた中性子寿命測定実験 :漏れ磁場に関する研究

上原英晃

日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月、東京理科大学野田キャンパス

$^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$  反応における即発ガンマ線角分布

古賀淳

量子ビームサイエンスフェスタ、2018年3月、茨城県立県民文化センター

ソレノイド磁場を用いた中性子寿命の精密測定実験 プロトタイプ検出器を用いた性能試験

角直幸

第123回日本物理学会九州支部例会、2017年12月、鹿児島大学郡元キャンパス

ソレノイド磁場を用いた中性子寿命の精密測定実験 漏れ出し磁場に関するシミュレーション

上原英晃

第123回日本物理学会九州支部例会、2017年12月、鹿児島大学郡元キャンパス

J-PARC/BL05における中性子寿命測定実験:新アンプの評価と低ガス圧試験

富田 龍彦

日本物理学会 2017年 秋季大会、2017年9月、宇都宮大学峰キャンパス

ソレノイド磁場を用いた中性子寿命の精密測定実験 プロトタイプ検出器を用いた性能試験

角直幸

日本物理学会 2017年 秋季大会、2017年9月、宇都宮大学峰キャンパス

複合核共鳴の時間反転対称性の破れ - 偏極陽子を用いた中性子スピン偏極装置の開発 -  
高田秀佐

日本物理学会 2017年 秋季大会、2017年9月、宇都宮大学峰キャンパス

複合核共鳴の時間反転対称性の破れ -  $^{117}\text{Sn}$  及び  $^{115}\text{In}$  の  $(n, \gamma)$  反応測定の解析の現状 -

古賀淳

日本物理学会 2017年 秋季大会、2017年9月、宇都宮大学峰キャンパス

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤研究(A)  
荷電レプトンフレーバー非保存探索実験の革新的検出器開発による新展開  
研究代表者 川越清以

文部省科学研究費補助金、特別推進研究  
最高強度ミュオンビームによるミュオン・レプトンフレーバー非保存探索の新展開  
研究分担者 東城順治 (研究代表者 大阪大学 久野良孝)

文部省科学研究費補助金、基盤研究(A)  
LHC 実験の新局面における素粒子標準模型を超える物理の研究  
研究代表者 東城順治

文部省科学研究費補助金、新学術領域研究  
ヒッグス粒子で探る真空と世代構造  
研究分担者 東城順治 (研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 花垣和則)

文部科学省研究費補助金、基盤研究(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(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(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、若手研究(B)  
ヒッグス粒子の性質測定による新物理の探索  
研究代表者 織田勸

文部科学省研究費補助金、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：QR プログラム  
中性子寿命高精度測定実験のための新型ガス検出器の開発  
研究代表 吉岡瑞樹

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 織田勸

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 音野瑛俊

#### 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)

富田龍彦 (DC1) : J-PARC でのバンチ化中性子と大口径 TPC を用いた世界最高精度の中性子寿命測定

大石航 (DC2) : 最高強度パルスミューオンビームで切り開く荷電レプトンフレーバー非保存の探索

#### 学部 4 年生卒業研究

出口 遊斗、佐田智也、彌吉 拓哉：ミューオントモグラフィ

上杉 悠人、川島 僚介、永野 智也：オルソポジトロニウムの寿命測定

## 修士論文

- 伊藤拓実：(指導教員、吉岡瑞樹)：J-PARC ミューオン  $g-2$ /EDM 実験に用いるシリコンストリップセンサーの性能評価および品質保証システムの開発
- 古賀淳：(指導教員、吉岡瑞樹)： $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$  反応における中性子共鳴分布のガンマ線放出角度依存性の研究
- 斉藤貴士：(指導教員、東城順治)：COMET 実験の電磁カロリメータに用いるLYSO結晶の性能評価
- 関谷泉：(指導教員、川越清以)：ILCシリコン電磁カロリメータのためのASICの性能評価および大量検査システムの開発
- 山口尚輝：(指導教員、東城順治)：ATLAS 実験用新型ピクセル検出器の組立手法の研究
- 山城大知：(指導教員、川越清以)：重心系エネルギー 250 GeV の国際リニアコライダーにおける 2-fermion 終状態の精密測定による新物理探索可能性の研究

## 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：大型シミュレーション計画推進委員会委員  
高エネルギー加速器研究機構：日米科学技術協力事業高エネルギー物理研究計画委員会委員  
高エネルギー加速器研究機構：素粒子原子核研究所運営会議委員  
高エネルギー加速器研究機構：加速器・共通基盤研究施設運営会議委員  
東京大学素粒子物理国際研究センター：研究協議会委員  
Asia-Europe-Pacific School of High Energy Physics：国際組織委員会委員  
ILD detector group：Deputy Spokesperson

- 東城

日本物理学会：素粒子実験領域、領域運営委員

日本物理学会：九州支部・支部委員

- 吉岡

高エネルギー物理学研究者会議：高エネルギーニュース編集委員

高エネルギー物理学研究者会議：将来計画検討委員

# 物性理論研究室

## 研究室構成員

福田順一 教授

松井淳 講師

《 大学院 博士課程 》

野口慎平

《 学部 卒業研究生 》

上戸美乃 西山大樹

## 担当授業

福田順一: 基幹物理学 IA, 統計力学 I・同演習 (, 最先端物理学, 物理学ゼミナール)

松井淳: 量子統計力学, 基幹物理学 IB 演習, 物理数学

## 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形成 (福田順一)

液晶は、様々な自己組織的秩序構造を示すソフトマターの典型例の1つである。本研究では、空間反転対称性を有しないキラルな液晶を平行平板に挟まれた薄い空間に閉じ込めた際に形成される秩序構造を、2階のテンソルを秩序変数とする連続体理論に基づく数値計算により調べた。その結果、温度と平行平板間の距離に依存した、バルクの構造としては見ることでできない様々な秩序構造が生じることが明らかになった。その中には、様々な凝縮系で現れる、スカーミオンという渦状の構造からなるヘキサゴナルな格子も含まれる。また、それらの秩序構造の光学的性質についても、光の電場磁場に関する Maxwell 方程式を直接解くことで調べ、実験で得られた光学顕微鏡像をほぼ完璧に理論的に再現することに成功した。また光の透過率、反射率に関するスペクトルの計算も行った。これらの成果は、Nature Physics, Optics Express に発表し、前者については九大からプレス発表も行った。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。

### 液晶配向欠陥の微細構造の同定 (福田順一)

ネマチック液晶を2枚のガラス平板に挟むと様々な位相欠陥が生じるが、特にチャー

ジが +1 の欠陥については、自発的なキラル対称性の破れ、およびガラスに垂直な方向に関する対称性の破れから、4通りの微細構造が生じうる。それらの微細構造を、蛍光顕微鏡による直接観察と、フェルマーの原理による光路の理論計算により同定することに成功した。この成果は Scientific Report に発表した。本研究は、大園拓哉博士（産業技術総合研究所）らとの共同研究である。

#### 過冷却液体の異常拡散 (松井淳)

過冷却液体で顕著となる異常拡散について、分子動力学シミュレーションで求めたジャンプの待ち時間分布と関係づけて解析した。

#### 自己平均性の破れた系の線形応答 (野口慎平)

Polya の壺を用いて、非自己平均的なふるまいと摂動との関係を調べた。線形の Polya の壺モデルだけでなく、その拡張である非線形な Polya 壺においても応答関数の挙動を考察し、ある程度の一般論を得た。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

“Orientation of liquid crystalline blue phases on unidirectionally orienting surfaces”

M. Takahashi, T. Ohkawa, H. Yoshida, J. Fukuda, H. Kikuchi and M. Ozaki,  
J. Phys. D: Appl. Phys. **51** (2018) 104003.

“Reflection spectra and near-field images of a liquid crystalline half-Skyrmion lattice”

J. Fukuda and S. Žumer,  
Opt. Exp. **26** (2018) 1174–1184.

“Development of coarse-grained liquid-crystal polymer model with efficient electrostatic interaction: Toward molecular dynamics simulations of electroactive materials”

K. Tagashira, K. Z. Takahashi, J. Fukuda and T. Aoyagi,  
Materials **11** (2018) 83.

“Uncovering different states of topological defects in schlieren textures of a nematic liquid crystal”

T. Ohzono\*, K. Katoh, C. Wang, A. Fukazawa, S. Yamaguchi and J. Fukuda\*,  
Sci. Rep. **7** (2017) 16814.

“Spontaneous formation and dynamics of half-Skyrmions in a chiral liquid-crystal film”

A. Nych\*, J. Fukuda\*, U. Ognysta, S. Žumer and I. Mušević,  
Nature Phys. **13** (2017) 1215–1220.

《Proceedings》

“Numerical calculation of Kossel diagrams of cholesteric blue phases”

J. Fukuda, Y. Okumura and H. Kikuchi  
Proceedings of SPIE **10555** (2018) 105550A.

## 講演

《海外での講演》

“Numerical calculation of Kossel diagrams of cholesteric blue phases”

J. Fukuda, Y. Okumura and H. Kikuchi  
SPIE Photonics West “Emerging Liquid Crystal Technologies XIII”  
(2018年1月19日, サンフランシスコ (アメリカ), *Invited talk*)

“Liquid crystalline Skyrmions and their direct optical observation”

J. Fukuda  
2017 International Workshop of A3 Foresight Program on Soft Matter  
(2017年12月20日, Chungnam National University (大田、韓国), 依頼講演)

“Localization of low-molecular-weight molecules at the defect of a liquid crystal”

T. Ohzono, K. Katoh and J. Fukuda  
The 10th Liquid Matter Conference (Liquids2017) (2017年7月17,18日, リュブリャナ, スロベニア)

《国内での講演》

「液晶スカーミオンの配向構造とその直接観察」

福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Žumer, I. Mušević  
日本物理学会第73回年次大会 (2018年3月22日, 東京理科大学野田キャンパス)

「カイラル液晶中の位相欠陥とスカーミオン」

福田順一

近畿大学大学院総合理工学研究科 物理学分野におけるセミナー (2018年2月21日、近畿大学、**依頼講演**)

“Skyrmions in a chiral liquid crystal film and their optical observation”

J. Fukuda

The 7th Toyota Riken International Workshop on Chirality in Soft Matter  
(2017年11月25日、名古屋)

「液晶中に生じるスカーミオンとその直接観察」

福田順一

量子と古典の物理と幾何 (2017年11月18日、九州大学箱崎キャンパス)

「キラル液晶セルの特異な秩序構造とその光学顕微鏡像」

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

第7回ソフトマター研究会 (2017年10月24日、京都大学)

「液晶スカーミオンの光学顕微鏡像の数値計算」

福田順一

第7回計算統計物理学研究会 (2017年9月25,26日、仙台)

「コレステリックブルー相の Kossel diagram の数値計算」

福田順一, 奥村泰志, 菊池裕嗣

2017年日本液晶学会討論会 (2017年9月15日、弘前大学)

「曲がった針のパーコレーション」

時松幹, 松井淳

日本物理学会 第72回年次大会 (2018年3月、東京理科大学)

## 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)

《 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

上戸美乃:(指導教員、松井淳):円環状連続体剛体分子の近似モデルとそのポテンシャル

西山大樹:(指導教員:福田順一):液晶のダイナミクスを目指した連続体シミュレーション

博士論文

井上雅郎:(指導教員:吉森明) ”Effects of Interactions between Particles on Nonequilibrium Steady States in Colloidal Dispersion Systems”

野口慎平:(指導教員:福田順一, 吉森明, 小田垣孝) ”Study of non-self-averaging on Polya's urn model using a perturbation analysis”

学外での学会活動

福田順一:

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 虹彩賞選考委員

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:

プレス発表 「液晶は渦を巻く—液晶の新たな秩序構造形成を理論、実験により初めて実証—」 (2017年8月30日)

Editorial Board Member of Scientific Reports

Editorial Board Member of Liquid Crystal Reviews

体験入学における講演「柔らかいものの物理」(2018年3月)

松井淳:

体験入学での実験演習「エントロピー」を担当 (2018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

坂上 貴洋 助教

《 大学院 修士課程 》

佐藤 俊之 相場 信孝 佐々木 雅人 金子 甲二郎

守屋 俊志

《 学部 卒業研究生 》

劉永民 飯田昌澄 上戸美乃 西山大樹

広瀬絵里加 村上大周

《 訪問研究者 》

早瀬 友美乃

## 担当授業

中西： 基幹物理学 II、統計力学補修、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

坂上： 基幹物理学 IA 演習、物理学基礎演習

## 研究・教育目標と成果

1. 環状高分子鎖濃厚溶液のダイナミクス (坂上) : 環状高分子鎖では、結び目、絡み目についてのトポロジカルな拘束が常に問題となる。互いにリンクしていない環状高分子の濃厚系は最も基礎的な系であるが現在でも多くの未解明問題があり、最近では核内の染色体構造との関連も指摘され注目を浴びている。この問題において、トポロジカルな拘束により生じるエントロピー的な反発力をトポロジカル体積という概念を用いて記述することを提案している (T.Sakaue, Phys. Rev. Lett. 106, 167802, 2011)。

この概念を基に、環状鎖濃厚溶液で観測される異常なダイナミクスを現象論的に記述することを試みた。その結果、運動における協同性の重要性が示唆

され、現象論的記述に協同効果を取り込むことにより、文献に報告されている実験、シミュレーションの結果を系統的かつ定量的に記述出来ることを示した。

2. 遷移経路時間分布における記憶効果 (坂上): 化学反応や生体高分子の形態転移のようなエネルギー障壁を越える反応過程には、二つの特徴的な時間がある。一つは障壁の高さに指数関数的に依存する平均待ち時間 (クラマース時間) であり、もう一つは正に反応が起こるときに障壁を通り越すのにかかる時間 (遷移経路時間) である。近年一分子レベルでの実験における時間分解能の向上により生体高分子の反応過程の詳細が見えるようになるにつれ、理論的にも遷移経路時間についての関心が高まっている。本研究では、単純な一次元の双安定系における確率過程を考え、運動における記憶効果が遷移経路時間にたいしてどのような影響を与えるかを考察した。主な結果として、べき的な記憶効果がある場合について、平均遷移経路時間のべき指数依存性を求めた。(E. Carlon [KU Leuven], C.Vanderzande[Hasselt] との共同研究)
3. 1次元量子スピン系の Ashkin-Teller 多重臨界点と universality (守屋、野村): Ashkin-Teller モデルの多重臨界点付近の臨界点を  $y$  軸ひねり境界条件と  $z$  軸ひねり境界条件を用いて数値計算で求めた。臨界点上ではこのモデルが 2D Ising の universality に属することを数値計算で確認した。また 2D Ising universality との一致から本研究で計算した転移点の正当性を確認した。
4. Majumdar-Ghosh モデルは基底状態 (佐々木、野村): Majumdar-Ghosh モデルは基底状態は厳密に解け、ダイマー状態となる。我々は、次近接相互作用のある  $J_1$ - $J_2$  モデルを Majumdar-Ghosh モデルとなるパラメータ近傍でエネルギー固有値に数値計算を行った。数値計算から得られたエネルギー固有値から、エネルギーギャップサイズ依存性から関数形を仮定し、エネルギーギャップの係数と相関距離を求めた。係数は Majumdar-Ghosh モデルとなるパラメータで 0 となり、相関距離は有限で連続であった。
5. バクテリアに駆動されるコロイド分散系 (佐藤、坂上、中西): バクテリアに駆動されるコロイド分散系に、ガウス型の強度分布を持つレーザービームを照射するとコロイド粒子は強度の強いビーム中心に集まるが、強度に空間ノイズを加えるとコロイド粒子はビーム中心から離れてゆく実験結果が報告されている。本研究では、空間ノイズがコロイド粒子の運動に与える影響を理解するため、自己駆動するバクテリアとコロイド粒子の 2次元モデルを構築した。空間ノイズが無い場合とある場合でシミュレーションを行い、実験結

果を再現した. さらにバクテリア密度が低い場合は, 空間ノイズによって, コロイド粒子の拡散が大きく変化することがわかった.

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、坂上、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。バクテリアを棒状の粒子にモデル化した周期境界条件での MD シミュレーションのモデルに円形の境界を導入することによって、円の半径が大きい時に渦は生じず、小さい時に単一の渦が形成されるという実験と定性的に一致する結果が得られた。

## 発表論文

### 《原著論文》

1. Yumino Hayase, Takahiro Sakaue, and Hiizu Nakanishi, Phys. Rev. E 95, 052502 (2017). “Compressive response and helix formation of a semiflexible polymer confined in a nanochannel”
2. Yoichiro Kondo and Hiizu Nakanishi, Phys. Rev. E 95, 062207 (2017) 11 pages. “Rattleback dynamics and its reversal time of rotation”
3. Takaichi Isoyama and Kiyohide Nomura, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2017, 103I01 (2017). “Discrete symmetries and the Lieb-SchultzMattis theorem”
4. T. Sakaue, J.C. Walter, E. Carlon and C. Vanderzande, Soft Matter 13, 3174 (2017). “Non-Markovian dynamics of reaction coordinate in polymer folding”
5. T. Saito and T. Sakaue, Phys. Rev. E 95, 042143 (2017). “Complementary mode analyses between sub-and super-diffusions”

### 《Proceedings》

## 著書

## 講演

### 《海外での講演》

1. T. Sakaue, “Statistical physics of topologically constrained polymers” (Invited talk) Mini-Symposium on the Biophysics of Human Chromosome, 2018/2/5, Pohang, Korea.
2. T. Sakaue, “Topological Volume and Quasi-Glassy Dynamics in Non-concatenated Ring Polymer Melt” (Invited talk) Ring Polymers, 2017/9/27, Creta, Greece.
3. Hiizu Nakanishi, Biocomplexity seminar at NBI, University of Copenhagen, 2017/9/6. ”Dynamics of Rattleback”
4. Shin-ichiro Nagahiro and Hiizu Nakanishi, Poster presentation, KITP Conference “Non-linear mechanics and rheology of dense suspensions: nanoscale structure to macroscopic behavior” Jan 22 Jan 26, 2018, KITP USCB, “Negative pressure in shear thickening band of a dilatant fluid”

《 国内での講演 》

1. T. Sakaue, “Topological Glass in Melt of Non-Concatenated Ring Polymers” (Poster) International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 2017/11/21, Sendai, Japan.
2. T. Sakaue, “On topological glass in melt of non-concatenated ring polymers” (Invited talk) Knots and Polymers: Aspects of topological entanglement in DNA, proteins and graph-shaped polymers, 2017/8/10, Tokyo, Japan.
3. 坂上貴洋 「高分子物理から見る核内染色体の構造とダイナミクス」 理研 iTHES セミナー、2017/7/21, 理化学研究所 和光キャンパス
4. 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21 日～24 日、岩手大学上田キャンパス
  - (a) 早瀬友美乃, ○中西秀, 坂上貴洋, 青沼仁志, 高原聡, 松田朝陽, 金子俊一, “マイクロ CT を使った丸めた紙の 3 次元構造解析”
5. 第 1 2 3 回日本物理学会九州支部例会 2017 年 12 月 9 日鹿児島大学,
  - (a) 佐藤俊之, 坂上貴洋, 中西秀, バクテリアに駆動されるコロイド分散系 –外部ポテンシャルの影響–
  - (b) 金子甲二郎, 坂上貴洋, 中西秀, “円形井戸中の棒状自己駆動粒子の MD シミュレーション”
  - (c) 守屋俊志, 野村清英, “1 次元量子スピン系の Ashkin-Teller 多重臨界点と universality”
6. 金子甲二郎, 坂上貴洋, 中西秀, アクティブマター研究会 2018, 2018 年 1 月 1920 日, 京都大学福井謙一記念研究センター, “MD simulation for the emergence of single vortex by self-propelled rods in a circular well”
7. 第 73 回日本物理学会年次大会 2018 年 3 月 22 日～25 日、東京理科大学 野田キャンパス
  - (a) 早瀬友美乃, 中西秀, 坂上貴洋, 青沼仁志, 高原聡, 金子俊一, “丸めた紙の折りたたみ構造におけるサイズ依存性”

- (b) 守屋俊志, 野村清英, “1次元量子スピン系の Ashkin-Teller 多重臨界点と universality”
- (c) 野村清英, 相場信孝, “量子スピン系の帯磁率の異常”

## 外部資金

### 《 文部省科学研究費補助金 》

1. 中西秀、萌芽、「水面上の微小水滴の生成・浮遊機構とその集団運動：コーヒーの湯気の物理学」(研究代表者)
2. 中西秀、基盤(C)、「ダイラタント流体の二種類の異なる粘化メカニズムの解明」(分担者、代表者：永弘 進一郎(仙台高専))
3. 野村 清英, 基盤(C)、「パイロクロア格子が創出する新奇スピン液体相の物性研究」(連携研究者、代表：大塚 博巳(首都大学東京))
4. 坂上貴洋, 新学術領域研究(ゆらぎと構造の協奏)公募研究、「非平衡状態を舞台とした異常拡散現象の探究」(研究代表者)

### 《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

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

## 学部4年生卒業研究

1. 村上 大周「Food Web Model の自己組織化」
2. 飯田 昌澄「量子計算機を用いた RSA 暗号の解読」
3. 上戸 美乃「剛体輪」
4. 広瀬 絵里加「van der Pol 振動子の解析とその統一的理解」
5. 劉 永民「スピングラスとニューラルネットワーク」
6. 西山 大樹「液晶のダイナミクスを目指した連続体シミュレーション」

## 修士論文

1. 相場 信孝「量子スピン系における磁化率の異常性」
2. 佐々木 雅人「Majumdar-Ghosh モデル近傍でのエネルギーギャップのサイズ依存性と相関距離」

3. 佐藤 俊之「バクテリアに駆動されるコロイド分散系 —外部ポテンシャルの影響—」

#### 博士論文

近藤洋一郎”Rattleback dynamics and its reversal time of rotation”

#### 学外での学会活動

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

# 凝縮系理論

## 研究室構成員

河合伸 准教授      成清修 准教授

《 大学院 修士課程 》

坂井俊宏      井上大司      仲原英駿

《 学部 卒業研究生 》

泉原健吾

## 担当授業

身の回りの物理学 (河合伸)、物理数学 I(河合伸)、原子分子の量子力学 (河合伸)

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

## 研究・教育目標と成果

### Ge(111) 表面 c(2×8) 原子空孔拡散 (河合伸、坂井俊宏)

Ge(111) 表面 c(2×8) 表面の Ge 原子空孔拡散を第一原理計算に基づき解析した。空孔の拡散は、実際に拡散しているのは原子である。

表面上の原子拡散の反応経路とサドルポイントでのエネルギーを第一原理計算に基づき求めた。その結果をもとに、有限温度での時間分解モンテカルロシミュレーションを実施した。シミュレーション結果から、実験で報告されている拡散係数の異方性を再現できた。

### Si(111)Sn 表面の安定構造 (河合伸、井上大司)

従来、Si(111)Sn 表面の安定構造は、 $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$  構造をとる一様高構造であると言われてきた。近年、それに反する実験結果が報告されている。第一原理計算に基づき、Si(111)Sn 表面の安定構造を探索し、特徴的な非一様高構造において、一様高構造よりもエネルギー的に安定であることを発見した。

### 超流動ヘリウム第 2 音波による電気分極誘起 (河合伸)

最近、第 2 音波を発生させると超流動ヘリウム内に分極電圧が発生すると実験結果が発表された。この分極電圧の精密な測定が矢山教授グループにより実施され、第 2 音波と電気分極の時間位相差が 180 度であると解った。

河合と矢山教授グループの連携的研究を実施して、位相差が 180 度であることは、分極電圧の起源解明に重要である事を明らかにした。

### 高温超伝導体の正常相はインコヒーレントな金属である (成清修)

高温超伝導体の正常相は、インコヒーレントな金属として記述すべきであった。従来は、インコヒーレントな金属の理論が存在していなかったため、コヒーレントな金属の理論の枠組みで議論が行われてきた。この枠組みの不適切な設定が、四半世紀にわたる混乱した議論の元凶であった。適切な枠組みにスイッチすれば、問題はほぼ自動的に消滅した。この経緯の最終的な報告を行った。[その他の論文]

### 超伝導ゆらぎの熱伝導への影響を正しく評価した (成清修)

電気伝導の理論の簡単さに比べると熱伝導の理論はかなり複雑である。そのため、誤った計算結果が多く出版されてきている。数年前に、熱流に関する Ward 恒等式の正しい理解を達成したので、それを満たす正しい熱伝導の計算を実行した。[国内での講演]

### 誤差と擾乱のトレードオフ関係をエントロピーの観点から整理した (成清修、渡邊大悟)

Heisenberg に始まる誤差と擾乱のトレードオフ関係は、分散をもとに議論されてきた。しかし、ここ数年で、分散を用いた議論は不適切であったことが理解された。それ以降、エントロピーを用いた議論に移行したが、初期の条件付きエントロピーを用いた議論には不備があった。最新の提案は相対エントロピーによるものである。我々はまず、相対エントロピーが妥当な評価を与えることを確かめた。そこで得た知見から、条件付きエントロピーの議論の不備の修正の仕方を見出した。結果として、条件付きエントロピーでも妥当な評価となりうることを示した。[原著論文, 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。実は、同じ結果は、高校物理の範囲でも導くことができる。高校生にフォローできるように、その詳細を示した。

## 発表論文

### 《原著論文》

Entropic Approach to Error-Disturbance Tradeoff in Quantum Measurements:  
Daigo Watanabe, Osamu Narikiyo  
Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 86, No. 9, 095001 (2017)

### 《その他の論文》

Spectral function method for Hall conductivity of incoherent metals:  
Osamu Narikiyo  
arXiv:1708.04732

Entropic Approach to Error-Disturbance Tradeoff in Quantum Measurements:  
Daigo Watanabe, Osamu Narikiyo  
arXiv:1707.05159

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  
九州の物理教育, Vol. 4, pp. 16-19 (2018)

## 講演

### 《国内での講演》

磁場印加状態下に於ける CeCoIn<sub>5</sub> のゼーベック係数への超伝導ゆらぎの効果  
藤本行延, 成清修, 三宅和正  
日本物理学会 第72回年次大会

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  
日本物理教育学会 第5回九州支部総会・研究大会

## 学部4年生卒業研究

泉原健吾 (指導教員、成清修) : 基本群とポテンシャルの存在条件

## 修士論文

坂井俊宏：(指導教員、河合伸)：  
Ge(111)c(2×8) 表面原子空孔の拡散

## 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 教授

《 大学院 博士課程 》

大山 耕平

《 大学院 修士課程 》

後藤 政男      田邊 巧祐      鳩山 慎太郎      福田 光祐

兼田 基希      下迫 龍一

《 学部 卒業研究生 》

上野 裕之      馬場 佳吾      税田 圭悟

《 訪問研究者 》

大山 研司 教授 (茨城大学大学院理工学研究科)

## 担当授業

熱力学 (和田裕文)、磁性体物理学 (和田裕文)、物理学総論 (和田裕文)、物性物理学 I(光田暁弘)、基幹物理学 IB(光田暁弘)、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、福田光祐、下迫龍一)

Fe<sub>2</sub>P 型を持つ (Mn,Fe)<sub>2</sub>(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。今年度は極低温から室温まで測定できる熱伝導測定装置を製作しし、(Mn,Fe)<sub>2</sub>(P,Si) 化合物の熱伝導度を測定した。その結果この物質の熱伝導度は室温では最初 4 W/(m K) 程度であるが、降温時に初めてキュリー温度をまたぐと 1.5 W/(m K) まで激減することが明らかになった.. これは試料にクラックが入ったためと思われる。しかしその後は昇温降温を繰り返しても同じ温度変化を繰り返すことがわかった。これはクラックがそれ以上はいらぬことを示唆しており、材料の繰り返しの利用に問題ないことを示唆している。また熱伝導度の温度依存性はキュリー温度で小さなピークをとることも見出された。昨年開発した磁場中

DSC 装置は絶対値に信用性がなかったが、今年度は昇温方法に改良を加え、標準物質の Al の比熱曲線がほぼ文献値と一致するようになっている。来年度は  $(\text{Mn,Fe})_2(\text{P,Si})$  の磁気熱量効果を DSC によって測定していく予定である。

#### 磁場中伝導現象の研究 (和田裕文、大山耕平、田邊巧祐、鳩山慎太郎)

昨年度に引き続き磁場中ホール効果の測定を遍歴電子メタ磁性体  $\text{RCO}_2$  ( $\text{R}=\text{Er, Lu}$ ) や価数転移物質  $\text{EuRh}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{EuCo}_2\text{P}_2$  などに対して行った。遍歴電子メタ磁性体  $\text{RCO}_2$  のホール係数は正常ホール効果と異常ホール効果でうまく記述され、正常ホール係数が遍歴電子メタ磁性転移で符号を変えることが明らかになった。Eu 化合物についても特徴的な変化が得られている。

#### 価数秩序物質 $\text{YbPd}$ の価数秩序構造および磁気構造の決定 (光田暁弘、和田裕文、大山耕平)

立方晶 CsCl 型構造をもつ  $\text{YbPd}$  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。 $T = 125 \text{ K}$  で正方晶への構造相転移を、 $T = 105 \text{ K}$  で価数秩序を示す。価数秩序状態では、磁性的な  $\text{Yb}^{3+}$  と非磁性的な  $\text{Yb}^{2.6+}$  が規則的に配列し、更に低温で  $\text{Yb}^{3+}$  が磁気秩序を示すと考えられてきた。我々はこれまで、価数秩序構造と磁気秩序構造を決定することを目的として中性子回折実験を行ってきたが、磁気構造の決定には至らなかった。本年度は、単結晶実験で得られた波数ベクトルを用いて、粉末実験で得られた回折プロファイルを解析することで磁気構造を特定することに成功した。 $T = 0.59 \text{ K}$  における磁気構造は、 $\text{Yb}^{3+}$  は正方晶の  $a$  軸方向に向けた磁気モーメントを持ち、波数ベクトル  $\vec{k} = (0.80, 0, 0.32)$ 、振幅  $0.3\mu_B$  の非整合サイン波構造である。一方、 $\text{Yb}^{2.6+}$  は磁気モーメントを持たない。過去に報告されている結晶場基底状態 ( $\Gamma_8$ ) から、 $\text{Yb}^{3+}$  の磁気モーメントは  $0.6\mu_B$  または  $2.0\mu_B$  と見積もられるが、本結果はこれらの値よりかなり小さい。過去の電気抵抗や比熱の結果からも近藤効果の可能性が示唆されており、近藤効果によって磁気モーメントが収縮している可能性がある。また、更に低温の  $T = 0.5 \text{ K}$  に相転移が報告されているが、この磁気構造が非整合から整合構造へ変化している可能性がある。

#### 価数秩序物質 $\text{EuNiP}$ の圧力効果 (光田暁弘、和田裕文、後藤政男)

六方晶  $\text{ZrBeGe}$  型構造をもつ  $\text{EuTX}$  ( $\text{T}=\text{Pt,Pd,Ni}$ ,  $\text{X}=\text{P,As}$ ) 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きた。 $\text{EuPtP}$  については我々の過去の研究で価数秩序を直接観測するとともに圧力下で新たな価数秩序相を見いだすことができた。本年は  $\text{EuNiP}$  の単結晶育成に初めて成功して研究を進めることができた。まず、従来から指摘されている  $T_1 = 100 \text{ K}$  の転移を電気抵抗で観測することに初めて成功し、従来1つの転移と考えられてきたが、2つの転移が起こっていることを明らかにした。続いて、この単結晶試料を用いて圧力効果について詳細に調べた。まず先程の転

移  $T_1$  は加圧とともに急速に高温側へシフトし、0.8 GPa で室温付近に到達した。更に  $P = 0.4$  GPa で新たな異常 ( $T'$ ) が 80 K 付近に現れ、同様に加圧とともに高温側へシフトし 1.4 GPa で室温に到達した。更に  $P = 1.0$  GPa で 40 K 付近にまた別の異常 ( $T''$ ) が出現し、加圧とともに高温側へシフトした。これらの異常 ( $T'$ ,  $T''$ ) は加圧とともに低温側の相が安定化すること、これらの圧力境界で飽和磁化が急激に減少することから、Eu の価数が 3 価方向へシフトすることによって生じた価数転移と考えられる。また、 $T''$  の出現に伴って、磁気転移点  $T_C$  が突然消失した。この付近で予想される価数揺らぎや磁気揺らぎによる新奇現象について今後調べて行く。

#### ナノスピン素子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。本年は交換バイアス型スピバルブ素子の振舞を圧力下で測定した。2 端子法で素子に電極を取り付け、圧力媒体とともにテフロンセルに封入して圧力セル内に閉じ込めた。圧力は 0~2.8 GPa までで磁気抵抗を測定した。圧力媒体はダフニ 7373 を用いたが、素子表面を酸化する効果が見られたため、素子表面を  $\text{SiO}_2$  で保護することでこれを回避した。圧力とともに磁気抵抗  $\Delta R/R$  は直線的に減少し、2 GPa でほぼ一定に落ちついた。一方、ピン層のスピ反転磁場は 2 GPa まではほぼ一定で、2 GPa 以上で増加する振舞が見られた。圧力によってピン層と反強磁性層の間にはたらく交換バイアスが增加していることが考えられる。今後、この振舞についてより詳細に調べて行く。

#### 発表論文

##### 《 原著論文 》

Valence transition in polycrystalline  $\text{Eu}(\text{Rh}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{Si}_2$  studied by hard x-ray photoemission spectroscopy:

Katsuya Ichiki, Takayuki Matsumoto, Hiroaki Anzai, Ryohei Takeshita, Kodai Abe, Suzuna Ishihara, Takayuki Uozumi, Hitoshi Sato, Awabaikeli Rousuli, Shigenori Ueda, Yukihiro Taguchi, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Suguru Hamano, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Kojiro Mimura,  
J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **220** (2017) pp. 28-32

Hard x-ray photoemission study of the temperature-induced valence transition system  $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ :

Katsuya Ichiki, Kojiro Mimura, Hiroaki Anzai, Takayuki Uozumi, Hitoshi Sato, Yuki

Utsumi, Shigenori Ueda, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Yukihiro Taguchi, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi,  
Phys. Rev. B **96** (2017) pp. 045106-1-7

NMR studies on  $\text{EuNi}_2\text{Si}_2$  with trivalent Eu ion:

T. Koyama, F. Ueyama, T. Maruyama, K. Ueda, T. Mito, A. Mitsuda, H. Wada,  
J. Phys.: Conf. Ser. **868** (2017) pp. 012023-1-6

Observation of the c-f hybridization effect in valence-transition system  $\text{EuPtP}$ :

Hiroaki Anzai, Katsuya Ichiki, Eike F. Schwier, Hideaki Iwasawa, Masashi Arita, Hitoshi Sato, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Kojiro Mimura,  
Phys. Status Solidi (C) **14** (2017) pp. 1600185-1-3

40T soft X-ray spectroscopies on magnetic-field-induced valence transition in  $\text{Eu}(\text{Rh}_{1-x}\text{Ir}_x)_2\text{Si}_2$  ( $x = 0.3$ ):

Hiromasa Yasumura, Yasuo Narumi, Tetsuya Nakamura, Yoshinori Kotani, Akira Yasui, Eigo Kishaba, Akihiro Mitsuda, Hirofumi Wada, Koichi Kindo, Hiroyuki Nojiri,  
J. Phys. Soc. Jpn. **86** (2017) pp. 054706-1-8

NMR studies of coexistence of superconductivity and CDW in  $\text{LaPt}_2\text{Si}_2$ :

Taisuke Aoyama, Tetsuro Kubo, Haruki Matsuno, Hisashi Kotegawa, Hideki Tou, Akihiro Mitsuda, Yutaro Nagano, Nobutaka Araoka, Hirofumi Wada, Yuh Yamada,  
J. Phys.: Conf. Ser. **807** (2017) pp. 062002-1-5

Temperature-dependent electronic structure of  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy:

H. Anzai, K. Ichiki, E. F. Schwier, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Mitsuda, H. Wada, K. Mimura,  
J. Phys.: Conf. Ser. **807** (2017) pp. 012006-1-5

Emergence of a new valence-ordered structure and collapse of the magnetic order under high pressure in  $\text{EuPtP}$ :

Akihiro Mitsuda, Shigeki Manabe, Masafumi Umeda, Hirofumi Wada, Kazuyuki Matsubayashi, Yoshiya Uwatoko, Masaichiro Mizumaki, Naomi Kawamura, Kiyofumi Nitta,

Naohisa Hirao, Yasuo Ohishi, Naoki Ishimatsu,  
J. Phys. Condens. Matter **30** (2018) pp. 150603-1-8

Transport properties of  $\text{EuNi}_2\text{Ge}_2$  under high pressure:  
H. Wada, Y. Goki and A. Mitsuda,  
J. Phys. Soc. Jpn. **87** (2018) pp. 034707-1-7

Rare-earth fourth-order multipole moment in cubic  $\text{ErCo}_2$  Probed by linear dichroism  
in core-level photoemission:  
A. A. Abozeed, T. Kadono, A. Sekiyama, H. Fujiwara, A. Higashiya, A. Yamasaki,  
Y. Kanai, K. Yamagami, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, A. V. Andreev, H.  
Wada and S. Imada  
J. Phys. Soc. Jpn. **87** (2018) pp. 033710-1-5

## 講演

### 《 海外での講演 》

Modulation of Spin-Transport and Magnetization Properties Due to Application of  
High Pressure:

Akihiro Mitsuda, Motoki Kaneda, Takashi Kimura, Hiromi Yuasa,  
Spintech IX, Fukuoka, Japan, 4 - 8 June, 2017.

Pressure and magnetic field effects on the valence transition of  $\text{EuRh}_2\text{Si}_2$

Akihiro Mitsuda, Eigo Kishaba, Takumi Fujimoto, Kohei Ooyama, Hirofumi Wada,  
Masaichiro Mizumaki, Naomi Kawamura, Naoki Ishimatsu  
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2017), Prague,  
Czech Republic, 17 - 21 July, 2017.

Transport property of  $\text{EuT}_2\text{P}_2$  (T=Ni, Co) in magnetic fields:

K. Tanabe, I. Yamamoto, A. Mitsuda and H. Wada,  
J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena,  
Hachimantai, Japan, 24 - 28 September, 2017.

Magnetic structure analysis of valence ordering compound,  $\text{YbPd}$ :

K. Oyama, A. Mitsuda, K. Ohoyama, T. Matsukawa, Y. Yoshida, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, K. Iwasa, H. Wada,

J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena, Hachimantai, Japan, 24 - 28 September, 2017.

A new valence-ordered phase and collapse of antiferromagnetism in EuPtP induced by pressure:

A. Mitsuda, S. Manabe, M. Umeda, H. Wada, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, M. Mizumaki, N. Kawamura, K. Nitta, N. Hirao, Y. Ohishi, N. Ishimatsu,

J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena, Hachimantai, Japan, 24 - 28 September, 2017.

《国内での講演》

磁気工学の基礎 (物性-材料特性-応用):

和田裕文

第40回日本磁気学会サマースクール, 中央大学駿河台記念館, 東京 2017年6月22日

歪みレス粉末試料を用いた YbPd の価数測定:

光田暁弘, 大山耕平, 水牧仁一朗, 河村直己, 和田裕文

日本物理学会 2017年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017年9月21日 - 9月24日

spear-anvil 法を用いた重い電子系物質  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の点接合分光実験:

志賀雅亘, 稲垣祐次, 光田暁弘, 河江達也

日本物理学会 2017年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017年9月21日 - 9月24日

Eu  $L_3$  端共鳴硬 X 線光電子分光による  $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  の電子状態の研究:

明渡悠, 市木勝也, 阿部晃大, 松本孝之, 川上晃希, 小野勇祐, 大下倉亮祐, 保井晃, 池永英司, 河村直己, 水牧仁一朗, 筒井智嗣, 魚住孝幸, 光田暁弘, 和田裕文, 三村功次郎

日本物理学会 2017年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017年9月21日 - 9月24日

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

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

日本物理学会 2017年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017年9月21日 - 9月24日

EuT<sub>2</sub>P<sub>2</sub>(T=Ni,Co) の磁場中輸送現象:

田邊巧祐, 山本伊吹, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017 年 9 月 21 日 - 9 月 24 日

逐次相転移を示す YbPd の NMR による研究:

中西隆将, 水戸毅, 大山耕平, 光田暁弘, 和田裕文

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017 年 9 月 21 日 - 9 月 24 日

価数秩序物質 YbPd の磁気構造解析:

大山耕平, 光田暁弘, 大山研司, 松川健, 吉田幸彦, 星川晃範, 石垣徹, 岩佐和晃, 和田裕文

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017 年 9 月 21 日 - 9 月 24 日

交換バイアス型スピバルブ素子における GMR 効果の圧力依存性:

兼田基希, 山野井一人, 光田暁弘, 湯浅裕美, 木村崇

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017 年 9 月 21 日 - 9 月 24 日

硬 X 線領域における共鳴光電子分光の進展と展望:

三村功次郎, 保井晃, 池永英司, 河村直己, 水牧仁一朗, 筒井智嗣, 佐藤仁, 魚住孝幸, 光田暁弘, 大原繁男

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017 年 9 月 21 日 - 9 月 24 日

中性子回折による価数秩序物質 YbPd の磁気構想の研究:

大山耕平, 光田暁弘, 大山研司, 松川健, 吉田幸彦, 星川晃範, 石垣徹, 岩佐和晃, 和田裕文

日本中性子科学会第 17 回年会, 福岡大学 七隈キャンパス, 2017 年 12 月 2 日 - 12 月 3 日

巨大磁気熱量効果を持つ Mn 系化合物の熱伝導度測定:

福田光祐, 和田裕文,

第 123 回日本物理学会九州支部例会, 鹿児島大学, 2017 年 12 月 9 日

重い電子子状態を示す EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> の点接合分光実験:

沖村健吾, 志賀雅亘, 光田暁弘, 稲垣祐次, 和田裕文, 河江達也

第 123 回日本物理学会九州支部例会, 鹿児島大学 郡元キャンパス, 2017 年 12 月 9 日

価数転移を示す EuNiP の圧力下物性:

後藤政男, 光田暁弘, 和田裕文

第 123 回日本物理学会九州支部例会, 鹿児島大学 郡元キャンパス, 2017 年 12 月 9 日

Eu 4d-4f 共鳴光電子分光から観た Eu 化合物の c-f 混成強度:

三村功次郎, 市木勝也, 阿部晃大, 松本孝之, 明渡悠, 川上晃希, 魚住孝幸, 田口幸広, A. Rousuli, 阿次富洋介, 赤嶺拓, 仲村愛, 辺土正人, 仲間隆男, 大貫惇睦, 藤本巧, 喜舎場英吾, 浜野卓, 光田暁弘, 和田裕文, 佐藤仁

日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 日 - 3 月 25 日

spcar-anvil 法を用いた Yb 化合物の点接合分光実験:

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

日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 日 - 3 月 25 日

点接合分光法を利用した EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> の電子状態測定:

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

日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 日 - 3 月 25 日

時間分解軟 X 線吸収分光で観測した EuNi<sub>2</sub>(Si<sub>0.21</sub>Ge<sub>0.79</sub>)<sub>2</sub> の光誘起価数転移:

横山優一, 川上晃希, 平田靖透, 田久保耕, 山本航平, 阿部晃大, 光田暁弘, 和田裕文, 三村功次郎, 和達大樹

日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 日 - 3 月 25 日

YbPd における格子不安定性と Yb 価数との相関:

筒井智嗣, 光田暁弘, 長谷川巧, 杉島正樹, 大山耕平, 伊奈稔哲, 水牧仁一朗, 和田裕文, 荻田典男, 宇田川眞行

日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 日 - 3 月 25 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、基盤研究 (C)

巨大磁気熱量効果を示す一次相転移磁性体の熱伝導度研究

研究代表者：和田裕文

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

JST ALCA

階層構造磁気蓄熱再生器を持つ磁気ヒートポンプの開発

研究代表者:川南 剛

## 他大学での研究と教育

光田暁弘：埼玉大学大学院理工学研究科および埼玉大学理学部で集中講義を担当した。

## 学部4年生卒業研究

上野裕之:(指導教員、和田裕文)：遍歴電子メタ磁性体  $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_{13}$  の熱伝導度

馬場佳吾:(指導教員、光田暁弘)：価数転移物質  $\text{EuNiP}$  における負の化学的圧力効果

## 修士論文

後藤政男:(指導教員、光田暁弘)：層状化合物  $\text{EuNiP}$  の価数転移及び価数秩序に対する圧力効果

田邊巧祐:(指導教員、和田裕文)： $\text{EuT}_2\text{P}_2$  ( $T=\text{Ni,Co,Ru}$ ) の磁場中輸送現象

鳩山慎太郎:(指導教員、和田裕文)： $\text{RCO}_2$  ( $R = \text{Er, Lu}$ ) の高圧下のホール効果

福田光祐:(指導教員、和田裕文)：熱伝導度測定装置の作製と巨大磁気熱量効果を示す  $\text{Mn}$  化合物の測定

## その他の活動と成果

和田裕文：Elsevier 社 Physica B エディター  
和田裕文：九州大学理学研究院副研究院長  
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)  
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。

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 135 回 (ISI 112 回) 等

(これを含め、google の引用数が昨年より減ったのは、google の引用基準が変わったためと思える)

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 166 回 (ISI 133 回)

Y. Watanabe, 米国特許, U.S. Patent No. 5418389 (1995) 被引用 158 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 112 回 (ISI 89 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 168 回 (ISI 132 回)

Y. Watanabe, Phys. Rev. B 57,R5563(1999) 被引用 102 回 (ISI 75 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 624 回 (ISI 432 回)

MRS Bulletin 26 (7) 489 (2001) に解説

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

Y.Watanabe,Ferroelectrics349,190-209(2007)(自己論文の解説) 被引用 43 回 (ISI 34 回)

この解明には、基本的な伝導素過程の解析が必須であり、この解析の元になる理論を

提案した。これをさらに拡張するのが(4)である。

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

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

成立特許4件(2014-2016年)

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

[今年度の各テーマの説明]

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

また、PCを用いる研究(第一原理計算)で、上記の課題の解明に取り組んだ。

(1) 強誘電体酸化物の相転移での伝導異常の解明:

従来、BaTiO<sub>3</sub>の相転移での伝導異常測定系の温度制御などの精密化と偏光同時観察を行ってきたが、今年は進展なし。

(2) 強誘電体酸化物の表面電子層の確定:

BaTiO<sub>3</sub>単結晶の表面伝導: 酸化物強誘電体は、反電場の影響は、極薄化すると甚大で、応用上も重要な問題である。我々は、このような巨大な電界があると、強誘電体の最表面は単純な絶縁体と見なせないと提案し、初期検証として高真空中でBaTiO<sub>3</sub>の表面伝導を測定し、支持する結果を得ている。

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

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

この研究に関しては、今年度は、実験での進展なく、主に(3)の立場で行った。

(3) 超高真空 AFM による表面研究：

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

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

今年度は、PAW 法を用いて様々な条件で、表面、分域などの計算を行った。また、交換関数 (exchange correlation function) として、PBE, PBEsol, HSE, HSEsol, TPSS, TPSS+U 等を用い PAW ポテンシャル等様々な条件をかえて、高精度の計算を行うための条件を探し、それを国際会議で発表し、論文にした。より、詳細には、

特に、超高真空 AFM による表面の実験は、BaTiO<sub>3</sub> で行っているが、それをモデル化した第一原理計算を行い、実験結果と対比した。

(4) 表面によらないバルク伝導のみによる整流現象の発見と理論：

この整流現象の理論をつくり実験結果を詳細に再現できており、酸化物強誘電体単結晶の相転移での伝導異常と強誘電体エピタキシャル薄膜の伝導異常のの解明に用いることを検討している。今年度は本テーマの進展はなかった

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

《Proceedings》

SrTiO<sub>3</sub> under strain and AFD revisited with multiple exchange-correlation functionals suggesting ferroelectric-paraelectric inhomogeneity

Y. Watanabe

Ferro2018 Extended abstract

Efficacy of energy functionals for ab initio calculations of strained BaTiO<sub>3</sub> examined by GL theory

Y. Watanabe

Ferro2018 Extended abstract

## 講演

《海外での講演》

国際会議

Natural domains of BaTiO<sub>3</sub> in ultra-high vacuum, air & acid: properties & invariant domain-size proving intrinsic screening & a Review of polarization induced conduction

Y. Watanabe, H. Nakahara, S. Kaku, D. Matsumoto, S.-W Cheong

International Meeting on Ferroelectricity (IMF14、USA)

(招待講演)

Polarization Induced Conduction and Screening

Y. Watanabe

New Jersey Institute of Technology(USA)

(招待講演)

Efficacy of energy functionals for ab initio calculations of strained BaTiO<sub>3</sub> examined by GL theory

Y. Watanabe

Fundamental Physics of Ferroelectrics(USA)

SrTiO<sub>3</sub> under strain and AFD revisited with multiple exchange-correlation functionals suggesting ferroelectric-paraelectric inhomogeneity

Y. Watanabe

Fundamental Physics of Ferroelectrics(USA)

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

渡部 行男 代表 (共同研究者無し), 金属酸化物からのトンネル電子による、結晶性酸化  
物へテロ接合の形成

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

### 学外での学会活動

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

Integrated Ferroelectrics 誌 編集委員

### その他の活動と成果

————— 量子微小物性 A 渡部 —————

村田学術振興財団 選考委員

Swiss National Science Foundation (SNSF) 外部評価員

Integrated Ferroelectrics, Editorial Board

物理学会九州支部 支部長

中等教育担当教員研修事業 (高校教員を対象としたリカレント教育) : 設定と補助  
九州大学世界に羽ばたく未来創成科学者育成プロジェクト (FC-SP) 「知的探求型プ  
ログラム (ESSP)」 (JSTの委託事業) 委員

出前講義、西南学院高校

大学説明会 (模擬講義等)

# 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 》

野村 竜也      Nagarjuna Asam

《 大学院 修士課程 》

中野 陽介      岡出 康太朗      石瀧 真之      有木 大晟

矢野 大吾

《 学部 卒業研究生 》

藤田 光翔

## 担当授業

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

## 研究・教育目標と成果

**横型スピバルブ素子を用いたスピン流の研究 (有木大晟・野村竜也・木村崇)**

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

### 磁性薄膜におけるスピンドイナミクスの研究 (藤田光翔・岡出康太朗・山野井一人・木村崇)

強磁性共鳴やスピン波といったスピンドイナミクス現象は、GHz を超える高速な操作性などを有しており、マイクロ波発振器やフィルタなどの次世代情報通信機器や超高速ロジック回路などの実現の可能性が示され、実用化を見据えた応用研究が展開されている。更に、近年、スピンドイナミクス現象からスピン角運動量の流れに対応したスピン流が取り出せることが明らかとなっており、応用研究だけでなく基礎研究でも注目されている。昨年までに我々の研究グループでは、磁気共鳴時の発熱効果によって強磁性金属の温度が10度以上も上昇することを明らかとしてきた。本年度は、強磁性金属/非磁性金属の2層構造において、上記の磁化共鳴発熱効果により非磁性金属中に熱スピン注入現象を介したスピン流が生成可能であることを発見した。更に、上記の動的熱スピン注入手法によるスピン流生成効率がスピンドイナミクスを用いた他のスピン流生成手法と比較して、極めて高効率であることも明らかとした。現在は、動的熱スピン注入手法の更なる高効率化を目指した新たな実験も実施されており、初期段階の報告であるが、熱伝導率が大きな非磁性金属を用いることで、動的熱スピン注入のスピン流生成効率が更に上昇する実験結果も得ている。

### スピン偏極電極を用いた電界誘起相転移現象 (中野陽介・木村崇)

近年、従来のメモリに代わる可能性を秘めたデバイスとして、ReRAM (抵抗変化型メモリ) が注目されている。ReRAMはトランジスタに匹敵するほどの大きな抵抗変化を示すが、その微視的な機構は十分には解明されていない。我々はReRAMで用いられる金属酸化物が、磁性を持つ原子を含む場合が多いことに着目し、磁場によって抵抗変化特性を制御することを試みている。本研究では、ReRAM素子をサブミクロンサイズ以下に微細化し、さらにサイドゲートを設け、ゲート電圧制御によるスイッチング特性の制御を試みた。その結果、ゲート電圧の印加に応じて、スイッチング電圧が変調され、電場によって金属酸化物界面における電子状態が変化したことを示唆する結果を得た。

### 強磁性/超伝導複合ナノ構造におけるクーパ対の変調の観測 (石瀧真之・矢野大吾・大西紘平・木村崇)

超伝導体と強磁性体を用いたナノ微細構造において、クーパ対の変調を観測することを以下の方法で目指した。Nb/Cuのジョセフソン接合またNi-Fe層を加えた試料において、クーパ対の変調を調べた。試料はNb/CuまたはNb/Cu/Ni-Feの多層膜のNb層の一部をミリングを行って、ギャップを作成したものを利用した。Nb/Cu/Ni-Feの方がNb/Cuよりもギャップ部の転移温度が低く、また磁場を細線に垂直に印加する

とさらに低くなることが観測された。これはクーパー対の漏れ磁場による変調を示唆した。Nb/Ni-Feの細線構造において、磁壁を利用することでクーパー対の変調を試みた。Ni-Fe細線に切れ込みをいれ、そこにNb細線を2本配置した構造を用いた。Nb細線間のNi-Fe部の抵抗が転移温度以下で磁壁が導入されている方がされていない方よりも低かった結果が得られた。磁壁周辺の非一様な方向の磁化によってクーパー対が変調された可能性が示された。

## 発表論文

### 《原著論文》

野村 竜也, 木村 崇: 「スピン依存ゼーベック効果によるスピン流の生成とその可能」まぐね Vol.12, No.5(2017), p.231 235(解説記事).

K. Yamanoi, Y. Yokotani and T. Kimura:  
Dynamical spin injection based on heating effect due to ferromagnetic resonance,  
Phys. Rev. Appl. **8**, 054031 (2017).

K. Ohnishi, M. Sakamoto, M. Ishitaki and T. Kimura:  
Possibility of Cooper-pair formation controlled by multi-terminal spin injection.  
Journal of Physics: Conf. Series **969** (2018) 012028.

T. Nomura, T. Ariki, S. Hu and T. Kimura:  
"Efficient thermal spin injection in metallic nanostructures."  
J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 465003 (2017).

S. Hu, X. Cui, T. Nomura, T. Min and T. Kimura:  
"Nonreciprocity of electrically excited thermal spin signals in CoFeAl-Cu-Py lateral spin valves."  
Phys. Rev. B (Rapid Comm.) **95**, 100403 (2017).

T. Ariki, T. Nomura, K. Ohnishi and T. Kimura:  
"Effective suppression of thermoelectric voltage in nonlocal spin-valve measurement."  
Appl. Phys. Exp **10**, 063004 (2017).

## 講演

### 《 海外での講演 》

T. Kimura:

Modulation of spin current using ferromagnetic spin absorber.

Japan-Korea Spintronics Workshop 2017, Soule, KOREA (December 2017).

K. Yamanoi, and T. Kimura:

Hat propagation due to spin wave in a ferromagnetic thin film.

Japan-Korea Spintronics Workshop 2017, Soule, KOREA (December 2017).

N. Asam, and K. Ohnishi, K. Yamanoi, and T. Kimura:

Spin-dependent thermal transport in GMR nanowires.

Japan-Korea Spintronics Workshop 2017, Soule, KOREA (December 2017).

T. Kimura:

"Spin absorption effects due to various functional materials.

10th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2017), Jeju, KOREA (December 2017).

Y. Nakano, and T. Kimura:

"Resistive switching in planar metal/metal-oxide bilayer system with low voltage operation.

10th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2017), Jeju, KOREA (December 2017).

K. Yamanoi and T. Kimura:

Detection of heating effect due to magneto-static surface spin wave in CoFeB film.

2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai, JAPAN (September 2017).

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

Superconducting proximity effect on a magnetic domain wall.

2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai, JAPAN (September 2017).

T. Kimura:

Spin Absorption Effects Due to Various Functional Materials.

Frontiers in Materials Science (FMS) 2017, Greifswald, GERMANY (September 2017).

N. Asam, K. Yamanoi, and T.kimura:

Heat transport in GMR nanowires: Evidence for Thermal Magneto Resistance.

Frontiers in Materials Science (FMS) 2017, Greifswald, GERMANY (September 2017).

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

Experimental study on background signal in lateral spin valve.

Frontiers in Materials Science (FMS) 2017, Greifswald, GERMANY (September 2017).

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

Possibility of Cooper-pair formation controlled by multi-terminal spin injection.

28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, SWEDEN (August 2017).

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

Possibility of spin-triplet supercurrent generated at the magnetic domain wall in the lateral structure.

28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, SWEDEN (August 2017).

K.Yamanoi and T.Kimura:

Efficient dynamical thermal spin injection in metallic bilayer system.

MAGNONICS 2017, Oxford, UK (August 2017).

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

Possibility of supercurrent conversion through a magnetic domain wall in a Ni-Fe wire.

SpinTECH IX, Fukuoka, JAPAN (June 2017).

T. Nomura, T. Ariki, G. Uematsu, and T. Kimura:

Optimization of Co/Fe ratio for efficient thermal spin injection in CoFeAl alloy.  
SpinTECH IX, Fukuoka, JAPAN (June 2017).

K. Yamanoi and T. Kimura:

Enhancement of dynamical thermal spin injection efficiency in FM/NM bilayer system.  
SpinTECH IX, Fukuoka, JAPAN (June 2017).

N. Asam, T. Ogawa, T. Ariki, T. Nomura, and T. Kimura:

Spin-current Absorption and Enhancement by Additional Ferromagnetic Layer.  
SpinTECH IX, Fukuoka, JAPAN (June 2017).

T. Ariki, T. Ogawa, N. Asam, T. Nomura, and T. Kimura:

”Unconventional spin transport property in ferromagnetic / nonmagnetic bilayer channel.

SpinTECH IX, Fukuoka, JAPAN (June 2017).

《国内での講演》

大西紘平, 矢野大吾, 石瀧真之, 木村崇:

「超伝導体 NbN/常伝導体 Cu 界面におけるスピン吸収の温度依存性」  
日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 (2018 年 3 月).

有木大晟, 山田和正, 野村竜也, 木村崇:

「強磁性ナノ細線における異常ネルンスト効果の効果的検出」  
日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 (2018 年 3 月).

有木大晟, 野村竜也, 大西紘平, 木村崇:

「強磁性スピン吸収効果によるスピン流の変調」  
日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 (2018 年 3 月).

山野井一人, 紅林秀和, 木村崇:

Coherent resonance precession of ferromagnets through antiferromagnet.  
平成 29 年度 スピン変換年次報告会, 京都大学 (2018 年 3 月).

大西紘平, 石瀧真之, 矢野大吾, 木村崇:

「超伝導体／?磁性体界?へのスピン注?」

第 11 回 物性科学領域横断研究会, 東京大学 (2017 年 11 月).

有木大晟, 野村竜也, Nagarjuna Asam, 山野井一人, 大西紘平, 木村崇:

「強磁性/非磁性複合ナノ構造における熱スピン伝導」

第 11 回 物性科学領域横断研究会, 東京大学 (2017 年 11 月).

野村竜也, 有木大晟, 木村崇:

「強磁性/非磁性二層構造におけるスピン緩和特性の温度依存性」

磁気記録・情報ストレージ研究会 2017, 柏崎エネルギーホール (新潟) (2017 年 10 月).

N. Asam, K. Yamanoi, and T. Kimura:

Thermal Magnetoresistance in GMR nanowires.

磁気記録・情報ストレージ研究会 2017, 柏崎エネルギーホール (新潟) (2017 年 10 月).

有木大晟, 野村竜也, 大西紘平, 木村崇:

「非局所スピンバルブ測定におけるバックグラウンド信号の抑制」

磁気記録・情報ストレージ研究会 2017, 柏崎エネルギーホール (新潟) (2017 年 10 月).

大西紘平:

「超伝導体／常伝導体界面におけるスピン伝導特性」

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017 年 9 月).

山野井一人, 木村崇:

Quantitative estimation of heating effect due to spin wave.

日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017 年 9 月).

矢野大吾, 石瀧真之, 大西紘平, 木村崇: 「NbN/Cu/CoFeAl 多層膜における強磁性体層の超伝導特性に及ぼす影響」 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017 年 9 月).

大西紘平, 石瀧真之, 木村崇:

Spin injection into proximity-induced superconducting Cu film.

平成 29 年度「ナノスピン変換科学」研究会, 大阪大学 (2017 年 9 月).

有木大晟, 山田和正, Asam Nagarjuna, 野村竜也, 木村崇:

”Efficient inducement of Anomalous Nernst effects in laterally patterned ferromagnetic films.

平成 29 年度「ナノスピンの変換科学」研究会, 大阪大学 (2017 年 9 月).

野村竜也, 有木大晟, 大西紘平, 木村崇:

Temperature dependence of spin relaxation in ferromagnetic/nonmagnetic bilayer channel.

平成 29 年度「ナノスピンの変換科学」研究会, 大阪大学 (2017 年 9 月).

N. Asam, K. Yamanoi, and T. Kimura:

Spin-dependent heat transport in GMR structure.

平成 29 年度「ナノスピンの変換科学」研究会, 大阪大学 (2017 年 9 月).

有木大晟, 野村竜也, 大西紘平, 木村崇:

"Experimental study of spin-independent background signal in nonlocal spin-valve measurement.

平成 29 年度「ナノスピンの変換科学」研究会, 大阪大学 (2017 年 9 月).

木村崇: 「拡散スピン流の生成と検出」

強制的秩序とその操作に関わる研究グループ 第 5 回研究会, スコーレ若宮 (福岡) (2017 年 9 月).

有木大晟, 野村竜也, 大西紘平, 木村崇:

「非局所スピンバルブ測定におけるバックグラウンド信号の抑制」

強制的秩序とその操作に関わる研究グループ 第 5 回研究会, スコーレ若宮 (福岡) (2017 年 9 月).

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金、基盤 S

純スピン流注入による磁気相転移の選択的制御と革新的ナノスピンのデバイスへの応用  
研究代表者：木村 崇

文部省科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究

巨大純スピン流を用いた超高性能多端子スピントルク発振器

研究代表者：木村 崇

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

### 修士論文

有木大晟：(指導教員、木村崇)：強磁性金属ナノ構造における熱流磁気効果に関する研究

石瀧真之：(指導教員、木村崇・大西紘平)：スピン流を用いた超伝導-常伝導二層系の磁気伝導特性に関する研究

岡出康太郎：(指導教員、木村崇)：強磁性ナノリングの磁化過程の検出に関する研究

中野 陽介：(指導教員、木村崇)：金属/酸化物界面における酸素イオン制御による新奇な伝導機構の発現

### 博士論文

野村竜也：(指導教員、木村崇)：Study on spin absorption effect in a ferromagnetic/nonmagnetic hybrid nanostructure.

# 光物性

## 研究室構成員

佐藤 琢哉 准教授

《 博士研究員 》

Pritam Khan

《 大学院 修士課程 》

土田 孝三    金丸 将孝    松本 慧大    徐 維宏

《 学部 卒業研究生 》

吉瀬 みのり    今野 克洋

## 担当授業

基幹物理学 IB (佐藤琢哉)、物理学入門 II (佐藤琢哉)、基礎物理学実験 (佐藤琢哉)、物理学特論 II (量子光学) (佐藤琢哉)、フロンティア科学 I (佐藤琢哉)

## 研究・教育目標と成果

**光誘起スピン波透過現象の数値シミュレーション** (松本慧大、佐藤琢哉)

光パルスによって生成されるスピン波は、その波長が光のスポット径に依存し、磁気双極子相互作用が支配的な静磁波である。本研究では、光によって生成した静磁波が空間ギャップを透過して伝播する様子を Green 関数を用いた数値計算、およびマイクロマグネティックシミュレーションによって求めた。その結果は、実験的に観測されたスピン波透過の波形をよく再現することがわかった。Green 関数を用いた数値計算の詳細な解析により、光のエヴァネッセント波との類推が成り立つことが明らかとなった。

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

フェリ磁性体は複数の副格子磁化を持ち、GHz 帯の磁気共鳴のほかに THz 帯の交換共鳴モードをもつことが理論的に示唆されている。本研究では、高時間分解能をもつポンプ・プローブ測定系を構築し、希土類鉄ガーネット試料における THz 帯の振動モードを観測した。詳細な偏光依存性の解析により、 $T_{2g}$  フォノンモードと同定された。

### ラマン散乱測定システムの構築 (土田孝三、徐 維宏、吉瀬みのり、佐藤琢哉)

ラマン散乱測定と時間分解ポンプ・プローブ測定はそれぞれ周波数領域・時間領域における測定であり、相補的な関係となっている。研究では、フォノン・ラマン散乱測定システムの構築をめざし、構成要素の自動制御システムを完成させた。今後は、系統的なフォノン・ラマン散乱測定を行う。

### マイクロマグネティックシミュレーションによる FMR とスピン波伝播 (今野克洋、松本慧大、佐藤琢哉)

スピン流の一種としてのスピン波は、マグノニクスという新しい分野で盛んに研究されている。スピン波の特性として、試料中に一つのエアギャップがあるときに、スピン波が透過することが観測されている。また、エアギャップを周期的に入れた構造を持つマグノニック結晶中においても、スピン波が透過することが観測されている。その一方で、ギャップとギャップとの間の領域については言及されていない。そこで我々は2つのエアギャップを持つ試料において磁化をガウシアン状の波束として励起し、それによって生成されたスピン波が2つのギャップを透過する様子を、GPU ベースのマイクロマグネティックシミュレーションソフトである mumax<sup>3</sup> を用いて計算した。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

Ultrafast optical excitation of coherent magnons in antiferromagnetic NiO:

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

Phys. Rev. B 95, 174407-1-11 (2017).

Unidirectional control of optically induced spin waves:

I. Yoshimine, Y. Y. Tanaka, T. Shimura, and T. Satoh,

EPL (Europhysics Letters) 117, 67001-1-5 (2017).

All-optical observation and reconstruction of spin wave dispersion:

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

Nature Commun. 8, 15859 (2017).

Excitation of coupled spin-orbit dynamics in cobalt oxide by femtosecond laser pulses:  
T. Satoh, R. Iida, T. Higuchi, Y. Fujii, A. Koreeda, H. Ueda, T. Shimura, K. Kuroda,  
V. I. Butrim, and B. A. Ivanov,  
Nature Commun. 8, 638 (2017).

## 講演

### 《 海外での講演 》

Transmission of photoinduced spin wave through an air gap:

K. Matsumoto, I. Yoshimine, K. Himeno, and T. Satoh,

York-Tohoku-Kaiserslautern Research Symposium on “New-Concept Spintronics Devices”, Jun. 21–23, 2017 (The University of York, UK)

Femtosecond laser induced THz and GHz oscillation in iron garnet:

M. Kanamaru, P. Khan, and T. Satoh,

York-Tohoku-Kaiserslautern Research Symposium on “New-Concept Spintronics Devices”, Jun. 21–23, 2017 (The University of York, UK)

Surface-plasmon enabled control over magnetization dynamics in hybrid magnetoplasmonic crystals:

A. L. Chekhov, I. Razdolski, A. I. Stognij, T. Satoh, T. V. Murzina, and A. Stupakiewicz,

European Quantum Electronics Conference (EQEC), EG-P-18, Jun. 25–29, 2017 (Munich, Germany)

Time-resolved imaging of photo-induced spin wave tunneling through an air gap (invited):

T. Satoh,

Magnonics 2017, Aug. 7–10, 2017 (Oxford, UK)

Excitation of multiple coherent phonon modes in  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  via non-resonant impulsive stimulated Raman scattering:

K. Imasaka, R. V. Pisarev, L. N. Bezmaternykh, T. Shimura, A. M. Kalashnikova, and T. Satoh,

Ultrafast Magnetism Conference (UMC) 2017, Mon-3, Oct. 9–13, 2017 (Kaiserslautern, Germany)

Ultrafast optical excitation of coherent magnons in antiferromagnetic NiO:

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

Ultrafast Magnetism Conference (UMC) 2017, Wed-8, Oct. 9–13, 2017 (Kaiserslautern, Germany)

Femtosecond Laser Induced THz And GHz Oscillations In Rare Earth Iron Garnet:

P. Khan, M. Kanamaru, and T. Satoh,

62nd Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM), GB-02, Nov. 6–10, 2017 (Pittsburgh, PA, USA)

Exploring the dynamics of magneto-optical interactions in rare-earth doped garnets by multi-dimensional THz spectroscopy (invited):

S. Pal, T. Satoh, and M. Fiebig,

International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF), Dec. 10–13, 2017 (New Delhi, India)

P. Khan, M. Kanamaru, and T. Satoh:

Femtosecond laser induced THz oscillations in rare earth iron garnet,

Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS) 2018, MO-02, Jan. 7–10, 2018 (Queens College of City University of New York, USA)

Effect of Gilbert damping on ultrafast optical spin excitations in antiferromagnetic hexagonal  $\text{HoMnO}_3$ :

C. Tzschaschel, M. Weber, M. Fiebig, and T. Satoh,

8th NCCR MUST Annual Meeting, 68, Jan. 22–24, 2018 (Grindelwald, Switzerland)

Optically induced symmetry breaking in multiferroic  $\text{h-YMnO}_3$  probed by second harmonic generation:

C. Tzschaschel, M. Weber, M. Fiebig, and T. Satoh,

DPG Spring Meeting of the Condensed Matter Section (SKM) together with the EPS, MA 6.2, Mar. 11–14, 2018 (Berlin, Germany)

Exploring the exchange interactions in GdYb-BIG via two-dimensional THz spectroscopy:

S. Pal, C. Tzschaschel, T. Satoh, and M. Fiebig,

DPG Spring Meeting of the Condensed Matter Section (SKM) together with the EPS, MA 49.1, Mar. 11–14, 2018 (Berlin, Germany)

《国内での講演》

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

K. Matsumoto, I. Yoshimine, K. Nakagouchi, K. Himeno, and T. Satoh,

SpinTECH IX International school and conference 2017, A-145, Jun. 4–8, 2017 (Fukuoka, Japan)

Observation of temperature dependent Terahertz modulation in rare earth iron garnet:

P. Khan, M. Kanamaru, and T. Satoh,

SpinTECH IX International school and conference 2017, B-144, Jun. 4–8, 2017 (Fukuoka, Japan)

逆磁気光学効果による超高速磁化制御 (invited):

佐藤琢哉,

第64回日本磁気学会スピネレクトロニクス専門研究会「スピネレクトロニクス」, 6p-A202-2, Jun. 19, 2017 (名古屋大学)

反強磁性体・フェリ磁性体酸化物における光パルスを用いたテラヘルツ・マグノン励起 (invited):

佐藤琢哉,

2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「酸化物のテラヘルツ光物性とデバイス応用への展望」, Sep. 5–8, 2017 (福岡国際会議場・国際センター)

光で生成したスピン波のトンネル効果 (invited):

佐藤琢哉,

2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「光とスピンの織りなす研

究の最前線」, 6p-C18-7, Sep. 5-8, 2017 (福岡国際会議場・国際センター)

光パルスを用いたスピン波伝播イメージング (invited):

佐藤琢哉,

日本放射光学会第9回若手研究会「最先端のパルス光で観る超高速科学」, Sep. 11-12, 2017 (東京大学本郷キャンパス)

エアギャップ透過スピン波の時空間分解:

松本慧大, 吉峯 功, 姫野滉盛, 佐藤琢哉,

第41回日本磁気学会学術講演会, 19pA-14, Sep. 19-22, 2017 (九州大学伊都キャンパス)

反強磁性体におけるテラヘルツ・スピン制御 (invited):

佐藤琢哉,

豊田理研ワークショップ, Oct. 19-20, 2017 (豊田産業技術記念館)

Optical excitation of magnons in antiferromagnets (invited):

T. Satoh,

CEMS Symposium on Trends in Condensed Matter Physics, Nov. 6-8, 2017 (RIKEN, Saitama, Japan)

反強磁性体におけるテラヘルツ・スピンドイナミクス:

佐藤琢哉,

光・熱・磁気の相互作用を利用した新規スピンドバイス・ストレージ技術調査専門委員会, Nov. 16-17, 2017 (東北大学)

光パルスを用いた反強磁性体の超高速磁化制御:

佐藤琢哉,

第11回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), P029, Nov. 17-18, 2017 (東京大学物性研究所)

フェムト秒パルスを用いた反強磁性体の超高速制御 (invited):

佐藤琢哉日本磁気学会65回スピントロニクス専門研究会／応用物理学会スピントロニクス研究会, Nov. 22, 2017 (中央大学駿河台記念館)

マイクロマグシミュレーションによるスピン波伝播の数値解析:

今野克洋, 松本慧大, 佐藤琢哉,

第 123 回日本物理学会九州支部例会, B-15, Dec. 9, 2017 (鹿児島大学)

ブリルアン散乱による後方散乱マグノンモードの検出:

松本慧大, Thomas Brächer, Tobias Fischer, Burkard Hillebrands, 佐藤琢哉,

第 123 回日本物理学会九州支部例会, B-16, Dec. 9, 2017 (鹿児島大学)

磁性体におけるラマン散乱:

吉瀬みのり, 徐維宏, 土田孝三, 佐藤琢哉,

第 123 回日本物理学会九州支部例会, B-17, Dec. 9, 2017 (鹿児島大学)

Optical excitation of magnons in antiferromagnets (invited):

T. Satoh,

Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop "New Excitations in Spintronics",

Jan. 10–14, 2018 (Tohoku University, Japan)

逆ファラデー効果を用いた超高速磁化制御と時間分解イメージング (invited):

佐藤琢哉,

レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, Jan. 24–26, 2018 (京都市勧業館みやこめっせ)

BiFeO<sub>3</sub> におけるポンプ・プローブ測定:

金丸将孝, Pritam Khan, 吉村 武, 藤村紀文, 伊藤利充, 佐藤琢哉,

日本物理学会「第 73 回年次大会」, 22aPS-98, Mar. 22–25, 2018 (東京理科大学野田キャンパス)

エアギャップ透過スピン波の時空間分解測定:

松本慧大, 吉峯 功, 姫野滉盛, 志村 努, 佐藤琢哉,

日本物理学会「第 73 回年次大会」, 22aPS-102, Mar. 22–25, 2018 (東京理科大学野田キャンパス)

鉄酸化物における偏光角度分解ラマン散乱:

徐 維宏, 吉瀬みのり, 土田孝三, 藤井康裕, 是枝聡肇, 佐藤琢哉,

日本物理学会「第 73 回年次大会」, 22aPS-106, Mar. 22–25, 2018 (東京理科大学野田キャンパス)

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

科学研究費補助金、若手研究 (A)

逆磁気光学効果による磁化のベクトル制御と磁気相転移の検証

研究代表者：佐藤琢哉

科学研究費補助金、新学術領域研究 (研究領域提案型)(ナノスピン変換科学)

光学的スピン変換

研究分担者：佐藤琢哉

科学研究費補助金、特別研究員奨励費

磁気 - プラズモンナノ構造における光 - 物質相互作用

受入研究者：佐藤琢哉

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

日本学術振興会外国人特別研究員：Pritam Khan (India)

## 他大学での研究と教育

佐藤琢哉：研究員@東京大学生産技術研究所

## 学部4年生卒業研究

吉瀬みのり：(指導教員：佐藤琢哉)：磁性体におけるラマン散乱分光

今野克洋：(指導教員：佐藤琢哉)：マイクロマグネティックシミュレーションによるFMR  
とスピン波伝播の数値計算

## 修士論文

## 学外での学会活動

日本物理学会 代議員

電気学会 スピンデバイス・ストレージ技術調査専門委員

MORIS 2018 Program committee

## その他の活動と成果

# 低次元電子物性

## 研究室構成員

矢山英樹 教授

《 大学院 修士課程 》

内山大嘉

《 訪問研究者 》

Ali Gamal Hafez Ernassel Rabie

## 担当授業

基幹物理学 IB、物理学概論 A、基幹教育セミナー

## 研究・教育目標と成果

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

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

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

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

キャパシタは一方の電極が他方の電極によってシールドされている構造を持ち、ヒーターからの信号の回り込みを防止するように設計されている。

実験結果は、第2音波の共鳴周波数で、電気分極に伴う電圧が観測された。更に、第2音波と電気分極の時間位相が180度ずれていることが分かった。現在、この位相のずれについて解析し電気分極の発生原因を探る研究を行っている。

## 発表論文

### 《原著論文》

Electric activation of superfluid helium by second sound:

Hideki Yayama, Yugo Nishimura, Hiroka Uchiyama, Hiroshi Kawai, Jean-Paul van Woensel, and Ali G. Hafez,

Fiz. Nizkh. Temp. (Low Temp. Phys.) to be published in 2018.

### 《その他の論文》

1. 矢山英樹, 1K以下での温度測定法 I, 九州大学低温センターだより No.12, 2018. p.19.

## 講演

### 《海外での講演》

### 《国内での講演》

## 修士論文

内山大嘉：第2音波による超流動ヘリウムの電氣的活性化

## 学外での学会活動

応用物理学会九州支部理事

## 受託研究・民間との共同研究

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

## その他の活動と成果

# 複雑物性基礎

## 研究室構成員

木村康之 教授

水野大介 准教授      稲垣紫緒 准教授

岩下靖孝 助教

《 博士研究員 》

有賀 隆行      Francis van Esterik (外国人研究員)

《 大学院 博士課程 》

野口朋寛      西澤 賢治

《 大学院 修士課程 》

大石 隼道      荻原 僚      梅田 勝比呂      小池 涼太郎

高田 哲弘      棚町 昂平      吉原 公貴      菅真理子

齊藤圭太      池田 豊和      都 武蔵      池永匡宏      永尾渉      林原 就斗

《 学部 卒業研究生 》

壹岐 晃平      岩崎 大喜      岩本 健太      近堂 くるみ

福本 昂平      三谷一晃

《 訪問研究者 》

安藤祐貴 (技術補助)      Corrie Vanlaanen (交換留学生・北アリゾナ大学)      Rashawn  
James Briscoe (交換留学生・北アリゾナ大学)

## 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)、複雑系物理学 (木村康之)、物理学特別講義C (生物物理学) (水野大介)、基礎物理実験学・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, 2, 7)
- 新規なレーザートラップ手法の開発や、それによる力測定・粒子操作をコロイド系に適用し、その物性測定及び非線形挙動の解明を行なうことを目指した。(3)
- 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。(4, 5, 6)
- 複雑なソフトマター複合系における局所レオロジー挙動や相分離過程などを詳細に解明することを目指す。(8)
- 非平衡現象を解明するための新規なマイクロレオロジー測定システムの開発を目指す。(9)
- 粉体のバンド構造や局所構造の解明を目指す。(10, 11)
- 細胞骨格やコロイド系の力学応答に非アファインな応答が果たす役割をマイクロレオロジーによる広帯域計測により実証する。(12, 15)
- 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。(12)
- 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。(13)
- 胚性幹細胞 (ESC) が分化する過程において、細胞核と抽出された染色質のメカニクスが変化する様子を、最新の計測法 (FBMR、AFS) を用いて計測する。(14)
- 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、光マイ捕捉クロレオロジーによる広帯域計測により実証する。(15, 16)
- 各種細胞抽出液の力学特性を計測することで、細胞内部環境のガラス的振る舞いを明らかにすることを目指す。(17)
- 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。(18)
- 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。(19-21)
- 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。(22)

(1) 界面活性剤水溶液中での自己駆動油滴の運動解明 (菅、木村)

界面活性剤水溶液中を自己駆動する油滴系を実現し、そのサイズによる運動モードの変化を明らかにした。ことに従来報告されていた直線運動や円運動のほかに、らせん運動や8の字運動を示すことがわかり、そのモード相図の作成を行った。

#### (2) 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。

#### (3) 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、特にレーリー・ゾンマーフェルト後方伝達関数を用いた方法により、多粒子の3次元同時追跡を可能にするシステムを実現し、複数粒子の沈降過程の観察に成功した。

#### (4) 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。金面間に強いファンデルワールス引力が働くことを利用し、この粒子で金表面を被覆し、誘電体粒子層を形成することに成功した。この被覆挙動の塩濃度依存性はDLVO理論で説明できる。しかしパッチのサイズや厚さのばらつきが大きいためか、直ぐに被覆する粒子から数時間経っても被覆しないものまでかなりばらつきがあった。

#### (5) ヤヌス粒子を用いたガラス転移の研究 (吉原、岩下、木村)

粒径数 $\mu\text{m}$ のシリカ粒子を用いて金面を持つヤヌス粒子を作成した。2種類の粒径の粒子を2次的に密充填したコロイダルガラスを形成した後、塩濃度の変化によりパッチ間を結合し、40%程度の粒子が凝集体(クラスター)となったガラス状態の実現に成功した。このガラス化と結合キネティクスの独立制御により、通常密充填によるガラス化では到達し得ない超安定なガラス状態を形成できる可能性がある。

#### (6) 異形状粒子によるピッカリングエマルションの研究 (小池、岩下、木村)

光反応性の樹脂(SU-8)を用いたフォトリソグラフィにより、正三角形から正六角形までの正多角形状の両親媒性微粒子を作成した。この粒子を用いて水-油との3成

分系においてエマルションを形成したところ、大きな液滴表面には平面の最密充填構造が形成された。また液滴径と粒子サイズが同程度のばあい、30%程度の高い比率で液体がほぼ完全に粒子に閉じ込められた正多面体形状の液滴が形成された。このように、形状と表面物性の異方性により、エマルションの液-液界面の完全被覆と液滴形態の制御に成功した。

#### (7) Induced Charge Electrophoresis(ICEP) の粒子形状依存性 (江頭、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。様々な長さを持つ直方体粒子（厚さ  $1.4\mu\text{m}$ ）の最大面1つをクロムで被覆し界面活性剤水溶液に分散させ、振幅 2V、周波数 1kHz の交流矩形波電場を印加した。すると粒子は長辺を電場と平行にして ICEP 運動を始め、電場と平行方向に短いほど、垂直方向には長いほど早く運動した。これは金面での電位降下の増大による ICEP 効果の飽和と垂直方向の長さにはほぼ比例する自己駆動力により説明できる。このように、異方的な形状と ICEP の関係を示すことに成功した。

#### (8) 液晶電気対流系の 3次元観察 (高田、木村)

負の誘電率異方性を持つ液晶に電場を印加する事により生じる電気対流に対しコロイド粒子を分散させ、非熱的な駆動力による運動について調べた。その結果、ネマチック液晶の対流構造、コレステリック液晶の対流構造をそれぞれ反映した特異な拡散、輸送現象を見出した。

#### (9) アクティブマイクロロロジー測定システムの構築 (齊藤、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ロ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ロロジー測定システムを構築し、これを用いたソフトマター系の局所力学物性測定を進めている。

#### (10) 回転円筒容器における粉体の相分離現象の研究 (大石、都、近堂、岩崎、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こる条件を決められるか調べるために、粒子を球状のものに限定し、粒子のサイズと比重を系統的に変えることで、回転ドラムにおけるサイズ分離現象がどういふときにおこるか、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。

#### (11) ランダム充填した粉粒体の動径分布関数に関する研究 (稲垣、木村)

従来、結晶構造を持たない媒質の微視的構造の解析には、動径分布関数が用いられてきていた。しかし、粒子サイズが単一でない場合には、粒子の中心間距離  $l_{ij}$  に粒子半径  $r_i + r_j$  の情報が含まれてしまうため、粒子直径の確率分布の影響で動径分布関数のピークはなだらかになり、微視的構造に関する情報を取り出すのが困難になってしまう。動径分布関数の構成要素である、粒子間距離  $s_{ij} = l_{ij} - (r_i + r_j)$  (inter-particle distance) について、離散要素法を用いた数値計算によって研究を行った。また、球状粒子をトレイに乗せ鉛直方向に加振し、二次元的な粒子配置を実験的に実現することで、実験による粒子間距離の測定を行い、数値計算の結果と比較して検証した。粒子間距離の統計的性質について、今後さらに研究を進める。

#### (12) 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。

#### (13) 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 (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従しつつ、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。

(14) 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、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。

(15) 生きた細胞骨格の非平衡ゆらぎ (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。

(16) 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 (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。

(17) 細胞内部環境のガラス的挙動 (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。

(18) 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。

(19) 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れた時間発展する解析解として求めた。これにより細胞骨格内部における力生成を揺らぎから推定することが可能になった。

**(20) 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。

**(21) 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。

**(22) 細胞競合による癌悪性化と生体防御のメカノバイオロジー**（梅田、永尾、水野大介)

生体には、日々生じる変異細胞が周辺の正常細胞との競合に敗れて駆除される機構（細胞競合）が存在する。この機構の力学的側面を調べるため、癌関連因子 (Ras) を薬物依存的に発現する細胞株を用いて、正常細胞と変異細胞の競合状態を作り、癌化の前後で競合細胞の力学的性質と活きの良さがどのように変化するか調べた。周辺の正常細胞と競合している変異細胞は、“活きが良く”細胞質も流動化することが分かった。

《 来年度の目標 》

研究（1 - 22）のさらなる発展、及び教育の充実。

## 発表論文

### 《原著論文》

Density dependence of orientational order in one-patch particles”

Yasutaka Iwashita and Yasuyuki Kimura,

Soft Matter **86**, (2017) 4997-5007.

Hydrodynamically induced collective motion of optically driven colloidal particles on acircular path

Yasuyuki Kimura,

Journal of Physical Society of Japan **86**, (2017) 101003.

Universal glass-forming behavior of in vitro and living cytoplasm

K. Nishizawa, K. Fujiwara, M. Ikenaga, N. Nakajo, M. Yanagisawa, and D. Mizuno,

Scientific Reports, **7**, (2017) 15143.

K. Nishizawa, M. Bremerich, H. Ayade, C. F. Schmidt, T. Ariga and D. Mizuno,

Feedback-tracking microrheology in living cells

Science Advances, **3**, (2017) e1700318.

### 《Proceedings》

Relationships between Mass and Porosity of Rough Rice Piled in a Combine Grain Tank,

Ryuichi Yoshizaki, Yasumaru Hirai, Muneshi Mitsuoka, Shio Inagaki, Eiji Inoue, Takashi Okayasu,

Proceedings of the 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB)

### 《その他の論文》

## 講演

### 《海外での講演》

斎藤圭太、大久保省吾、木村康之 Rhythmic motion of colloidal particles driven by optical force Optical Manipulation Conference (OMC17) 2017.4.12 横浜・パシフィコ横浜 口頭

田村優太、木村康之 Continuous rotation of a cholesteric liquid crystalline droplet by a circularly polarized optical tweezers Optical Manipulation Conference (OMC17)

2017.4.14 横浜・パシフィコ横浜 口頭

田村優太、木村康之 Two-dimensional non-close-packed nematic colloidal assemblies and their electrical response 10th Liquid Matter Conference 2017.7.19-20 Slovenia, Ljubjana ポスター

斎藤圭太、大久保省吾、木村康之 Nonequilibrium dynamic clustering of hydrodynamically coupled particles driven by optical force 10th Liquid Matter Conference 2017.7.19-20 Slovenia, Ljubjana ポスター

菅真梨子、小林沙織、市川正敏、前多裕介、木村康之 Switching of characteristic motions for swimming oil droplets in concentrated surfactant solution 10th Liquid Matter Conference 2017.7.17-18 Slovenia, Ljubjana ポスター

野口朋寛、岩下靖孝、木村康之 Micelles and emulsion droplets in amphiphilic Janus particle-water-oil ternary system 10th Liquid Matter Conference 2017.7.20 Slovenia, Ljubjana 口頭

岩下靖孝、木村康之 Spatial confinement governs orientational order in one-patch particles 10th Liquid Matter Conference 2017.7.19-20 Slovenia, Ljubjana ポスター

岩下靖孝、木村康之 Density dependence of orientational order in one-patch particles 10th Liquid Matter Conference 2017.7.19-20 Slovenia, Ljubjana ポスター

木村康之、高橋健太郎、斎藤圭太、大久保省吾 Non-equilibrium fluctuation and self-organized structure in driven colloidal systems International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017) 2017.11.21 仙台国際センター 招待

斎藤圭太、木村康之 Collective motion of hydrodynamically coupled colloidal particles driven by optical tweezers International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017) 2017.11.20 仙台国際センター ポスター

菅真梨子、小林沙織、市川正敏、木村康之 Switching of characteristic motion for swimming nematic liquid crystal droplets in concentrated surfactant solution International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017) 2017.11.20 仙台国際センター ポスター

池田豊和、木村康之 3-dimensional tracking of colloidal particles by holographic microscopy International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017) 2017.11.20 仙台国際センター ポスター

西澤賢治 Actively-Fluidized Cytoplasm Become Strong Glass Former International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 11月21日 仙台国際センター ポスター

西澤賢治 Athermal driven glass like behavior in living cytoplasm 10th Matter liquid

matter conference 7月19日 Ljubljana, Slovenia ポスター

Fransisca Arianne Suzanne van Esterik Mechanics of the Nucleus and Cell Body during Early Mouse Development: Implications for Developmental Biology International symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 2017/11/20-23 Sendai, Japan ポスター

池永匡宏 Universal Glass-Forming Behavior of Living Cytoplasm Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 2017/7/20 仙台 j 国際センター ポスター

有賀隆行 Nonequilibrium Energy Dissipation from Molecular Motor kinesin International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (国際学会) 2017/11/20 仙台 ポスター

有賀隆行 Nonequilibrium Energetics of Single Molecule Motor, Kinesin-1 62nd Annual Meeting Biophysical Society (国際学会) 2018/2/20 アメリカ、サンフランシスコ ポスター

《 国内での講演 》

木村康之 Dynamics of rotating particles controlled by structured light 新規学術領域第4回領域研究会 2017.6.24 東大・小柴ホール 招待

木村康之 光を用いたソフトマターのマイクロ物性測定と制御 量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」 2017.12.14-16 上智大学軽井沢セミナーハウス 招待

木村康之 エキゾチックな相互作用を用いたコロイド構造体創成の試み 日本化学会分散凝集の学理構築への科学と技術戦略研究会 2018.3.27 化学会館 招待

木村康之、高橋健太郎、高田哲弘 液晶電気対流中でのコロイド粒子のアクティブ拡散 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.7 神戸大学鶴甲第1キャンパス 口頭

野口朋寛、岩下靖孝、木村康之 両親媒性ヤヌス粒子-水-油 3成分系における自己集合構造の水/粒子体積比依存性 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.6 神戸大学鶴甲第1キャンパス 口頭

小池涼太郎、岩下靖孝、木村康之 正多角形粒子を用いた Pickering emulsion の形成 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.6 神戸大学鶴甲第1キャンパス 口頭

岩下靖孝、木村康之 1パッチ粒子方向秩序の充填密度依存性 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.8 神戸大学鶴甲第1キャンパス ポスター

菅真梨子、木村康之 自走する水中油滴の運動 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.8 神戸大学鶴甲第1キャンパス ポスター

吉原公貴、岩下靖孝、木村康之 ヤヌス粒子の自己集合による金属・誘電体ハイブリットメソ構造の形成 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.8 神戸大学鶴甲第1キャンパス 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希薄コロイド分散系の3次元物性測定 第68回コロイドおよび界面化学討論会 2017.9.8 神戸大学鶴甲第1キャンパスポスター

高田哲弘、高橋健太郎、木村康之 コレステリック液晶電気対流中でのコロイド粒子のアクティブ拡散 第7回ソフトマター研究会 2017.10.24 京都大学・北部総合研究棟ポスター

斎藤圭太、木村康之 光駆動コロイド粒子の流体力学相互作用を介した集団運動 第7回ソフトマター研究会 2017.10.23 京都大学・北部総合研究棟ポスター

菅真梨子、小林沙織、市川正敏、木村康之 水中を自走する液晶液滴の運動 第7回ソフトマター研究会 2017.10.23 京都大学・北部総合研究棟ポスター

小池涼太郎、岩下靖孝、木村康之 正多角形粒子を用いた Pickering emulsion における粒子形状の影響 第7回ソフトマター研究会 2017.10.23 京都大学・北部総合研究棟ポスター

吉原公貴、岩下靖孝、木村康之 粒子間結合の制御による超安定コロイダルガラスの形成 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

斎藤圭太、壺岐晃平、木村康之 荷電コロイド粒子の動的電気応答測定 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

池田豊和、岩下靖孝、木村康之 ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド分散系の3次元ダイナミクス 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

菅真梨子、木村康之 水中で自走するキラルな液晶液滴の運動 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

高田哲弘、木村康之 コレステリック液晶電気対流中での粒子拡散 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

壺岐晃平、斎藤圭太、木村康之 複雑液体の局所力学測定 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

岩本健太、斎藤圭太、木村康之 光駆動コロイド粒子の集団運動 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 口頭

江頭奈津美、岩下靖孝、木村康之 induced charge electrophoresis による自己推進運動の粒子形状依存性 第113回日本物理学会九州支部例会 2017.12.9 鹿児島大学郡元キャンパス 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コロイド分散系の3次元ダイナミクス 日本物理学会第73回年次大会 2018.3.22-25 東京理科大学野田キャンパス 口頭

岩本健太、斎藤圭太、木村康之 光駆動コロイド粒子系の集団運動 日本物理学会第73回年次大会 2018.3.22-25 東京理科大学野田キャンパス 口頭

小池涼太郎、岩下靖孝、木村康之 正多角形粒子を用いた Pickering emulsion における粒子形状の効果 日本物理学会第 73 回年次大会 2018.3.22-25 東京理科大学野田キャンパス 口頭

近堂くるみ、稲垣紫緒 回転ドラムによる粉粒体の自発的サイズ分離現象 第 123 回日本物理学会九州支部例会 2017 年 12 月 9 日 鹿児島大学 口頭

岩崎大喜、稲垣紫緒 粉粒体のサイズ分離現象についてのセルオートマトン 第 123 回日本物理学会九州支部例会 2017 年 12 月 9 日 鹿児島大学 口頭

大石隼道、稲垣紫緒 粉粒体の分離現象における時空間ダイナミクス 第 123 回日本物理学会九州支部例会 2017 年 12 月 9 日 鹿児島大学 口頭

稲垣紫緒、江端宏之、吉川研一 Segregation dynamics in a rotating double-cylinder 第 1 回 九州大学女性研究者ダイバーシティシンポジウム 2018 年 3 月 8 日 九州大学伊都キャンパス ポスター

稲垣紫緒、江端宏之 つぶつぶの物理 第 120 回 福工大土曜談話会 2017 年 10 月 28 日 福岡工業大学 口頭

西澤賢治 Molecular crowding glass driven by metabolic activity in cells 日本生物物理学会第 55 回年会 9 月 19 日 熊本大学 黒髪北地区 口頭

Fransisca Arianne Suzanne van Esterik Mechanics of the Nucleus and Cell Body during Early Mouse Development: Implications for Developmental Biology The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan 2017/09/19-21 Kumamoto, Japan ポスター  
福本昂平 遊走微生物懸濁液中における非平衡揺らぎの統計分布 日本物理学会九州支部例会 12 月 9 日 鹿児島大学 口頭

池永匡宏 Universal glass-forming behavior of living cytoplasm 第 5 5 回生物物理学会 2017/9/21 熊本大学黒髪北地区 ポスター

有賀隆行 Nonequilibrium energetics of kinesin 第 55 回日本生物物理学会年会 2017/9/20 熊本 口頭

水野大介 FDT violation and Glassy Dynamics in active cell interior 揺らぎと構造の協奏 第 4 回領域研究会 2017/6/23 東京大学本郷キャンパス ポスター

荻原僚 Microrheology of soft hydrogel under mechanical loading 揺らぎと構造の協奏 第 4 回領域研究会 2017/6/23 東京大学本郷キャンパス ポスター

梅田勝比呂 The dynamics of Intracellular Environments during Cell-cycle progression 日本生物物理学会第 55 回年会 9 月 19 日 熊本大学 黒髪北地区 ポスター

荻原僚 応力印加下での濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー 日本物理学会 秋 2017 年 9 月 21 日 岩手大学 (上田キャンパス) 口頭

永尾渉 細胞競合現象におけるメカニクス 日本物理学会 秋 2017 年 9 月 23 日 岩手大学 (上田キャンパス) 口頭

水野大介 細胞サイズと力学特性 2017年度生命科学系学会合同年次大会 2018/12/8 神戸ポートピアホテル 招待講演

水野大介 Glassy dynamics of cell interiors studied with feedback-tracking microrheology アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性 2017/9/12 函館 グリーンピア大沼口頭

水野大介 Non-Gaussian limit fluctuations in active swimmer suspensions アクティブマター研究会 2018 2018/1/19 京都大学福井謙一記念研究センター 招待講演

三谷一晃 遊走微生物懸濁液のマクロレオロジー測定 日本物理学会九州支部例会 2017/12/9 鹿児島大学 口頭

## 外部資金

《 文部省科学研究費補助金 》

文部省科学研究費補助金 (新学術領域)、計画研究  
非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学  
研究代表者：木村康之  
研究分担者：水野大介

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、基盤研究 (C)  
アクティブなゆらぎ環境下での生体分子モーターキネシンの1分子運動解析  
研究代表者：有賀隆行

文部省科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究  
多角形粒子の幾何学効果を利用したピッカリングエマルジョンの形態制御  
研究代表者：岩下靖孝

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

武田科学研究助成

人工骨細胞ネットワークにおける力学刺激情報伝達過程の解析

研究代表者： 水野大介

内藤記念科学振興財団

力学刺激を検出することで自らを作り変える人工骨システムの開発

研究代表者： 水野大介

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

#### 学部4年生卒業研究

岩本 健太：(指導教員、木村康之)：光渦中のコロイド粒子の運動

江頭 奈津実：(指導教員、木村康之・岩下靖孝)：異形状粒子の Induced Charge Electrophoresis

壹岐 晃平：(指導教員、木村康之)：コロイドの交流電気泳動スペクトル

福本昂平：(指導教員、水野大介)：遊走微生物懸濁液における非平衡揺らぎの統計分布

三谷一晃：(指導教員、水野大介)：遊走微生物懸濁液のマクロレオロジー測定

近堂 くるみ：(指導教員、稲垣紫緒)：回転ドラムによる粉粒体のサイズ分離現象

岩崎 大喜：(指導教員、稲垣紫緒)：粉粒体のサイズ分離現象についてのセルオートマトン

#### 修士論文

齊藤 圭太：(指導教員、木村康之)：光を用いたコロイド粒子の局所操作と局所力学物性測定

菅 真梨子：(指導教員、木村康之)：界面活性剤溶液中で自走する液晶液滴の運動

高田 哲弘：(指導教員、木村康之)：コレステリック液晶電気対流の構造とゆらぎのダイナミクス

小池 涼太郎：(指導教員、木村康之・岩下靖孝)：微粒子の異方性が Pickering emulsion へ及ぼす影響

吉原 公貴：(指導教員、木村康之・岩下靖孝)：金属-誘電体ヤヌス粒子の構造制御とその物性

荻原 僚：(指導教員、水野大介)：外力誘起流動化における濃厚コロイドの非線形マイクローロジー

梅田 勝比呂：(指導教員、水野大介)：細胞代謝活性と非平衡ダイナミクス ～細胞周期進行および細胞競合との関連～

棚町 昂平：(指導教員、水野大介)：遊走微生物由来の非熱的揺らぎによる生体高分子ゲルの構造緩和

大石 隼道：(指導教員、稲垣紫緒)：回転ドラムにおける粉粒体の分離現象

## 博士論文

西澤賢治：(指導教員、水野大介)：Universal Glass-Forming Behavior of Driven and Crowded Cytoplasm: Feedback-Controlled Microrheology

## 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 (稲垣)

## その他の活動と成果

高校生体験入学講師 (3月、岩下)

模擬授業(西南学院高等学校 11月13日、稲垣) 模擬授業(信男学園文来中学(中国、上海) 2月13日、稲垣)

# 複雑物性基礎

## 研究室構成員

鴫田昌之 教授

前多裕介 准教授

《 博士研究員 》

Ziane Izri

《 大学院 博士課程 》

福山達也

《 大学院 修士課程 》

上瀧守 別府航早 坂本 遼太 合屋 純

《 学部 卒業研究生 》

白木天晴 仲間聖

## 担当授業

物理学特別講義 C (前多)、物理学概論 B (前多)、基礎物理学実験・同演習 (前多)、非平衡物理学 (前多)、非線形物理学 (前多)

## 研究・教育目標と成果

### 1. 非平衡輸送現象の物理学 (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。さらに、Polyethylene glycol(PEG) 高分子水溶液中の温度勾配下では、Soret 効果と二次的な PEG 濃度勾配による拡散泳動の競合 (非平衡クロス効果) によって輸送される分子の空間分布に様々なパターンが現れること、細胞の運動制御への応用などが明らかとなっている。最近我々は、温度勾配を強制的に動かすことで 2 次元空間パターンに分子・細胞の分布を制御した際に、従来の輸送現象とは異なる流動の現象が発生することを見出した。本研究の目的は、PEG 水溶液中の動く温度勾配下で生じる流動のメカニズムを解明すること、そして流動を含む分子輸送制御の手法を構築することにある。

実験においてはPDMSチャンバーにPEG20000水溶液を封入し、赤外線レーザー(波長1480nm)を一定速度で円形スキャンし、動く温度勾配を実現した。すると温度勾配が動く方向とは逆向きに溶液の流れが生じることを見出した。レーザースキャン速度を上昇させるにつれて流れの速度は増加を示すが、あるレーザースキャン速度に達すると流れの速さが10.5 um/minでピークをもつ。さらに熱源が速く動くようになると、流れの速度は減少をし続ける。このように我々が発見した流動減少は、熱源の移動速度に依存して特徴的な時定数で効果が最大となる共鳴的な現象であることがわかった。

次に、動く温度勾配下の流動現象のメカニズムを解明するため理論モデルを構築した。その結果、流動がうまれる物理的機構とは、温度勾配の波が動くことで熱膨張・粘性変化・熱拡散の3つの効果のクロストークであることを明らかにした。理論と実験の定量的な比較の結果、我々の理論モデルが定量的にも実験結果を説明することを明らかにした。本手法を利用することで、マテリアルの電磁気学的な性質に依存しない分子操作法・分子整流法の開発が期待できる。さらに、ここで得た理論モデルは一見すると異なる現象にも関連することを見出している。光に応答して運動する細胞集団においても刺激の波と逆向きに集団運動が起こることが発見されている。我々が得た温度勾配下での流動の知見をもとに、動く光場下での集団運動を連続体として記述する理論モデルへの拡張を進めている。

## 2.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、11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55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。次に、指数関数的な濃度減衰を回避する非平衡条件を検討した結果、DNA 以外にも共存分子が存在する複雑な溶液系においては 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。

### 3. アクティブマターの物理学（前多、別府、合屋）

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

バクテリア大腸菌 *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 を薬剤処理し、細胞間のネマチック相互作用を制御する新規の系を構築した。さらに、表面処理を施した Polydimethyl siloxane チャンバーの微小容器内にバクテリア懸濁液を封入する手法を確立し、花型の境界形状をもつ微小容器内での集団運動を PIV（Particle Image Velocimetry）から解析を行った。その結果、回転集団運動が対をなした渦ペアが形成されること、渦の回転方向が同じ向き・反対向きの渦ペアが出現することが明らかとなった。渦ペア形成をもたらす要因を明らかにするため、Vicsek モデルとよばれる群れ運動に関する基礎的モデルを平均場近似の下で解析したところ、渦ペアの向きを反転する際に幾何学的な法則が存在することを発見した（Beppu, et al. Soft Matt. 2017）。さらに渦同士の相互作用にフラストレーションのある系において、渦の向きが変化する転移点にどのような影響が現れるかを検討している。バクテリア以外にも、ダイニン分子モーターやキネシン分子モーターに運ばれる微小管の集団が渦形成することが知られており、この渦形成を幾何形状の設計から理解する試みも進めている。

### 4. 人工細胞の合成生物学（前多、Izri、坂本）

“There ’s plenty of room at the bottom（原子分子スケールには情報を蓄える広大な地がある）” は今世紀最大の科学的挑戦の始まりの言葉である。我々は、目に見えない物質のスケールにまで工学を落とし込んだとき、「自然を模倣する」ことが最適な戦略であることに気づく。本研究の狙いは、原始的な生命がいかんして誕生したのかを明らかにするため、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、生命システムの設計原理を明らかにすることが本研究の目標である。

このような目標を達成するためには、新たな技術開発が必要となる。そこでマイクロ流体デバイスを用いて、リン脂質ベシクルに最小限の構成要素となるタンパク質群を封入するあらたな手法の開発を行った。5~10 ミクロンサイズのマイクロウェルを平面脂質二重膜でシールし、無細胞転写翻訳の遺伝子発現を行うマイクロ流体デバイスを作成する。このマイクロウェルを光硬化性 SU-8 フォトレジストを用いて構築する手法を検討し、脂質分子など界面活性剤でシールするプロトコルを開発した。さらに、リン脂質単分子膜に覆われた油中水滴（ドロップレット）にて無細胞転写・翻訳系における遺伝子発現を行ったところ、区画のサイズと遺伝子発現量が比例しない異常なスケーリング則が現れることを見出した。この性質は区画表面で mRNA からの翻訳が抑えられる枯渇層が形成されることで再現され、理論モデルから実験結果を説明することに成功した (Sakamoto, et al. bioRxiv 2018)。

## 発表論文

### 《 原著論文 》

1. Kazusa Beppu, Ziane Izri Jun Gohya, Kanta Eto, Masatoshi Ichikawa and Yusuke T. Maeda.

Geometry-driven collective ordering of bacterial vortices, *Soft Matter* 13, 5038-5043 (2017)

2. Tatsuya Fukuyama, Sho Nakama, Yusuke T. Maeda.

Thermal Molecular Focusing: Tunable Cross Effect of Phoresis and Advection, arXiv:1708.09489 (2017), Now published in *Soft Matter*

3. Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda.

Anomalous scaling of gene expression in confined cell-free reactions, bioRxiv (2018), Now published in *Scientific Reports*

《Proceedings》

4. 前多裕介, 界面駆動の流動と輸送 : 生命を捉える非平衡力学 物性研究 電子版 6(4), 064226 (2017)

## 講演

《 海外での講演 》

Yusuke T. Maeda: Design principle of collective phenomena: from gene expression to bacteria, The Rockefeller University, New York, USA, 2017年4月6日.

Yusuke T. Maeda: Geometry-driven collective ordering of bacterial vortices, Department of Physics, Arkansas University, USA, 2017年4月10日.

《 国内での講演 》

Shinpei Nogami, Takaharu Shiraki, Yusuke T. Maeda: Molecular transport and polymerization in the prebiotic field out of equilibrium, International conference on the Origin of Life -Synergy among the RNA, Protein, and Lipid Worlds-, The University of Tokyo, 2017年5月29-30日.

Yusuke T. Maeda: Collective ordering of active fluids and active gels, 研究会 : アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性, 函館グリーンホテル, 2017年9月11-12日.

前多裕介: 界面駆動の流動と輸送 : 生命を捉える非平衡力学, 物性若手夏の学校, 2017年7月25-26日.

前多裕介: Physics and Biology of Active Matter, 岡崎統合バイオサマースクール 2017「生命システムの時空間設計」, 2017年8月17-18日.

Ziane Izri, Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda: Minimal cells on a chip, 日本生物物理学会, 熊本大学, 2017年9月19-21日.

別府航早, Ziane Izri, 市川正敏, 前多裕介: 境界形状が導くバクテリア渦形成の集団的秩序, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学, 2017 年 9 月 23-24 日.

福山 達也、前多 裕介: 動く温度勾配が誘起する流れと分子集束, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学, 2017 年 9 月 23-24 日.

前多 裕介: 非平衡ソフトマターが導く生命現象の物理学, NTT 物性科学研究所セミナー, NTT 物性科学研究所, 2017 年 9 月 29 日.

Kazsa Beppu, Ziane Izri, Masatoshi Ichikawa, Yusuke T. Maeda: Geometric principle for controllig active bacterial vortices, 細胞を創る研究会 10.0, 京都大学, 2017 年 10 月 19-20 日.

Ziane Izri, Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda: Artificial cells-on-a-chip: Cell-free gene expression in microwells, 細胞を創る研究会 10.0, 京都大学, 2017 年 10 月 19-20 日.

福山達也, 前多裕介 : Tunable, Anisotropic Trapping of Molecules: Interplay between Non-Equilibrium Hydrodynamics and Phoretic Transports, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 仙台国際会議場, 2017 年 11 月 20-23 日.

別府航早, Ziane Izri, 市川正敏, 前多裕介 : Geometry-Driven Collective Ordering of Bacterial Vortices, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 仙台国際会議場, 2017 年 11 月 20-23 日.

坂本遼太, 前多裕介, 田邊優敏, 石渡信一, 宮崎牧人 : Symmetry Breaking of Cluster Positioning Induced by F-Actin Flow inside Controlled Geometry, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 仙台国際会議場, 2017 年 11 月 20-23 日.

Ziane Izri, Vincent Noireaux, 前多裕介 : Artificial-cells-on-a-Chip: Cell-Free Gene Expression in Microwells with Various geometries, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 仙台国際会議場, 2017 年 11 月 20-23 日.

白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介: Enhanced Synthesis of Genetic Polymer Mediated by Non-random Ligation in a Temperature Gradient, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 仙台国際会議場, 2017年11月20-23日.

合屋純, 別府航早, 前多裕介: Geometric Transition of Collective Active Vortices: Mean-Field Analysis and Numerical Simulation, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 仙台国際会議場, 2017年11月20-23日.

前多 裕介: 非平衡ソフトマターと生命現象の物理学, 富山大学テニユアトラック制度シンポジウム, 富山大学, 2017年11月23日.

前多 裕介: 非平衡系の輸送・流動・運動, 福岡工業大学土曜談話会, 福岡工業大学, 2017年12月25日.

別府航早, Ziane Izri, 前多裕介: 集団運動におけるフラストレートされた渦運動とその制御, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月22日.

坂本遼太, 前多裕介, 田邊優敏, 石渡信一, 宮崎牧人: 境界形状が誘起するアクトミオシンの周期的な収縮現象と対称性の破れ, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月22日.

坂本遼太, Vincent Noireaux, 前多裕介: 表面を介したセルフリー遺伝子発現の幾何的制御, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月22日.

福山達也, 青木一洋, 前多裕介: 上皮細胞の集団運動の連続体記述と光制御, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月22日.

前多裕介: 生命の成り立ちを極限環境と物理学で探る, 慶応アストロバイオロジーキャンプ2018, 慶応大学, 2018年3月27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 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)

2. 前多裕介、科学研究費補助金 新学術領域研究「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)

3. 前多裕介、科学研究費補助金 新学術領域研究「バクテリア集団運動にみるアクティブ液晶の秩序形成と制御」(研究代表)

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

4. 前多裕介、Human Frontier Science Program、研究 Grant「Towards self-reproduction of protocells and minimal cells: Evolution versus engineering」(研究分担、代表：Vincent Noireaux (Minnesota Univ.))

5. 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)

**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)**

6. 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)

**学部4年生卒業研究**

白木天晴 (指導教員：前多)：遺伝情報分子の情報成長の非平衡統計力学  
仲間 聖 (指導教員：前多)：ゆらぎに基づく非平衡クロス効果の理論解析

**修士論文**

上瀧守 (指導教員：鵜田) アガロースゲルの相転移構造と摩擦係数

**その他の活動と成果**

## 2017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、今年度から羽場宏光氏（理化学研究所 RI 応用チーム チームリーダー）が、2018年度までの2年間、客員教授に着任した。

今年度は、理研仁科加速器研究センターにおいて、重元素グループの院生と共同で新元素の合成実験で必要となる Cm 標的の作成や、AVF サイクロトロン施設におけるビーム照射テストを行われた。また、データ解析に関する指導を行っていた。

文責：森田浩介

平成29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	八尋正信 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 羽場宏光+	若狭智嗣 寺西高 坂口聡志		藤田訓裕
物性理論	福田順一		松井淳	
統計物理学	中西秀	野村清英		坂上貴洋
凝縮系理論		河合伸 成清修		
磁性物理学	和田裕文	光田暁弘		
量子微小物性	渡部行男			荒井毅++
固体電子物性	木村崇			山田 和正 大西 紘平
光物性		佐藤琢哉		
低次元電子物性	矢山英樹+++			
複雑物性基礎	木村康之	水野大介 稲垣紫緒		岩下靖孝
複雑流体	鶴田昌之	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29年度各種委員

(○は委員長)

部門長・学科長・専攻長：鈴木

副部門長：鵜田、木村(崇)

将来計画委員：○中西、木村(崇)、川越、木村(康)、前多、東城、鈴木

教育課程委員：○木村(崇)、鵜田、八尋、渡部、清水、河合、若狭、水野、前多、野村、坂口、松井、松本

入試委員会委員長(全ての入試関連委員会の統括)：中西

助の会幹事：末原

社会連携委員：○渡部

奨学金資格検討委員：○橋本、和田、東城、成清、前多

経理委員：○川越、木村(康)

業績評価部会：○木村(崇)、八尋

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、河合、水野、末原、奥村

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

体験入学・入学オリエンテーション実施委員：○水野、岩下、坂上、藤田、

未来の科学者：○鵜田、渡部、佐藤

理学部便り編集委員：大西

学生生活・修学相談員：○松井、坂口

障害学生支援：鵜田、河合、坂口、寺西

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

## H29 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

題目：液晶のコレスティックブルー相とその共焦点顕微鏡像の計算

(Photoexcited spin-polarized and/or spin current from nonmagnetic surfaces)

講師：福田 順一 氏 (九州大学大学院理学研究院・教授)

日時：5月9日(火) 15:00～

場所：ウエスト1号館A棟7階711号室(W1-A-711)

### 第2回物理学教室談話会

講演題目：密度汎関数理論で原子核反応を記述する： $r$  過程中中性子捕獲と非束縛中性子過剰核の共鳴

講師：松尾 正之 氏 (新潟大学理学部・教授)

日時：7月20日(木) 16:00 - 17:30

場所：ウエスト1号館A棟7階722号室(物理セミナー室2)

### 第3回物理学教室談話会

講演題目：四元数を用いたランダムウォーク生成法と結び目高分子およびトポロジカル高分子の研究

講師：出口 哲生 氏 (お茶の水女子大・教授)

日時：7月27日(木) 16:30 - 17:30

場所：ウエスト1号館A棟7階711号室(W1-A-711)

### 第4回物理学教室談話会

講演題目：Carving out the space of Quantum Gravity

講師：Prof. Yu-tin Huang (National Taiwan University)

日時：10月24日(火) 16:00 - 17:30

場所：ウエスト1号館A棟7階722号室(W1-A-722)

### 第5回物理学教室談話会

講演題目：中性子過剰核  $^{31}\text{Mg}$  における変形共存の発見  
～平均場と核子間相関の微妙なせめぎ合い?

講師：下田 正 氏 (大阪大学大学院理学研究科・教授)

日時：11月16日(木) 16:30～

場所：ウエスト1号館A棟7階711号室(W1-A-711)

第6回 物理教室談話会

講演題目：食物網の構成と移入・絶滅のダイナミクス

講師：土井 正男 氏（北京航空航天大学・教授）

日時：11月30日(木) 16:40～

場所：ウエスト1号館B棟2階211号室 (W1-B-211)

第7回 物理教室談話会

講演題目：すばる望遠鏡 HSC を用いた活動銀河核探査

講師：長尾 透 氏（愛媛大学・教授）

日時：12月12日(火) 16:00～17:00

場所：ウエスト1号館A棟7階701号室 (W1-A-701)

第8回物理学教室談話会

講演題目：ここまで進んだ SOI センサーの開発

講師：幅 淳二 氏（高エネルギー加速器研究機構・教授）

日時：12月21日 16:40～

場所：ウエスト1号館B棟2階212号室 (W1-B-212)

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：中村 優男 氏（理化学研究所・上級研究員）

日程：1月16日(火) 17:00～18:00

場所：ウエスト1号館B棟2階212号室 (W1-B-212)

第10回物理学教室談話会

講演題目：スイマー・マイクロレオロジー

講師：好村 滋行 氏（首都大学東京・准教授）

日時：1月24日(水) 14:50～16:20

場所：ウエスト1号館A棟7階711号室 (W1-A-711)

第11回物理学教室談話会

講演題目：うすい構造物（弾性リボン、シェル、折り紙状のもの）に関するいくつかの話題

講師：和田 浩史 氏（立命館大学理工学部物理科学科・教授）

日時：1月30日(火) 17:00～18:00

場所：ウエスト1号館B棟2階212号室 (W1-B-212)

第 12 回 物理学教室談話会

講演題目 : N=1 superfield description of 6D SUGRA and its effective theory

講師 : 阪村 豊 氏 (高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所)

日時 : 2 月 8 日 (水) 16:00 - 17:30

場所 : ウエスト 1 号館 A 棟 7 階 722 号室 (W1-A-722)

第 13 回 物理学教室談話会

講演題目 : Charm Physics at the BESIII Experiment

講師 : Prof. Hai-Bo Li (中国科学院高能物理研究所 (IHEP) ・教授)

日時 : 2/20(火) 16:30 - 18:00

場所 : ウエスト 1 号館 B 棟 2 階 212 号室 (W1-B-212)

## 2017 年度九大原子核セミナー

講師:明 孝之 氏(大阪工業大学)

演題:New variational method of tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics

2018 年 3 月 13 日

講師:Jirina Stone 氏(Tennessee 大学)

演題:Superheavy nuclei in the Quark-Meson Coupling model

2018 年 3 月 1 日

講師:山口 康宏 氏(理化学研究所 仁科加速器研究センター肥山ストレンジネス核物理研究室)

演題:Hadronic molecules in the heavy flavor sector

日時:2018 年 2 月 23 日

講師:佐川弘幸 氏(会津大学/理研)

演題:IS and IV pairing correlations and Spin-Isospin Response

2018 年 2 月 6 日

講師:池田陽一氏(阪大 RCNP)

演題:The Tetraquark Candidate  $Z_c(3900)$  from coupled-channel scattering on the lattice

2018 年 1 月 22 日

講師:原田 浩司 氏(九州大学)

演題:核子系有効場理論 - 繰り込み群と格子シミュレーション

2017 年 12 月 27 日

講師:小林 良彦 氏(九州大学基幹教育院 次世代型大学教育開発センター)

演題:低エネルギーs 波散乱が受ける対相関効果の S 行列による分析

日時:2017 年 12 月 25 日

講師：井坂 政裕 氏 (大阪大学 RCNP)

演題：Impurity effects in hypernuclei with antisymmetrized molecular dynamics

日時：2017 年 10 月 10 日

講師：吉田 数貴 氏 (大阪大学 RCNP)

演題：ノックアウト反応で探る原子核の 1 粒子およびアルファクラスター構造

2017 年 7 月 27 日

講師：Anton Nikolaev Antonov 氏 (Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences)

演題：Volume and surface contributions to the nuclear symmetry energy  
within the coherent density fluctuation model

2017 年 5 月 11 日

平成29年度非常勤講師一覧

講師	所属	題目
松尾正之	新潟大学	不安定核の相関・励起と原子核密度汎関数理論
長尾透	愛媛大学	可視光・赤外線観測による宇宙の探査
土井正男	北京航空航天大学	ソフトマターの動力学におけるオンサガーの原理
下田正	大阪大学	ベータ崩壊で探る不安定核の特異な核構造
出口哲夫	お茶の水女子大学	紐の物理と数理
中村優男	理化学研究所	強相関電子物性と外場制御
好村滋行	首都大学東京	非平衡系のマイクロレオロジー
和田浩史	立命館大学	うごき、かたち、成長、機能：生物を力学的に考える
Yu-tin Huang	国立台湾大学	S-matrix, an on-shell approach to QFT
Hai-Bo Li	中国高能研究所	CP Violation
幅淳二	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	粒子検出器特論
阪村豊	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	超重力理論入門

平成29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
慶北大学 理化学研究所・RENO project collaborating researcher	韓国	共同研究のため	29年5月10 日～29年6 月9日	坂口
成均館大学校・大学院 生・Kim Duhyun	韓国	共同研究のため	29年8月8 日～29年8 月11日	寺西
成均館大学校・准教 授・Chae Kyungyuk	韓国	共同研究のため	29年8月8 日～29年8 月11日	寺西
成均館大学校・大学院 生・Cha Soomi	韓国	共同研究のため	29年8月8 日～29年8 月11日	寺西
南京大学理学部物理学 科・学生・Qi Meng	中華人民共 和国	共同研究のため	29年11月 12日～30年 2月7日	肥山
南京大学理学部物理学 科・学生・Qian Wu	中華人民共 和国	共同研究のため	29年11月 12日～30年 2月7日	肥山
University of Mainz・ 教授・Mzthias Klau	ポーランド	共同研究のため	29年12月6 日～29年12 月11日	木村(崇)
Ecole Polytechnique・ 上席研究員・Stephane Callier	フランス	共同研究のため	29年10月 10日～29年 10月13日	末原
CNRS/LLR 研究所・所 長・Jean-Claude Brient	フランス	共同研究のため	29年12月 10日～29年 12月11日	川越
CNRS/LLR 研究所・エン ジニア・Jerome Nanni	フランス	共同研究のため	29年12月 10日～29年 12月11日	末原

所属・職・氏名	国籍	受入の目的	受入期間	受入者
高麗大学・教授・Lee kyung Jin	韓国	研究打合わせ	30年1月26 日～30年1 月30日	木村(崇)
蘭州大学・教授・Wang Jianbo	中華人民共 和国	共同研究のため	30年2月1 日～30年2 月10日	木村(崇)
蘭州大学・教授・Liu Qingfang	中華人民共 和国	共同研究のため	30年2月1 日～30年2 月10日	木村(崇)
Charles University・ 上席研究員・Jaroslav Hamrle	ドイツ	研究打合わせ	30年2月24 日～30年3 月7日	木村(崇)
Charles University・ 学術研究員・Roman Antos	チェコ	共同研究のため	30年3月10 日～30年3 月17日	木村(崇)
University of Science and Techno・教授・呉 明衛	中華人民共 和国	研究打合わせ	30年3月24 日～30年3 月31日	木村(崇)

## 2017 年度教育課程委員会活動報告

木村 崇

2017 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	八尋、鵜田
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、鵜田
過年度担当	松井、鵜田
学生実験	若狭、坂口
特研配属	清水
カリキュラム	野村
基幹教育科目	鵜田
アンケート	松本、八尋
授業参観	河合
文書確認	渡部、鈴木、木村

2017 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ようになる：

- ・ 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

- ・ 2017年度からの基幹教育カリキュラムの変更点の点検と検討
- ・ 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
- ・ 国際コース設置に関連する調整
- ・ 学部入学者に係る個人用パソコンの仕様の設定
- ・ 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
- ・ 2018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プメント（FD）「物理学部門 教育支援室の活動報告」（松井 淳 先生（理学研究院 物理学部門））の開催
- ・ 理学研究院・物理学部門ファカルティディベロプメント（FD）「キャンパスライフ・健康支援センターにおける相談、連携について」松下 智子 先生（基幹教育院 学修・健康支援部門）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
- ・ 2016年度入学者対象のコース配属予備調査
- ・ 特別研究生配属調整
- ・ 次年度進級・新入生・編入生ガイダンス計画
- ・ コース配属
- ・ 次年度理学部・理学府履修の手引きの確認作業

教育課程委員会が、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、2018年度からの国際コースの導入への対応などが挙げられる。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29年度 物理学部門ファカルティ・ディベロップメント報告

### 「物理学部門における学修教育支援の現状と課題」

開催日時：平成28年12月22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、「学修・教育・キャンパスライフの支援活動」をテーマにファカルティ・ディベロップメントを行った。全教員を対象として第1部「学習教育支援」の議論を開始するに先立ち、本部門・講師の松井淳先生に「物理学部門 教育支援室の活動報告」の題目で講演を行って頂いた。

物理学部門では新たに教育支援室を設置し、学習面のサポートを行っている。講演では支援室の活動報告と問題点、そして今後の課題が述べられた。学生の参加は前期よりは後期の方が多く、後期に開講されている科目に関係していると考えられる。補習は毎回2時間程度で人数は10人ほどで、何でも質問できる環境を構築している。最後まで参加した学生は最終的に単位を取得できているが、途中で不参加となった学生にも居場所があることが重要であり、教育支援の効果は「学習×居場所」で上がっていくという説明から、次年度のTAの人数や教育支援室の方針を現状のように継続することを確認した。

続いて、第2部「キャンパスライフ支援」の議論を開始するに先立ち、基幹教育院 学修・健康支援部門 准教授の松下 智子先生に「キャンパスライフ・健康支援センターにおける相談、連携について」の題目で講演を行って頂いた。学習面と生活・健康面の支援は切り離せず、そのため学内には健康相談室や学生相談室などの生活支援室が設置されている。生活支援室に訪れる学生が抱える典型的な問題や、教員・学生の意思疎通のあり方等について説明を頂いた。スモール・ステップの原理で達成感を得ながら学習や研究に励むこと等を議論し、また達成感を得やすい環境づくりについて意見交換が行われた。さらに学生が抱える問題点の共有について、聞く姿勢を保つことの重要性お話し頂くことで、本学における学習教育支援のあり方について議論する参考となった。

上記に関する議事的全記録が収録されている報告書を作成し、議論の詳細をそこに記した。

平成29年度 入学者数と卒業生数

	入学者数	卒業生数
物理学科	61	55
物理学科3年次編入	—	—
修士課程（物理学専攻）	37	43
博士課程（物理学専攻）	3	博士学位取得者6

## 2017年度の就職・進学状況

2017年も昨年に引き続き、求人は増えており、経済の回復基調に拍車がかかった様子が求人状況からも伺える。企業と学生の接触の解禁が3月となり、企業の入社選考開始は6月1日であるため、学生、企業双方とも短期決戦の様相が強くなり、双方ともその知名度と個人差による2極化が強まる傾向にある。今後も就職活動期間の短縮化、およびインターンシップの増加に伴う事前選考の傾向は今後も進んでいくとみられ、従前問題となっていた就職活動期間の短縮化が、非明示的な就職期間の拡大を加速していることが懸念される。基本的に「九大ブランド」が学生に付加価値をもたらしているが、逆に、これに甘んじ自己研鑽を怠ってきた学生にとっては障害になっていることも懸念される。今後ますます学生の能力差が就職活動に与える影響が大きくなると考えられ、会話やプレゼンテーションなどの自己発信能力やエントリーシートなどにおける文章力などの基礎的な能力の涵養も学部・大学院教育でも重要になると思われる。

就職先は例年通り多岐にわたっているが、求人に関しては情報関連企業が急増している。ことに人工知能や自動運転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

2017年度の修了者は44名で、このうち、博士課程進学者が10名、民間企業32名、地方公務員2名（佐賀県庁、沖縄県庁）であった。民間企業の主な就職先は、日立製作所、富士通、パナソニック、デンソー、東京エレクトロン、村田製作所、カプコン、ソニーセミコン、ソニーLSIデザイン、ヤフー、旭硝子、ライオン、コニカミノルタ、日本航空、大和証券などである。

### 博士の進路・就職

博士課程修了者は5名であり、民間3名、PD2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41名（九大物理34名、他学府5名、他大学2名）、公務員2名、教員1名、民間企業就職3名、未定3名であった。九大の他学府の進学者が5名と多く、物理学専攻の大学院としての求心力がやや低下している点が気にかかる。

## 第21回 体験入学・公開講座報告

担当:水野大介

平成30年3月26日(月)～27(火)の2日間にわたって、「第21回体験物理学」を実施した。以前は休みの期間に高校1・2年生を対象として3日間実施してきたが、アンケートで3日通うのは大変であるとの意見が多く寄せられたことから、9年前から期日を2日間に短縮して実施している<sup>注1</sup>。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<sup>注2</sup>。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3名で、こちらは例年と比べて若干参加人数が少なかった。実際のセミナー・実験の内容、スケジュール、担当者は下記のプログラムに示す。体験入学参加者の住所は福岡を中心に、大分、長崎、佐賀、鹿児島、愛媛など広範囲にわたっている。最終日に閉校式を行い、今後の改善のためにアンケートをお願いした。体験入学に2日間参加した高校生に対して全般の感想について聞いた結果を最後のグラフに示す。興味(面白い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。全体のアンケートで、「面白くて難易度もちょうど良い」と「面白いが難しい」がほぼ同数であり、概ね好評であったと考えている。実験では「面白くて難易度もちょうど良い」が圧倒的に多かった。

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。

### [開講日程・内容]

	3月26日(月)		3月27日(火)
10:00 ~ 11:00	開校式	10:00～10:05	実験の注意
11:10 ~ 12:00	「柔らかいものの物理」 (福田教授)	10:10～12:10	実験(A～Gから1つ)
12:00 ~ 13:30	昼休み	12:10～13:10	昼休み
13:30 ~	「ミクロの世界と素粒子の謎」	13:10～13:15	集合

14:20	(奥村助教)		
14:30 ~ 15:20	「ビッグバンと宇宙天体を見る」(橋本教授)	13:20~15:20	実験(A~G から 1 つ)
		15:30~15:45	閉校式

[実験テーマ]

- |                         |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|
| A. 物質を透過する粒子線<br>る~     | E. BZ 反応 ~化学反応が「振動」す              |
| B. 極低温の世界               | F. 光の回折と波の不思議<br>-波動の重ね合わせと高校・大学の |
| C. 超伝導を体験する<br>数学-      |                                   |
| D. エントロピー:ゴムの伸び縮みを考察しよう | G. 身の回りの放射線を調べよう                  |

## 平成29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) 宮崎県立小林高等学校

10月14日（土） 2年生対象 10名程度  
光田 暁弘 准教授

##### 2) 福岡県立小倉高校

6月20日（火） 2年生対象 30名程度  
岩下 靖孝 助教

##### 3) 福岡県立伝習館高等学校

11月15日（水） 1～2年生対象 35名程度  
松本 琢磨 助教

##### 4) 西南学院高等学校

11月13日（月） 2年生対象 20名程度  
渡部 行男 教授

### 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29年8月10日

物理学部門の講演は、

野村清英 准教授（物性理論） 「トポロジーのめがね トポロジカル絶縁体」

末原大幹 助教（素粒子実験） 「ILCについて」

（委員 渡部行男教授）。

### 3) 先端科学体験事業（体験物理学）

実施日：平成30年3月26日(月)～27(火)

対象：高校1，2年生，高専生3，4年生

委員 水野准教授 取りまとめ

内容：大学での物理学を実験・実習とセミナーを通して2日間体験してもらう。

#### セミナー

1. 柔らかいものの物理 (福田 順一教授)

2. ミクロの世界と素粒子の謎 (奥村 健一助教)

3. ビッグバンと宇宙天体を見る (橋本 正章教授)

#### 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. BZ 反応 ～化学反応が「振動」する～ (岩下 靖孝 助教)

F. 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)

G. 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26日(月)		3月27日(火)
10:15 ~ 11:00	開校式	10:00 ~ 10:05	実験の注意
11:10 ~ 12:00	「柔らかいものの物理」 (福田 順一教授)	10:10 ~ 12:10	実験(A~G から1テーマ)
12:00 ~ 13:30	昼休み	12:10 ~ 13:10	昼休み
13:30 ~ 14:20	「ミクロの世界と素粒子の謎」 (奥村健一助教)	13:10 ~ 13:15	集合
14:30 ~ 15:20	「ビッグバン宇宙・星の進化・超新星・ブラックホール」(橋本正章教授)	13:20 ~ 15:20	実験(A~G 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29年 3月26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29年度オープンキャンパス

実施日：平成28年8月6日(日)

内容：研究室見学、講義を行った

**6) 未来の科学者養成講座「エクセレント・スチューデント・イン・サイエンス 育成プロジェクト」(JSTの委託事業)**

委員 鴫田昌之 教授 渡部行男 教授 佐藤琢也 准教授

平成29年9月～平成30年3月 毎月第2、第4土曜日に、本部門名誉教授等により、理学部で行った。

また、公開講演会(平成29年11月28日(土))で、本物理学専攻修士課程 山城 大知 氏が、「素粒子と宇宙の謎に迫るー国際リニアコライダー計画ー」を理学部で講演した。