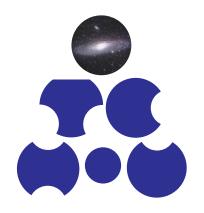
筑波大学 数理物質系宇宙史研究センター

2018 年度 活動報告書



宇宙史研究センター 2019 年 7 月

はじめに

筑波大学宇宙史研究センター(Tomonaga Center for the History of the Universe: 朝永センター)は、宇宙の創生と物質・生命の起源を数理的手法で研究し、宇宙史の統一的理解を目的として、2017 年 10 月 1 日に設立された研究センターです。

私たちの宇宙がどのようにして生まれ、現在の姿に辿りついたのかは、人類の持つ根源的な問いです。 宇宙の歴史は、その開闢以来さまざまな出来事が起こりましたが、それらのダイナミカルな帰結として、現在の宇宙を説明する必要があります。 多くの先端研究がなされてきましたが、まだ解明すべき謎(宇宙史の暗黒部分)が数多く存在します。宇宙史研究センターは、宇宙史の暗黒部分の解明を飛躍的に加速させ、時空の創世から、宇宙の物質創成、生命誕生に至るプロセス全貌の統一的理解に向けた描像の構築と新たな学問分野の創出・牽引を目指しています。

この報告書は、宇宙史研究センターの、2018 年度の活動実績をまとめたものです。センターの活動記録等 については、センターのウエブサイト

http://www.pas.tsukuba.ac.jp/~TCHoU/

も御参照下さい。

2019 年 7 月 宇宙史研究センター長 金 谷 和 至

目次

| 第I部 | 全体報告 | 1 |
|-----|--|----|
| 1 | 2018 年度活動概要 | 3 |
| 2 | 宇宙史研究センターについて | 5 |
| 2.1 | 研究目的 | 5 |
| 2.2 | 朝永センターの名称について | 6 |
| 2.3 | 宇宙史研究センターの構成 | 7 |
| 2.4 | 宇宙史研究センターの運営体制 | 8 |
| 2.5 | 宇宙史研究センターの活動スペース | 9 |
| 3 | 構成員 | 10 |
| 3.1 | | 11 |
| 3.2 | 海外教育研究ユニット招致 | |
| 3.3 | クロス・アポイントメント教員 | 12 |
| 3.4 | その他の人事制度の活用 | 13 |
| 3.5 | 研究員 | 13 |
| 4 | 受賞 | 14 |
| 4.1 | 本多俊介氏 第 13 回 (2019 年) 物理学会若手奨励賞 (2018/10) | 14 |
| 5 | 各種会議 | 15 |
| 5.1 | 構成員会議 | 15 |
| 5.2 | 運営協議会 | 17 |
| 5.3 | 運営委員会 | 19 |
| 6 | 研究集会・セミナー | 20 |
| 6.1 | 5th International Workshop on "Universe Evolution and Matter Origin" | 20 |
| 6.2 | Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices | 22 |
| 6.3 | 第3回3次元積層半導体量子イメージセンサー研究会 | 22 |
| 6.4 | 第 1 回 TCHoU ワークショップ | 23 |
| 6.5 | International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE | 23 |
| 6.6 | 第 4 回 TIA 光・量子計測シンポジウム | 24 |
| 6.7 | 宇宙史セミナー | 24 |
| 7 | 一般向け広報活動 | 28 |
| 7.1 | 平成 30 年度 (第 59 回) 科学技術週間 | 28 |
| 7.2 | 第 10 同天文字宙の七夕講演会 | 20 |

| 7.3 | 筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示「宇宙の歴史の暗黒部分を解明する」 | 29 |
|-----|--|-----|
| 8 | 2018 年度会計報告 | 30 |
| 第Ⅱ部 | 研究部門活動報告 | 33 |
| 9 | 南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy) | 35 |
| 10 | 素粒子構造研究部門 (Division of Elementary Particles) | 44 |
| 11 | クォーク・核物質研究部門 (Division of Quark Nuclear Matters) | 70 |
| 12 | 光量子計測器開発部門 (Division of Photon and Particle Detectors) | 93 |
| 第Ⅲ部 | | 105 |
| 13 | センター細則 | 107 |
| 14 | ロゴ | 109 |
| 15 | 競争的資金獲得状況 | 110 |
| 16 | 共同研究・受託研究 | 111 |
| 17 | 各種受賞等 | 111 |
| 18 | 新聞等報道・特記事項 | 111 |
| 19 | 学会活動・各種委員等 | 112 |

第1部 全体報告

1 2018 年度活動概要

筑波大学宇宙史研究センター (TCHoU) の 2018 年度活動概要を、図 1~ 図 2 に示す。

● 研究体制構築/拡充

- 南極天文台プロジェクトの推進:30cm小型望遠鏡@Dome-C, 関西学院大学との 連携強化
- ●オランダ Utrecht ユニットとの連携強化(QGP分野):副PI採用
- フランス Grenoble大学との連携強化(宇宙史全分野):共同研究, CiCの拡大、 ユニット招致の可能性?
- ●原研との連携強化:QGP分野の全国的将来計画に向けて
- 卓越大学院「138億年史学位プログラム」: hearingまで進むも不採択、2019年度に向け再構築

♠ 人事異動

- 久野成夫教授:南極天文研究部門長就任
- ●中井直正教授:2018/7/1 筑波大CA教授着任
- ●大川英希助教:国際TT助教 => テニュア獲得, 2018/4/1テニュア助教着任
- ●Nobert Novitzky 助教: 2018/6/1着任 (QGP分野 ユトレヒト ユニット副PI)
- ●三明康郎教授: 2019/1/1 原研 CA職員 (10%)
- ●QGP分野 国際TT: 2018/12 国際公募 => 2019/7着任予定
- ●佐藤勇二助教(素粒子構造部門) ⇒ 2019/3/1 福井大学APに転出

構成員会議/成果報告会

學各種報告・活動報告に基づき、現状認識の共有と方向性の審議・意見交換・分野交流の場として

ਊ年に2回程度開催

組織図に位置付けを明記

● 第1回:2018/06/04 (報告+11講演) ● 第2回:2018/11/22 (報告+10講演)

東京協議会 Stearing Committee 東京政策会 東京政策会 「Div. of Annarctic Astronomy 東拉子構造研究部門 Div. of Elementary Particles クオーク・核物質研究部門 Div. of Quark Nuclear Matters 政治研究会議 Office for Integrated Dessenther N. 宣子計画器開発部門 Div. of Photon and Particle Detectors

● 運営委員会

●センターの事業計画、予算、施設の管理、などに関することを審議・決定●毎月1回開催(8月を除く)

- 運営委員:センター長、副センター長、4部門長、(その他センター長が指名する者:現在空席)
- オブザーバー:小澤教授
- 2018年度 04/10, 05/14, 06/11, 07/09, 09/10, 10/09, 11/12, 12/10, 01/15, 02/12, 03/11

➡ 運営協議会

(2019年度も、CCSとの連携を担う役割でCCS教授として留任。)

帰センターの運営方針、研究活動評価、などに関することを協議

- 委員:新井康夫教授(KEK)、小林秀行教授(NAOJ)、梅村雅之教授(CCSセンター長)、 櫻井鉄也教授(C-AIRセンター長)、齋藤一弥教授(PAS系長)、運営委員会委員
- 2019/02/05 2018年度第1回運営協議会(TCHoU workshopと連続)

図 1 宇宙史研究センター 2018 年度活動概要 (1)

➡ 研究集会

2018/09/21 TGSW2018 5th WS on "Universe Evolution and Matter Origin"

@ EPOCHAL, Tsukuba



- ☞ 講演:11
- ☞ 参加者数:54名(海外から13名)
- Satellite meetings (Grenoble との協力体制構築に向けて)



- ♥ 講演:11, 参加者数:18名(海外から4名)
- ♥ 日米科学技術協力
- 2019/01/28 第3回3次元積層半導体量子イメージセンサー研究会@EPOCHAL, Tsukuba
 - ☞ 講演:7, 参加者数:55名
 - ▼ TIAかけはし
- 2019/02/04-05 第1回TCHoUワークショップ
 - ♥ 講演:36, 参加者数:89名
- 2019/03/07-09 International Workshop on "Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE"
 @ CCS. Tsukuba
 - ☞ 講演:29, 参加者数:40名(海外から9名)
 - ALICE Collaboration
- 2019/03/08 第4回 TIA 光・量子計測シンポジウム @ EPOCHAL, Tsukuba
 - ♥ 講演2 + ポスター48
 - ஓ 参加者数:33

宇宙史セミナー

- 2018/07/27 飯田佑輔氏(関西学院大学)"太陽ダイナモ問題",中野佑樹(東大宇宙線研)"太陽ニュートリノ"
- 2018/11/15 Yi Wang氏 (Tsinghua Univ.) "Development and production of high rate Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) for CBM-TOF at FAIR and STAR-eTOF at RHIC"
- 2018/12/10 Jinfeng Liao氏 (インディアナ大) "Chirality, Vorticity and Magnetic Field in the Subatomic Swirls"
- 2018/12/14 音野瑛俊氏(九大)"FASER実験 LHCビーム衝突点の超前方における長寿命粒子探索と高エネルギーニュートリノ研究"
- 2019/01/17 Soo-Bong Kim氏 (ソウル大) "Variation of Observed Reactor Antineutrino Yield at RENO"
- 2019/02/27-28 北澤正清氏(阪大)集中セミナー "流体方程式と格子数値解析"
- 2019/03/11 Marco van Leeuwen(ユトレヒト大) "Probing the Quark Gluon Plasma with energetic partons", Thomas Peitzmann(ユトレヒト大) "Photon production in high-energy heavy-ion reactions"

● 一般向け広報活動

- 2018/04/21 科学技術週間展示 来場者数:延350名(内、青少年175名)
- 2018/11/03-04 筑波大学学園祭「雙峰祭」研究紹介 来場者数:延720名

● 受賞など

2018/10/25 本多俊介氏: 第13回(2019年)物理学会若手奨励賞

2018年3月に本学卒業の本多俊介氏(現 京大PD)が、博士論文 "Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector"(指導教員: 原准教授)で受賞

図 2 宇宙史研究センター 2018 年度活動概要 (2)









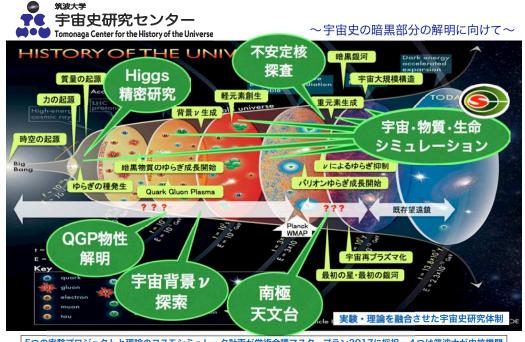
宇宙史研究センターについて 2

筑波大学宇宙史研究センター(Tomonaga Center for the History of the Universe: 朝永センター)は、宇 宙の創生と物質・生命の起源を数理的手法で研究し、宇宙史の統一的理解と新たな学問分野の創出・牽引する ことを目的としている。そのために、素粒子物理学、原子核物理学、宇宙物理学分野をわたる理論と実験・観 測研究の融合を推進、宇宙史研究の国際共同研究拠点を形成する。なお、センターの英語略称は「TCHoU」 とし、「チャオ」と読む。

2.1 研究目的

Mission:

- construction of integrated view on the History of the Universe
- by clarifying key processes in the dynamical evolution of the Universe
- through interdisciplinary and international cooperations of particle physics, nuclear physics and astrophysics



5つの実験プロジェクトと理論のコスモシミュレータ計画が学術会議マスタープラン2017に採択、4つは筑波大が中核機関

- ☑ 生命につながる元素の起源?
- ☑ 宇宙の構造の起源? 力・物質・時空の起源?
- ☑ 実験的に未解明の領域(暗黒)が多く残されている。
- 宇宙・素粒子・原子核の最先端理論・実験プロジェクトを融合
- 現象とメカニズム・プロセスの同時解明
- ⇒ 物質と生命の起源に迫る新領域の国際的研究ネットワークを形成

図 3 宇宙史研究センターの研究目的

筑波大学では、素粒子実験分野、原子核実験分野、宇宙観測分野の5つの大型実験プロジェクトが、日本学 術会議マスタープラン 2017 で、国をあげて推進すべき重点的研究計画に採択されている(筑波大学を中核機 関とする「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索」、「高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・

プラズマ相の解明」、「南極望遠鏡計画」、及び、筑波大学を推進機関に含む「RI ビームファクトリーの高度化による重元素科学の躍進」、「高輝度大型ハドロン衝突型加速器 (HL-LHC)による素粒子実験」)。理論面でも、筑波大学 計算科学研究センター (CCS)を中核機関とする「コスモ・シミュレータの開発 -宇宙の始まりから生命の誕生に至る宇宙全史の探究-」が採択されている。宇宙史研究センターは、計算科学研究センターとの密接な連携のもと、これら5つの重要実験プロジェクトと1つの理論プロジェクトを含む素粒子・原子核・宇宙分野の先端研究を、「宇宙史」の観点で連結・融合し、宇宙史の暗黒部分の解明を飛躍的に加速させ、時空と宇宙の創世から、物質・生命の起源を数理的手法で研究し、宇宙史の全貌の統一的理解に向けた新たな学問分野の創出と牽引を目指している。また、そのために、宇宙史研究の国際共同研究拠点の形成を推進する。

TCHoU は、2016 年の筑波大学第 3 期中期計画・中期目標にむけた構想に従って 2017 年に行われた筑波大学数理物質系に属する二つ研究センター(学際物質科学研究センターと数理物質融合科学センター)の改組 再編に基づき、数理物質融合科学センター(Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering: CiRfSE「サーフス」)の宇宙史国際研究拠点と光量子計測器開発推進室を核として、2017 年 10 月 1 日に設立された。TCHoU 設置の経緯や前身の CiRfSE の詳細は、「筑波大学数理物質系 宇宙史研究センター 2017 年度活動報告書」(2018 年 6 月)や、CiRfSE の最終報告書「筑波大学数理物質系 数理物質融合科学センター 平成 26 年 9 月 1 日 ~ 平成 29 年 9 月 30 日 活動報告書」(2017 年 11 月)を参照されたい。いずれも TCHoU のウエブサイトから入手できる。

筑波大学では、研究力強化に向けた大学改革の一環として、2017 年度に大学付属センターの組織再編を行い、各センターは、機能別に「先端研究センター群」、「開発研究センター群」、「研究支援センター群」及び「教育等センター群」に分類されることになった。「先端研究センター群」については、さらに、R1(世界級研究拠点)、R2(全国級研究拠点)、R3(重点育成研究拠点)、R4(育成研究拠点)と級別され、R1~R3の研究センターについては、中間評価(3年目に行う評価)及び期末評価(5年目に行う評価)を行い、研究活動の進捗状況により、入れ替え又は廃止を行うものとなった。2017年9月に、研究戦略イニシアティブ推進機構ほかで審議が行われた結果、数理物質系で新たに設置する宇宙史研究センターとエネルギー物質科学研究センターは、いずれも先端研究センター群(R3)と認定された。

2.2 朝永センターの名称について



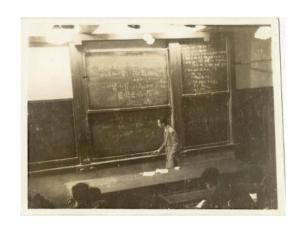


図 4 朝永振一郎博士 (1906–1979)。右は、東京教育大学理学部 (大塚) での量子力学の講義、1960 年頃。(写真: 筑 波大学朝永記念室蔵)

TCHoUの英語名に含まれる Tomonaga Center (朝永センター) の名称は、超多時間理論や、くりこみ理論、集団運動の理論など、現代物理学の構築、特に相対論的場の理論の基礎の構築に多大な功績を残された、ノーベル賞物理学者 朝永振一郎博士にちなんでいる (図 4)。

朝永博士は、1939年に留学先のドイツ・ライプツィヒ大学(ハイゼンベルグ教授のもと)から第2次世界大戦の勃発により帰国し、1941年に東京文理科大学(筑波大学の前身)の教授となった。ここで、後に日本人で2番目のノーベル賞を受賞することになる超多時間理論やくりこみ理論の研究を行った。朝永博士は教育者・指導者としても卓越した能力を示し、後に筑波大学物理学教室につながる活発な研究グループを構築し、1956年から1962年には、筑波大学の前身である東京教育大学の学長も務めた。朝永博士の事績については、筑波大学 朝永記念室(http://tomonaga.tsukuba.ac.jp/)や 筑波大学ギャラリー 朝永振一郎博士記念展示(http://www.tsukuba.ac.jp/public/institution/gallery.html)にも詳しい。

CiRfSE の構想当初から、宇宙史国際研究拠点を将来的に朝永博士の名前を冠する独立センターに発展させる可能性を模索していたが、宇宙史研究センターを設立するにあたり、朝永家の許可を得て、正式に "Tomonaga Center"を称することとなった。朝永博士の盟友であり日本初のノーベル賞受賞者である湯川秀樹博士の京都大学 基礎物理学研究所(Yukawa Institute for Theoretical Physics)や、小林誠博士、益川敏英博士の名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構(Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe)の例に倣い、センターの英語名に朝永先生の名前を使わせていただくこととした。

2.3 宇宙史研究センターの構成

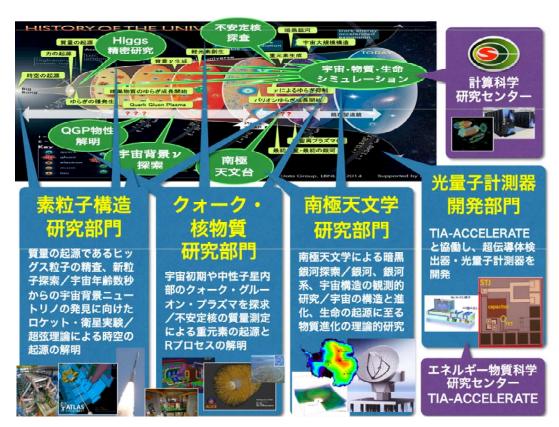


図 5 宇宙史研究センターの研究部門

TCHoU は、2.1 節で述べた目的を達成するために、図 5 に示す 3 つの研究部門と 1 つの開発部門を置く。

- 素粒子構造研究部門 Division of Elementary Particles ビッグバン直後の質量の起源、力の起源、時空の起源を探求するために、ヒッグス粒子の精密研究や、超弦理論の研究などを推進する。また、ビッグバンから数秒後に生成されたと考えられている宇宙背景ニュートリノの発見に向けたロケット・衛星実験プロジェクトを推進する。
- クォーク・核物質研究部門 Division of Quark Nuclear Matters ハドロンや重い元素の起源を理解するために、ビッグバンから1万分の1秒程度に起こったと考えられているクォーク物質から核物質への相転移や、不安定核の反応プロセスを解明する。そのために、大型実験や格子 QCD シミュレーションを推進する。
- 南極天文学研究部門(南極天文台) Division of Antarctic Astronomy (Antarctic Observatory of Astronomy) ビッグバンから数億年後に生まれた第一世代の銀河を探索するために、南極にテラヘルツ電波望遠鏡を 建造するプロジェクトを推進する。そのための観測器開発と、既存望遠鏡による宇宙観測研究を遂行する。
- 光量子計測器開発部門 Division of Photon and Particle Detectors TCHoU 各研究部門で進めている最先端 観測器開発の情報と経験を共有し、それらで共通の超伝導半導体検出器、SOI 技術などの光量子計測器 の開発基盤を提供する。

各部門の高い研究力をさらに強化すると同時に、宇宙史の統一的描像の構築に向けて、計算科学研究センターとの密接な連携のもと、分野を超えた共同研究と交流を推進し、新たな融合研究の可能性を模索する。また、4部門の研究を融合させた国際的宇宙史研究のハブとしての活動を展開する。

2.4 宇宙史研究センターの運営体制

図6に、TCHoUの運営体制を示す。

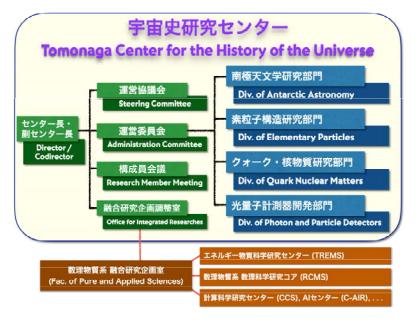


図 6 宇宙史研究センターの運営体制

構成員会議では、センターの活動状況と将来に向けての方針を構成員(構成教員+連携教員+構成研究員)で審議するとともに、各分野の研究トピックスと最新成果を相互に共有し、融合研究の可能性を自由に議論・意見交換する。構成員会議の実施状況については、5.1 節を参照。

運営委員会は、センター長、副センター長、部門長ほかから成り、センターの運営に関する重要事項を審議する。運営協議会は、運営委員会のメンバーに加え、学外、センター外の委員数名から成り、センターの運営方針に関する審議や研究活動等の評価を行う。運営協議会と運営委員会のメンバーや活動実績については、5.2 節と 5.3 節を参照。

2.5 宇宙史研究センターの活動スペース

TCHoU の活動の拠点として、各研究グループの数理物質系物理学域の研究室や実験室などに加え、人文社会学系棟 B 棟 I 階 10 部屋のまとまったスペース(404m²)の使用が許可されている。毎年度使用希望を更新しなければならないが、センターの活動に必要との理解を得て、光熱水料、電話料金とスペースチャージ以外の使用料は免除されて来ている。

図7に示すように、センター長室兼事務室、セミナー室、小会議室、教員居室・研究室を置き、テレビ会議システム、無線 LAN などを整備した。教員居室・研究室は、次節で述べるクロスアポイントメント教員や客員教員の居室としても活用している。

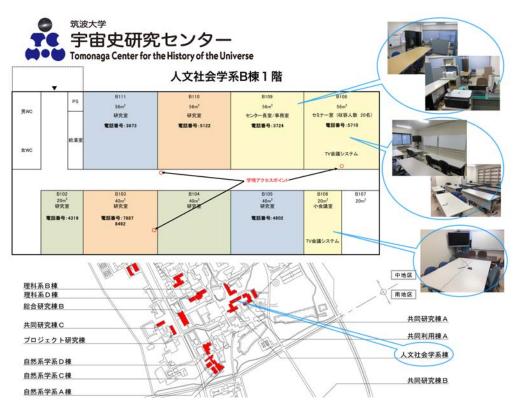


図7 宇宙史研究センター活動スペース

3 構成員

TCHoU の構成員は、筑波大学の構成教員と、学内外で TCHoU との連携研究を推進する連携教員、および機能強化経費などに基づき雇用される研究員からなる。2018 年度当初の構成教員・連携教員を図 8 に、2019年度当初の構成教員・連携教員を図 9 に、それぞれ示す。また、2018年度の研究員を表 1 に示す。

宇宙史研究センター 構成教員・連携教員

センター長:金谷和至(p) 副センター長:受川史彦(p)

南極天文学研究部門 部門長:久野成夫(p)

構成教員: 新田冬夢(a)、渡邉祥正(a)、中井直正(p:関西学院大)、徂徠和夫(apCA:北大)

連携教員: 瀬田益道(p:関西学院大)、梅村雅之(p)、笠井康子(p客員:NICT)、西堀俊幸(ap客員:JAXA)

素粒子構造研究部門 部門長:武内勇司(ap)

構成教員: 石橋延幸(p)、受川史彦(p)、原 和彦(ap)、佐藤構二(l)、大川英希(a)、飯田崇史(a)、

伊敷吾郎(a)、佐藤勇二(a)、金 信弘(p特命)、Soo-Bong Kim(p海外unitPl: Seoul大)、

吉田拓生(pCA:福井大)、池上陽一(apCA:KEK)

連携教員: 松浦周二(p客員:関西学院大)

クォーク・核物質研究部門 部門長:江角晋一(ap)

構成教員: 小澤 顕(p)、三明康郎(p)、中條達也(l)、金谷和至(p)、山口貴之(apCA:埼玉大)、

小沢恭一郎(apCA:KEK)、佐甲博之(pCA:原研)、Thomas Peitzmann(p海外unitPl: Utrecht大)、

Marco van Leeuwen(p海外unitPl: Utrecht大)

連携教員: 藏増嘉伸(p)、谷口裕介(ap)、向井もも(a)、杉立徹(p客員:広大)、

濱垣秀樹(p客員:長崎総合科学大)、秋葉康之(p客員:理研)、若杉昌徳(p客員:理研)、

永宮正治(p:理研)、郡司卓(ap:東大)、志垣賢太(ap:広大)

光量子計測器開発部門 部門長:原和彦(ap)

構成教員: 江角晋一(ap)、武内勇司(ap)、金 信弘(p特命) 連携教員: 西堀英治(p)、冨田成夫(ap)、近藤剛弘(ap)

融合研究企画調整室 室長:副センター長

構成員: センター長、部門長、数理物質系融合研究企画室長、ほか

2018/4/10

図 8 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2018/4): a/l/ap/p はそれぞれ、助教/講師/准教授/教授を表し、「CA」はクロス・アポイントメント教員を表す。

TCHoU は CiRfSE の宇宙史国際研究拠点と光量子計測器開発推進室を核として設立されており、構成教員・連携教員も、CiRfSE から多く引き継いでいる。また、CiEfSE 時代も含め、国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」(2016~2021 年度)に基づき、人員を含む研究推進体制の強化を進めている。

構成教員としては、筑波大学数理物質系の通常の教員に加えて、以下に説明するように、研究力強化に向けた様々な制度や事業も活用した人事枠の教員も多く含んでいる。連携教員は、センター外との研究連携の進展に応じて、フレキシブルに運用している。学外の連携教員の一部は、客員教員として、宇宙史関連の教育活動にも参加していただいている。さらに、これらの構成教員・連携教員に加え、確保した研究資金に基づく研究員(任期付)も雇用している。

宇宙史研究センター 構成教員・連携教員

センター長:金谷和至(p) 副センター長:受川史彦(p)

南極天文学研究部門 部門長: 久野成夫(p)

構成教員: 新田冬夢(a)、中井直正(pCA:関西学院大)、徂徠和夫(apCA:北大)

連携教員: 瀬田益道(p:関西学院大)、梅村雅之(p)、笠井康子(p客員:NICT)、西堀俊幸(ap客員:JAXA)

渡邉祥正(a:日大)

素粒子構造研究部門 部門長:武内勇司(ap)

構成教員: 石橋延幸(p)、受川史彦(p)、原 和彦(ap)、佐藤構二(l)、大川英希(a)、飯田崇史(a)、

伊敷吾郎(a)、金 信弘(p特命)、Soo-Bong Kim(p海外unitPl: Seoul大)、吉田拓生(pCA:福井大)、

池上陽一(apCA:KEK)

連携教員: 松浦周二(p客員:関西学院大)、佐藤勇二(ap:福井大)

クォーク・核物質研究部門 部門長:江角晋一(ap)

構成教員: 小澤 顕(p)、三明康郎(p)、中條達也(l)、Norbert Novitzky(a海外unit副Pl)、金谷和至(p)、山口貴之(apCA:埼玉大)、小沢恭一郎(apCA:KEK)、佐甲博之(pCA:原研)、

Thomas Peitzmann(p海外unitPl: Utrecht大)、Marco van Leeuwen(p海外unitPl: Utrecht大)

連携教員: 藏増嘉伸(p)、谷口裕介(ap)、向井もも(a)、杉立徹(p客員:広大)、

濱垣秀樹(p客員:長崎総合科学大)、秋葉康之(p客員:理研)、若杉昌徳(p客員:京大)、

永宮正治(p:理研)、郡司卓(ap:東大)、志垣賢太(ap:広大)

光量子計測器開発部門 部門長:原和彦(ap)

構成教員: 江角晋一(ap)、武内勇司(ap)、金信弘(p特命)

連携教員: 西堀英治(p)、冨田成夫(ap)、近藤剛弘(ap)、倉知郁生(特別p:KEK)、中村浩二(a:KEK)

CA: 筑波大学とのクロス・アポイントメント教員

2019/04

図 9 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2019/4)

3.1 国際テニュアトラック教員

「国際テニュアトラック教員」とは、「国立大学法人 筑波大学 研究力強化実現構想」(2012) に基づいて筑波大学に導入された教員枠で、海外連携機関に一定期間以上派遣し、国際共同研究体制の強化を目的としている。TCHoU に関連するものとしては、CiRfSE の素粒子構造部門、クォーク・核物質部門にそれぞれ 1 枠が配分され、大川英希助教と Oliver Busch 助教が採用された。大川助教はスイス・CERN 研究所に、Busch 助教はドイツ・ハイデルベルク大学に派遣され、国際連携研究を推進した。TCHoU では、それぞれ、素粒子構造研究部門、クォーク・核物質研究部門の構成教員となった。

2017 年秋に両名のテニュア審査が行われ、両名とも高い評価でテニュアを獲得し、2018 年度から、通常の 承継枠助教として、つくばに本拠地を移すこととなった。このうち、Busch 助教は、2018 年 4 月のつくばでの テニュア助教としての着任準備を進めていたが、2018 年 3 月にインフルエンザからの肺炎が悪化し、2018 年 3 月 31 日に入院先のドイツ・マンハイムの病院で急逝された。41 歳であった。2014 年に筑波大学国際テニュ アトラック助教として採用されて以降、派遣先のドイツ・ハイデルベルク大学との国際共同研究で、CERN ALICE 実験によるクォーク・グルオン・プラズマの検出実験に活躍し、筑波大学の学生の指導にも大きな貢献をした。

Busch 助教が亡くなったことなどを考慮して、クォーク・核物質研究部門の体制強化のために、2018 年度の筑波大学「国際テニュアトラック教員への支援に関わる公募」への応募を数理物質系に提案し、系の承認を得て大学に応募した。これが2018 年11 月に採択され、国際公募を行った。2018 年度内に人事選考は完了し、

2019年度に着任予定である。

3.2 海外教育研究ユニット招致

「海外教育研究ユニット招致」も、「国立大学法人 筑波大学 研究力強化実現構想」(2012) に基づいて筑波大学に導入された制度で、分野を牽引する海外の研究ユニットの分室を筑波大学に招致し、国際共同研究の推進により、筑波大学の教育・研究を国際展開しようというものである。先方の中心的研究者を Principal Investigator (PI) として筑波大学に採用し、年に一定期間以上筑波大学に滞在していただく。大学が実施するものに加え、部局でも実施できる。

数理物質系と CiRfSE で検討し、機能強化経費を用いて、系による海外教育研究ユニット招致として、韓国ソウル国立大学ニュートリノ研究センター (KNRC) Kim Soo-Bong 教授を PI とする海外教育研究ユニットを 2016 年度に招致した。Kim Soo-Bong 教授は、2016 年7月1日に着任し、宇宙背景ニュートリノ探索 COBAND プロジェクトを推進している。

2017 年秋には、筑波大学の教育国際化に向けた Campus in Campus (CiC) 制度を活用して、オランダ ユトレヒト大学のサブアトミック物理学研究機構の Thomas Peitzmann 教授と、Marco van Leeuwen 教授を PI とし、クォーク・グルオン・プラズマ研究プロジェクトを推進する海外教育研究ユニット招致を行うこと になった。両教授は 2018 年 3 月 1 日に着任し、2018 年 3 月 8 日には、数理物質系とユトレヒト大学との部 局間協定調印式が行われた。また、副 PI として Norbert Novitzky 助教が 2018 年 6 月 1 日に筑波大学に着任した。

3.3 クロス・アポイントメント教員

CiRfSE 時代に、宇宙史研究の拠点形成に向けた国内連携体制を強固なものとするために、密接な共同研究を進めている連携先の教員とその所属機関と交渉し、合意が得られた6名について、クロス・アポイントメントの協定を結び、その雇用を進めた。筑波大学における業務割合は10%である。これにより、CiRfSE 南極天文部門に徂徠和夫准教授(北海道大学、2017年4月1日着任)が、素粒子構造部門に吉田拓生教授(福井大学、2016年10月16日着任)、池上陽一准教授(KEK、2016年12月1日着任)が、クォーク・核物質部門に山口貴之准教授(埼玉大学、2016年12月1日着任)、小沢恭一郎准教授(KEK、2016年12月1日着任)、佐甲博之教授(原研、2017年4月1日着任)が、それぞれ採用された。この6名は、2017年10月に、それぞれ、対応するTCHoUの研究部門に配属された。

TCHoU になって以降も、クロス・アポイントメント教員制度を活用した研究連携体制の構築・強化を進めている。

南極天文台計画に向けた関西学院大学との連携を強化するために、2018 年 7 月 1 日に、関西学院大学の中井直正教授(2018 年 3 月まで TCHoU 南極天文学研究部門長、2018 年 3 月末に関西学院大学に転出)を、筑波大学における業務割合 10% のクロス・アポイントメント教授として筑波大学で採用した(2020 年 3 月 31 日まで)。対応して、筑波大学の久野成夫教授(TCHoU 南極天文学研究部門長)が、関西学院大学における業務割合 10% のクロス・アポイントメント教授として、2019 年 4 月に関西学院大学で採用された(2022 年 3 月 31 日まで)。

クオーク・グルオン・プラズマ研究の国内連携研究体制の強化を目的として、三明康郎教授(TCHoU クオーク・核物質研究部門)が、日本原子力研究開発機構における業務割合 10% のクロス・アポイントメント

受入職員として、2019年1月1日に日本原子力研究開発機構で採用された(2020年3月31日まで)。

3.4 その他の人事制度の活用

- 全学戦略ポイント 筑波大学では、毎年一定の割合で人事枠(人事ポイント)の削減を全学の部局に課しており、それで大学本部に集めた人事ポイントを、「全学戦略ポイント」として様々な全学的施作の実施などに使っている。その一部は、部局からの戦略的使用提案に対応して、審査の上部局に配分される。CiRfSE の立ち上げ時に数理物質系を通じて全学戦略ポイントを申請し、その採択により、素粒子構造部門の飯田崇史助教(2017 年 4 月 1 日着任)を採用し、2017 年 10 月に、CiRfSE の改組に伴いTCHoU の素粒子構造研究部門に配属した。TCHoU からも、研究体制整備やプロジェクト推進を目的として、継続的に提案し続けている。
- 任期付き助教(数理物質系) 機能強化経費の研究員雇用経費の一部を活用した数理物質系の任期付き助教枠 (3年間)の使用希望を 2016 年度に CiRfSE から提出したところ、物理学域と数理物質系で承認され、宇宙観測分野の渡邉祥正氏を CiRfSE 南極天文部門で採用した (2017 年 4 月 1 日着任)。渡邉助教は、2017 年 10 月 1 日に、TCHoU の南極天文学研究部門に配属された。渡邉氏は、2019 年 3 月末に日本大学工学部に助教として転出し、任期付き助教枠は系に返納した。
- 客員教員 クロスアポイントメント教員採用と並行して、従来の客員教員の制度も活用して、国内の研究連携体制を強化した。CiRfSE 時代に、南極天文部門に西堀俊幸准教授(JAXA、2017 年 3 月 1 日委嘱)、笠井康子教授(情報通信研究機構、2017 年 5 月 1 日委嘱)、素粒子構造部門に松浦周二教授(関西学院大学、2017 年 11 月 1 日委嘱)、クォーク・核物質部門に秋葉康之教授(理研、2017 年 6 月 1 日委嘱)、杉立徹教授(広島大学、2017 年 6 月 1 日委嘱)、濱垣秀樹教授(長崎総合大学、2017 年 6 月 1 日委嘱)、若杉昌徳教授(理研、2017 年 6 月 1 日委嘱)がそれぞれ配置された。客員教員枠は、外部機関との連携研究の進展に応じて、フレキシブルに運用している。

3.5 研究員

機能強化経費などに基づき、計算科学研究センターでの1名を含む、数名の研究員枠を運用している。

部門 氏名 所属 任期 武政健一 素粒子構造研究部門 物理学域 2017/1/1-2019/2/15 高水裕一 クォーク・核物質研究部門 計算科学研究センター 2017/11/1-渡辺陽介 クォーク・核物質研究部門 物理学域 2017/10/1-2018/5/31 坂井真吾 クォーク・核物質研究部門 物理学域 2018/4/1-2019/3/31 客員研究員 鈴木伸司 クォーク・核物質研究部門 物理学域 2018/4/1-2019/3/31 客員研究員

表 1 2018 年度 宇宙史研究センター研究員

4 受賞

4.1 本多俊介氏 第 13 回 (2019 年) 物理学会若手奨励賞 (2018/10)

素粒子構造研究部門のヒッグス研究プロジェクトに参加し、 2018 年 3 月に本学数理物質科学研究科を卒業した本多俊介氏(現、京都大学博士研究員)の博士論文 "Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector" (指導教員:原和彦准教授)が、第 13 回 (2019 年) 日本物理学会若手奨励賞 (Young Scientist Award of the Physical Society of Japan)を受賞した。日本物理学会若手奨励賞は、将来の物理学を担う優秀な若手研究者の研究を奨励し、日本物理学会をより活性化するために 2007 年に制定されたもので、物理学会全領域の若手の物理学会会員から、各領域の選考委員会により選出される。素粒子実験領域では毎年3名程度が受賞している。受賞者は賞状等の記念品のほか、受賞後最初の春の大会で受賞記念講演を行い、また、その際の大会参加費は免除になる。

この受賞論文は、ヨーロッパのセルン研究所で行っているアトラス実験において発見されたヒッグス粒子が、トップクォークにも質量を与えていることを実験的に初めて検証したもので、ヒッグス粒子が、力を伝えるボーズ粒子にのみならず、クォークなどの物質を構成するフェルミ粒子にも質量を与える、つまり「ヒッグス粒子は万物の質量の起源である」という素粒子の標準模型における仮定の正しさを確立するための重要な実験結果を示したものである。アトラス実験では、ヒッグス粒子がトップクォーク以外の粒子にも質量を与えるかなどの研究を引き続き進めている。



図 10 本多俊介氏 第 13 回 (2019 年) 物理学会若手奨励賞受賞 (2018 年 10 月 25 日)

また、2019 年度の受賞になるが、素粒子構造部門の金信弘特命教授が、「2TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップクォークの発見、Bc 中間子の発見、および Bs 中間子の粒子反粒子振動の初観測をはじめとする素粒子物理の研究」に対して、成和記念財団「金萬有学術賞」を受賞(2019 年 5 月 11 日)し、素粒子構造部門が参加している CDF Collaboration が、D0 Collaboration とともに、「トップクォークの発見とその性質の詳細な測定」に対して、ヨーロッパ物理学会の 2019 年高エネルギー素粒子物理学賞 (High Energy and Particle Physics Prize of the European Physical Society)を受賞(2019 年 6 月 15 日)した。

5 各種会議

5.1 構成員会議

TCHoUの構成員会議は、全ての構成教員、連携教員、研究員によりセンターの活動状況報告と将来に向けての方針を審議する場であるとともに、各分野の研究トピックスと最新成果を相互に共有し、融合研究の可能性を自由に議論・意見交換する場を目指して、年に2回程度開催している。後半の成果報告&交流会は、センター構成員以外にも公開している。

5.1.1 2018 年度第 1 回構成員会議

日時 2018年6月4日 (月) 10:30-18:40

場所 自然 B114

出席者 金谷、受川、久野、武内、江角、原、ほか(計25名)

宇宙史研究センターとして最初の構成員会議を、2018 年 6 月 4 日に開催した。その後、2018 年 6 月 11 日の運営委員会で、今後の構成員会議・成果報告会の開催方法について審議し、活動報告と意見交換・分野交流の場として、年に 2 回程度開催することとなった。

- 1. 宇宙史研究センター発足の経緯説明(金谷)
- 2. 宇宙史研究センター概要(金谷)
- 3. 2017 年度全体活動概要(金谷)
- 4. 2017 年度各部門活動報告
 - 素粒子構造研究部門(武内)
 - クォーク・核物質研究部門(江角)
 - 南極天文学研究部門(久野)
 - 光量子計測器開発部門(原)

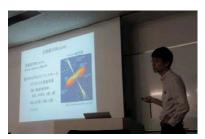
5. 審議事項

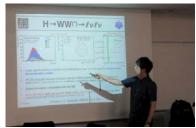
- センター細則の改定について:親規則の変更に伴う改定は、運営委員会に一任することとなった。 構成員会議の位置づけを細則でどう扱うかについては、計算科学研究センターにおける扱いを調査 したのちに審議することとなった。
- センター長選考および任期に関する内規について: TIMS/TREMS の内規を参考に作成し、2017 年1月の運営委員会で承認された現在の申し合わせの内容について紹介された。改定すべきとの意見がある場合は、必要に応じて運営委員会で審議することとなった。
- 予算関係報告:受川副センター長より、センター予算について報告され、未定部分について希望が あれば出してもらいたい旨依頼があった。
- 進行中の活動として「卓越大学院」への申請案「138 億年史卓越教育プログラム」の内容が紹介された。
- 6. 各プロジェクト成果報告(11 講演)
 - COBAND 実験に向けた超伝導検出器の開発(武政)
 - 重力波と宇宙論(高水)

- 南極望遠鏡に向けた X 線化学と重水素化合物の観測的研究 (渡邊)
- 南極天文学研究部門活動報告(久野)
- 野辺山 45m 鏡超伝導電波カメラの開発 (新田)
- ATLAS プロジェクト(大川)
- COBAND プロジェクト (武内)
- 弦理論(佐藤勇二)
- QGP プロジェクト (三明)
- 蓄積リングによる不安定核の質量精密測定と元素合成(山口)
- 光量子検出器開発部門の活動から(原)











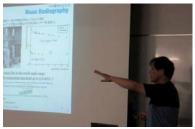


図 11 2018 年度第 1 回構成員会議 (2018 年 6 月 4 日)

5.1.2 2018 年度第 2 回構成員会議

日時 2018年11月22日(月)8:45-17:10

場所 自然 B114

出席者 金谷、受川、久野、武内、江角、原、ほか(計28名)

- 1. 前回議事メモ確認(金谷)
- 2. 宇宙史研究センター概要 (金谷)
- 3. 2018 年度前期全体活動概要(金谷)
- 4. 2018 年度前期各部門活動報告
 - 素粒子構造研究部門(武内)
 - クォーク・核物質研究部門(江角)
 - 南極天文学研究部門(久野)
 - 光量子計測器開発部門(原)

5. 審議事項

● センター細則の改定について:2018年6月4日構成員会議で審議した、親規則の変更に伴う改定

が、宇宙史研究センター運営委員会と数理物質系運営委員会で 2018 年 7 月に採択されたことが報告された。

- 構成員会議の細則上の位置付けについて、計算科学研究センターにおける研究員会議の位置付けの 例が紹介され、審議の結果、当面細則は変更せず、センターの構成図で明記するのみで対応するこ ととされた。変更する必要が生じた場合は、適宜運営委員会で審議することとされた。
- ・センター長選考および任期に関する内規 (2017年1月運営委員会承認) について、運営委員会で引き続き検討したが、今の所変更する必要は特に無いと判断された旨報告された。また、2018年度末に任期切れとなるセンター長の次期候補者内申依頼 (2019年1月25日締め切り) が来ており、現在のセンター長選考および任期に関する内規に従って選考する方針が 2018年11月12日の運営委員会で承認された旨報告され、審議の結果、その形で選考することとなった。選考委員会世話人は受川副センター長とされた。
- ●「卓越大学院」への申請案「138 億年史卓越教育プログラム」が不採択となった旨報告された。
- 予算関係報告:受川副センター長より、センター予算について報告された。
- 6. 各プロジェクト成果報告(10 講演)
 - ATLAS 実験での荷電ヒッグス粒子の探索(佐藤構二)
 - エネルギー走査による QCD 臨界点探索 (江角晋一)」
 - FUGIN データを用いた銀河系内の分子雲同定(齋藤弘雄)
 - 新型半導体検出器の開発(原 和彦)
 - 超弦理論報告 (伊敷吾郎)
 - Nf=2+1 QCD エネルギー運動量テンソルの研究(谷口裕介)
 - 強磁場中性子星へのガス降着の研究(大須賀健)
 - COBAND 実験報告(飯田崇史)
 - RIBF における元素合成の研究(向井もも)
 - 南極テラヘルツ望遠鏡用の新しい鏡面形状測定法 (奥村大志)



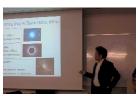






図 12 2018 年度第 2 回構成員会議 (2018 年 11 月 22 日)

5.2 運営協議会

センターの運営方針やセンター事業の実施状況の点検及び評価に関する重要事項などを審議するために、運営協議会を設置している。その委員は、センター長(センター細則第7条(1))、副センター長(同(2))、各部門長(同(3))、数理物質系長(同(4))、学外の学識経験者(同(5))、およびセンター長が推薦する本学の教員(同(6))から構成される。

2018 年度の運営協議会委員名簿を表 2 に示す。学外の学識経験者として、高エネルギー加速器研究機構の新井康夫教授と自然科学研究機構国立天文台副台長の小林秀行教授に運営協議員就任をお願いした。「セン

表 2 2018 年度 宇宙史研究センター運営協議会委員

| 選出根拠 | 役職名 | 氏 | 名 | 域 | 職名 |
|--------|------------------------------|-----|-----|-----|------|
| 第7条第1項 | センター長 | 金谷 | 和至 | 物理学 | 教 授 |
| 第7条第2項 | 副センター長 | 受 川 | 史 彦 | 物理学 | 教 授 |
| 第7条第3項 | 南極天文学研究部門 | 久 野 | 成夫 | 物理学 | 教 授 |
| 第7条第3項 | 素粒子構造研究部門 | 武内 | 勇 司 | 物理学 | 准教授 |
| 第7条第3項 | クォーク・核物質研究部門 | 江 角 | 当 — | 物理学 | 准教授 |
| 第7条第3項 | 光量子計測開発部門 | 原 | 和彦 | 物理学 | 准教授 |
| 第7条第4項 | 数理物質系長 | 齊藤 | - 弥 | 化学 | 教 授 |
| 第7条第5項 | 高エネルギー加速器研究機構 | 新井 | 康夫 | | 特別教授 |
| 第7条第5項 | 自然科学研究機構国立天文台 | 小林 | 秀行 | | 教 授 |
| 第7条第6項 | 計算科学研究センター長 | 梅村 | 雅之 | 物理学 | 教 授 |
| 第7条第6項 | 筑波大学システム情報系教授 人工知能科学センター長 | 櫻井 | 鉄 也 | | 教 授 |

ター長が指名する本学の職員」としては、当センターと密接な連携がある計算科学研究センター長の梅村雅之 教授と、人工知能科学センター長の桜井鉄也教授に務めていただいた。

5.2.1 2018 年度第 1 回運営協議会

日時 2019年2月5日13:00-17:45

場所 筑波大学 総合研究棟 B110 (第1部), B204 (第2部)

- 1. 第1部 13:00-15:00 (公開)
 - 全体活動報告(金谷)
 - 南極天文学研究部門活動報告(久野)
 - 素粒子構造研究部門活動報告(武内)
 - クォーク・核物質研究部門活動報告(江角)
 - 光量子計測器開発部門活動報告(原)
- 2. 第2部 15:30-17:45 (非公開) 運営協議員との質疑・応答
 - 予算執行状況報告、将来計画、その他

2018 年度の運営協議会を 2019 年 2 月 5 日に開催した。前半の活動実績報告は、後述の TCHoU ワーク

ショップ (2019 年 2 月 4 日~5 日) と兼ねて、一般に公開して総合研究棟 B110 で行い、その後、総合研究棟 B204 で運営協議会メンバーによる審議を行った。センター教員からの活動状況等報告に続き、センターの活動方針と中・長期計画について議論がかわされた。外部委員の先生方からは、南極天文台計画が実現した時に南極天文台を独立センター化するという従来の構想について、宇宙史研究センターとしての基盤を樹立するために、独立センターではなく宇宙史研究センターの研究活動体制に含めるべきとの意見が出された。また、宇宙史研究の重要な要素として、宇宙生命物理の分野で、国立天文台などとの連携を推進し、そこに南極望遠鏡による星間物質研究も組み込むべきとの意見が出された。南極天文台については、その後運営委員会と構成員会議で審議し、独立センター化は今後は明記しないこととなった。

5.3 運営委員会

センター運営委員会は、センター長、副センター長、部門長、及びセンター長が指名する者から構成され、センターの運営と研究の実施・予算の使い方・研究会などの企画から、外部資金獲得に向けての活動や広報に関わることまで、センターのほぼすべての活動について審議・決定する、センターの意思決定の中心機関である。2018 年度の運営委員会委員名簿を表 3 に示す。また、オブザーバーとして、小澤教授にも出席を依頼している。

| 選出根拠 | 役職名 | 氏 | 名 | 域 | 職 | 名 |
|--------|--------------|-------|----------------|-----|----|--------|
| 第9条第1項 | センター長 | 金谷和 | 至 | 物理学 | 教 | 授 |
| 第9条第2項 | 副センター長 | 受 川 史 | 定彦 | 物理学 | 教 | 授 |
| 第9条第3項 | 南極天文学研究部門 | 久 野 成 | 夫 | 物理学 | 教 | 授 |
| 第9条第3項 | 素粒子構造研究部門 | 武内勇 | 司 | 物理学 | 准教 | :授 |
| 第9条第3項 | クォーク・核物質研究部門 | 江 角 晋 | - - | 物理学 | 准教 | :授 |
| 第9条第3項 | 光量子計測開発部門 | 原 和 | 彦 | 物理学 | 准教 | :授 |

表 3 2018 年度 宇宙史研究センター運営委員会委員

運営室会議は、月に1回のペースで、毎回2~3時間程度開催された。 2018年度の開催実績は、以下のとおり:

2018 年度 4/10, 5/14, 6/11, 7/9, 9/10, 10/9, 11/12, 12/10, 1/15, 2/12, 3/11 緊急の事案については、適宜、電子メールによる審議・決定が行われた。

6 研究集会・セミナー

以下では、TCHoU が開催・共催した主要な研究集会・セミナーの概要を報告する。それぞれのプログラムや発表資料等については、TCHoU ウエブサイトのニュースコーナーも参照されたい。

6.1 5th International Workshop on "Universe Evolution and Matter Origin"

日時 2018年9月21日(金)9:30-17:30

場所 筑波国際会議場 EPOCHAL 小会議室 303

参加者 54 名 (内、海外から13 名)

CiRfSE 時代から Tsukuba Global Science Week (TGSW) のセッションとして国際ワークショップ "Universe Evolution and Matter Origin" を毎年主催してきた。今回は、TGSW 2018 Session 8-9 として、第 5 回国際ワークショップ「宇宙進化と物質起源」(5th International Workshop on "Universe Evolution and Matter Origin")を開催した。表 4 にプログラムを示す。

表 4 5th International Workshop on "Universe Evolution and Matter Origin" (2018/9/21) program

| Kazuyuki Kanaya (TCHoU Tsukuba) | Opening remark |
|--------------------------------------|---|
| Johann Collot (LPSC Grenoble) | ATLAS: 25th anniversary - What was learned - What's next |
| Isaac Upsal (BNL/Shandong Unive.) | Global Hyperon Polarization in Heavy-Ion Collisions at |
| | RHIC-STAR |
| Rachid Guernane (LPSC Grenoble) | Recent results from ALICE |
| Koji Nakamura (KEK) | Development of silicon semiconductor tracking devices for the |
| | High-Luminosity LHC experiment |
| Arnaud Lucotte (LPSC Grenoble) | LPSC : from particle physics & cosmology to innovative |
| | technologies |
| Juan Macias-Perez (LPSC Grenoble) | Astrophysics and cosmology with KID (Kinetic Inductance |
| | Detectors) cameras |
| Tom Nitta (TCHoU Tsukuba) | Development of millimeter-wave band MKID camera for |
| | wide-field continuum observations |
| Jonghee Yoo (KAIST/IBS) | Dark Universe |
| Jun Nishimura (KEK) | Cosmology from matrix model formulation of superstring theory |
| Mariane Magin-Brinet (LPSC Grenoble) | Lattice QCD and nucleon physics : selected excerpts |
| Hiroari Miyatake (KEK) | RNB project on the astrophysical element synthesis |
| Fumihiko Ukegawa (TCHoU Tsukuba) | Closing remark |

人類の知識が未だおよんでいない暗黒物質・暗黒エネルギー・暗黒銀河等の探索と、物質創成・相転移・構造発生とそれらの揺らぎ・進化・発展に関して、これまでの研究成果を互いに報告し、今後の研究計画の検討および分野を超えた議論を行う事を目的として、各研究部門の研究分野における主要な外部研究協力者による招待講演と、各研究部門の研究者によるこれまでの研究成果報告及び今後の研究計画に関する講演が行われた。特に、Grenoble 大学から宇宙史関連の様々な専門の研究者が参加し、すでに実施している連携研究の状況やその今後の展開、さらには、新しい研究テーマに関する新規の連携の可能性について、活発な意見交換が行われた。











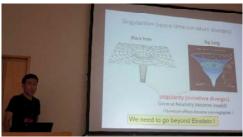




図 13 5th International Workshop on "Universe Evolution and Matter Origin" (2018 年 9 月 21 日)

また、この国際会議に引き続き、翌9月22日 \sim 23日には、各研究部門に分かれて、informal meeting や合同 lunch meeting が開催され、国際連携研究の展開や Grenoble 大学との連携開拓に向けて、具体的な方策の検討とそれらの実施方針の確認が行われた。

• Div. of Quark Nuclear Matters

ALICE and future upgrade

Rachid Guernane (LPSC), Tatsuya Chujo (TCHoU) - ALICE and future plan

Ritsuya Hosokawa (Tsukuba) – ALICE analysis, Jet-hadron correlation

Future program toward high-density

Nu Xu (CCNU) – CEE and CBM project

Hiroyuki Sako (J-PARC) - J-PARC heavy-ion program and related physics

STAR analysis and beam energy scan program

Tetsuro Sugiura (Tsukuba) - Net-charge fluctuation

Ryo Aoyama (Tsukuba) – Jet-flow correlation

Kazuya Nakagawa (Tsukuba) - Correlation in dAu

Yota Kawamura (Tsukuba) - HBT in CuAu

Hiroki Kato (Tsukuba) - Flow with fixed target

ShinIchi Esumi (TCHoU) – unfolding for num.-temp. fluctuation, EPD with N.N.

• Div. of Elementary Particles

Koji Sato (TCHoU) – Possible collaborations at ATLAS

All participants – discussions

• Div. of Antarctic Astronomy

All participants – discussions

6.2 Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices

日時 2018年12月08日(土)

場所 筑波大学東京キャンパス (大塚)

参加者 18名 (海外より4名)



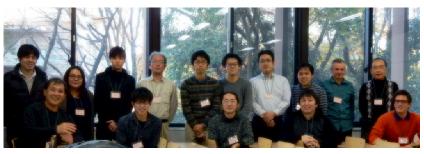


図 14 Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices (2018 年 12 月 8 日)

光量子計測器開発部門と日米科学技術協力の主催により、標記ワークショップを筑波大学東京キャンパスで 開催した。

30ps の時間分解能をもつ半導体検出器 LGAD が実現された。このような検出器を今後どのように開発し、応用できるかが議論された。会議では ToF - PET としての応用例のトークや ATLAS 関係者のトークも行われた。

6.3 第3回3次元積層半導体量子イメージセンサー研究会

日時 2019年1月28日(月)13:30-17:30

場所 つくば国際会議場 EPOCHAL 大会議室 102

参加者 55 名

TIA「かけはし」事業に採択された「3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」活動の一環として、最新の3次元積層技術、量子イメージングセンサー技術を持ち寄り今後の研究開発方向に関する議論を行った。

6.4 第1回 TCHoU ワークショップ

日時 2019年2月4日(月) 13:00-18:00, 2月5日(月) 9:30-11:30

場所 2/4: 筑波大学 計算科学研究センター ワークショップ室/会議室 A/会議室 B 2/5: 筑波大学 総合 B 棟 B110

参加者 18(AA)+20(EP)+20(QNM)+31(DPPD) 名

TCHoUをハブとした宇宙史研究の国内外連携の強化を目指して、第1回 TCHoU ワークショップを開催した。2月4日は、南極天文学研究部門、素粒子構造研究部門、クォーク・核物質研究部門のパラレルセッションを開催し、各分野における国内外連携研究について講演と議論を行なった。2月5日の午前には、TCHoU 4部門のジョイントセッションを光量子計測器開発部門主導のもとに開催し、部門を超えた測定器開発の情報交流を行なった。2月5日午後は、同日に開催した宇宙史研究センター運営協議会の全体報告と重ねて、TCHoU としての活動報告を行った。







図 15 第1回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4 日)

6.5 International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE

日時 2019年3月7日(木)~9日(土)

場所 筑波大学 計算科学研究センター ワークショップ室

Topics

March 7: Forward physics (ALICE FoCal, HERA, ATLAS, LHCf, RHICf, PHENIX/sPHENIX)

March 8: Si-W calorimeter, FoCal design

March 9: Future program at LHC beyond Run-5

参加者 40名 (海外より9名)

LHC, RHIC 加速器エネルギー領域における前方物理とカロリメータ検出器に関する国際ワークショップを

開催し、ALICE 実験用の FoCal 検出器の技術的問題を検討した。





図 16 左: International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE (2019 年 3 月 7 日 9 日)、右:第4回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 3 月 8 日)

6.6 第4回 TIA 光・量子計測シンポジウム

日時 2019年3月8日(金) 13:00-17:00 場所 つくば国際会議場 EPOCHAL 2F 中会議室 参加者 83名

「光・量子計測」は、TIA 5機関の高度な光・量子計測技術の力を結集し、新しい科学と産業の創成を目指して、高性能な光・量子発生技術開発、光・量子検出器と先端的計測技術法開発、および光・量子ビーム利用による基礎物性研究を推進している。「光・量子計測」が推進している研究・開発の現状と成果を広く知っていただくためのシンポジウムを開催した。

6.7 宇宙史セミナー

平成28年度に採択された国立大学機能強化促進経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」 (2016-2021) に基づく宇宙史プロジェクトを推進するために、計算科学研究センター (CCS) の協力体制を個々の研究者レベルで円滑にし、宇宙史プロジェクト内での素粒子・原子核・宇宙分野間および実験・理論間の連携を深めていくために、前身の CiRfSE の時代から、分野交流セミナー「宇宙史サロン」を定期的に開催してきた。 TCHoU では、宇宙史サロンの伝統を受け継ぎ、国際連携と分野融合を推進する「宇宙史セミナー」を開催している。毎回、分野を超えた活発な議論が行われている。

6.7.1 宇宙史セミナー"太陽"

日時 2018年7月27日(金) 13:45-

場所 自然系学系棟 B118

講演 飯田佑輔 氏 (関西学院大学)

"コンピュータによる画像認識手法から迫る太陽ダイナモ問題"

概要:太陽の大気活動は11年の周期性を持ち、このメカニズム解明を太陽ダイナモ問題と呼ぶ。これまでに、磁気流体力学理論と数値実験を中心として、磁束輸送ダイナモモデルが構築されてきた。一方で、実際の太陽を覆う、無数の微小磁気塊を解析する困難から、ダイナモ理論モデルの観測実証はほとんど行われていない。講演では、コンピュータによる画像認識手法を用いた実証結果を紹介する。

講演 中野佑樹 氏(東京大学宇宙線研究所)

"Super-Kamiokande 検出器を用いた太陽ニュートリノ観測の現在と今後の展望"

概要:Super-Kamiokande(SK) は 50 kton の水チェレンコフ型検出器で、陽子崩壊探索や太陽・大気ニュートリノ観測、加速器実験 (T2K) などを行っている。本講演では、太陽ニュートリノ観測に話題を絞り、これまでに得られた物理結果を簡単に紹介する。最後に、今後期待される物理に関する展望を紹介する。

参加者 15 名





図 17 宇宙史セミナー"太陽"(2018年7月27日)

6.7.2 宇宙史セミナー "MRPC"

日時 2018年11月15日(木) 15:00-16:00

場所 1F 棟 1F201

講演 Yi Wang (Department Of Engineering Physics, Tsinghua University)

"Development and production of high rate Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) for CBM-TOF at FAIR and STAR-eTOF at RHIC"

参加者 7名

6.7.3 宇宙史セミナー "Subatomic Swirls"

日時 2018年12月10日(月)16:00-17:00

場所 1F 棟 1F201

講演 Jinfeng Liao (Physics Dept. and Cntr, Exploration of Energy and Matter, Indiana Univ.)
"Chirality, Vorticity and Magnetic Field in the Subatomic Swirls"

概要: By colliding heavy ions at high energies, physicists are able to "break up" nuclear particles like protons and neutrons and create a hot "subatomic soup" - a new form of matter called a quark-gluon plasma (QGP). Experiments at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and the Large Hadron Collider (LHC) have found the QGP to be a nearly perfect quantum fluid over the past decade. Very recently, there emerged compelling evidences that the hot fluid formed in these collisions behaves like "subatomic swirls" carrying a large angular momentum with the resulting nontrivial fluid vorticity field as well as a super-strong magnetic field. The nontrivial interplay between such extreme fields and the spin degrees of freedom of the underlying microscopic constituents, leads to a number of novel quantum phenomena that have triggered widespread enthusiasm. In this talk, I will discuss two remarkable examples, the global spin polarization of produced hadrons and the tantalizing anomalous transport via so-called Chiral Magnetic Effect (CME).

参加者 15 名

6.7.4 宇宙史セミナー "FASER 実験"

日時 2018年12月14日(金)13:45-15:00

場所 自然系学系棟 B118

講演 音野瑛俊氏(九州大学 先端素粒子物理研究センター)

"FASER 実験 - LHC ビーム衝突点の超前方における長寿命粒子探索と高エネルギーニュートリノ研究"

参加者 15 名

6.7.5 宇宙史セミナー "RENO"







図 18 宇宙史セミナー "RENO" (2019年1月17日)

日時 2019年1月17日(木) 13:45-15:00

場所 自然系学系棟 B118

講演 Prof. Soo-Bong Kim (SNU/TCHoU)

"Variation of Observed Reactor Antineutrino Yield at RENO"

概要:The Reactor Experiment for Neutrino Oscillation(RENO) started data-taking from August,

2011 and has observed the disappearance of reactor electron antineutrinos to measure the smallest neutrino mixing angle θ_{13} . The experiment has analyzed roughly 2200 days of data to make an accurate measurement of the oscillation amplitude and frequency based on energy and baseline dependent disappearance of reactor antineutrinos. RENO's precisely measured flux and spectral shape of reactor antineutrinos has shown a deficit in the flux and an excess in the region of 5 MeV relative to the most commonly used model. Furthermore, it has observed fuel-composition dependent variation of reactor antineutrino yield and spectrum. We find that reevaluation of 235 U's antineutrino yield per fission may solve the reactor antineutrino anomaly. We also report a hint of correlation between the 5-MeV excess and the 235 U fuel isotope fraction.

参加者 12名

6.7.6 素粒子論 集中セミナー"流体方程式と格子数値解析"





図 19 素粒子論 集中セミナー "流体方程式と格子数値解析"(2019 年 2 月 27 日)

日時 2019年2月27日(水) 10:00-18:00,2月28日(木) 10:00-16:000

場所 自然系 D 棟 D410

講演 北澤正清氏(大阪大学大学院理学研究科)

"流体方程式と格子数値解析"

概要:ずり粘性係数などの輸送係数は流体方程式に現れる基本的な物理量であり、 有限温度 QCD における輸送係数の決定は理論的・現象論的に興味深く、また重要な課題である。 しかし、QCD の第一原理計算である格子 QCD 数値解析で輸送係数を測定することは極めて困難で、 これまでに様々な解析が試みられたものの、満足のいく測定に成功したとは言い難い状況にある。本講義では、格子数値解析における輸送係数測定がなぜ難しいのかを理解することを目指し、 この問題に関連する以下のような項目を板書で概観する:

(1) 相対論的流体方程式を現象論的に導出し、そこに現れる輸送係数の意味を説明する。

- (2) 有限温度場の理論の動的性質の記述に不可欠な線形応答理論を基礎から説明する。
- (3) 輸送係数と相関関数を結びつける久保公式を導出する。
- (4) 格子上で計算される虚時間相関関数と輸送係数の関係を論じる。
- (5) 格子数値計算による輸送係数測定の困難と、改良法について考察する。

参加者 約15名

6.7.7 宇宙史セミナー "ALICE における QGP 物理"

日時 2019年3月11日(月)16:00-18:20

場所 自然系学系棟 B118

講演 Marco van Leeuwen (Utrecht Univ. / Nikhef, Univ. of Tsukuba) "Probing the Quark Gluon Plasma with energetic parton"

講演 Thomas Peitzmann (Utrecht Univ. / Nikhef, Univ. of Tsukuba) "Photon production in high-energy heavy-ion reactions"

参加者 約15名

海外リサーチユニット招致 PI 教員である Marco van Leeuwen 教授、Thomas Peitzmann 教授の両氏に より、ALICE における QGP 物理と ALICE FoCal 検出器によるフォトンと QGP の物理についての講演が 行われた。

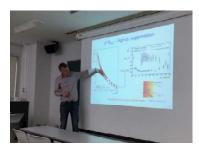






図 20 宇宙史セミナー "ALICE における QGP 物理"(2019 年 3 月 11 日)

7 一般向け広報活動

TCHoU では、CiRfSE 時代の活動を引き継ぎ、学生・一般向けの広報活動も積極的に推進している。

7.1 平成 30 年度 (第 59 回) 科学技術週間

日時 2018年4月21日10:00-16:00

場所 総合研究棟 B 棟 B0107, B0110

参来場者数 延 350 名、(内 青少年 175 名)

筑波大学の科学技術週間出展の一環として、宇宙史研究センターで推進している、素粒子・原子核・宇宙分

野の連携研究を紹介した。宇宙背景ニュートリノ、南極天文学、クォークグルオンプラズマ、ヒッグス粒子、元素合成などの研究を、子供たちと大人が同時に楽しめるように ポスター展・装置展示・ビデオ上映で紹介した。







図 21 平成 30 年度 (第 59 回) 科学技術週間 (2018 年 4 月 21 日)

7.2 第10回天文宇宙の七夕講演会

日時 2018年7月7日13:30-16:30

場所 つくば国際会議場

プログラム

「謎の天体、ブラックホールに迫る!」大須賀健(筑波大学)

「電波望遠鏡で探る銀河 – 最新の写真集が明かす銀河の姿 –」徂徠和夫(北海道大学、筑波大学) 参来場者数 95 名

中学生以上の一般の聴衆を対象に、天文宇宙物理学の最新の話題に関する講演会を開催した。

7.3 筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示「宇宙の歴史の暗黒部分を解明する」

日時 2018年11月3日~4日10:00-16:00

場所 筑波大学 第3エリア 3A207

参来場者数 11/3: 397 名、11/4: 323 名、 合計 720 名

学生・一般向けの広報活動として、「雙峰祭」の企画「つくば研究紹介」で、研究活動紹介(ブース展示)を 行った。



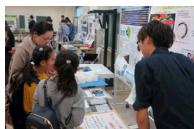




図 22 筑波大学学園祭「雙峰祭」企画展示「宇宙の歴史の暗黒部分を解明する」(2018 年 11 月 3 日 \sim 4 日)

8 2018 年度会計報告

TCHoU には、国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」の 2018 年度分として、2480 万円が配分された。この機能強化経費は、2016 年度から CiRfSE 宇宙史研究拠点に配分されているもので、CiRfSE の宇宙史研究拠点と宇宙史プロジェクトはそのまま宇宙史研究センターに移行した。また、機能強化経費事業の補助金として 1000 万円、戦略イニシアティブ経費として 310 万円が配分された。この他に、2017 年度からの繰越し金や、年度末処理による追加配分、TGSW 参加補助、科学技術週間参加補助などが収入となる。

支出は、主に研究員・助教雇用、クロスアポイントメント教員経費などの人件費に使われ、残りを、各部門の活動費、センターの整備、TGSWの旅費補填などにあてた。支出の詳細は、表 5-7 を参照。機能強化経費の収入と支出の差額は 2019 年度への繰越金とした。

表 5 2018 年度予算執行報告 - 機能強化経費分、補助金分 -

—機能強化経費—

—補助金分—

| 収 2 | | 支 出 | |
|--------|----------------|--|----------------|
| 項目 | 金 額 | 項目 | 金額 |
| 運営費交付金 | 24, 800, 000 円 | 海外研究ユニット招致 PI Kim Soo-Bong【人件費】 | 3, 214, 563 円 |
| 繰越金 | 6, 149, 372 円 | 海外研究ユニット招致 PI Kim Soo-Bong【旅費】一部 | 6, 451 円 |
| | | クロスアポイントメント教員 佐甲、山口、吉田、小沢、池上、 徂徠、中井【人件費】一部 | 6, 302, 068 円 |
| | | クロスアポイントメント教員 【旅費】一部 | 150, 750 円 |
| | | 研究員(助教アップシフト使用 料)【人件費】渡邉 | 4, 082, 493 円 |
| | | 研究員【人件費】渡辺,高水 | 6, 036, 265 円 |
| | | 研究員【旅費】一部 | 1, 200 円 |
| | | 消耗品・短期雇用・その他 | 149, 245 円 |
| | | 備品費補填 | 20, 926 円 |
| | | 郵便料金 | 4, 194 円 |
| | | 会議費(12/8workshop) | 13, 518 円 |
| | | 運営協議会謝金・旅費 | 35, 140 円 |
| | | 各部門活動費(4部門)一部 | |
| | | 南極 | 42, 700 円 |
| | | 素粒子 | 3, 931 円 |
| | | 光量子 | 20, 400 円 |
| 숌 함 | 30, 949, 372 円 | 숨 計 | 20, 083, 844 円 |

| ※渡邉祥正助教の人 | 牛費で 400 万円超 | 過分(82.493円)は、 | TCHoU 共通(教 | 研)教育研究経費に配金 | 分済 |
|-----------|-------------|---------------|------------|-------------|----|

| 収 2 | (| 支 出 | |
|-----|---------------|--|----------------|
| 項目 | 金 額 | 項目 | 金 額 |
| 人件費 | 6, 600, 000 円 | 武政研究員 【人件費】4-12 月 | 3, 169, 203 円 |
| 運営費 | 3, 400, 000 円 | 金特命教授 【人件費】4-3 月 | 510, 438 円 |
| | | 事務補佐員【人件費】4-1月 | 2, 311, 704 円 |
| | | クロスアポイントメント吉田教 授、佐甲教授【人件費、旅費】 4-9月 | 1, 456, 978 円 |
| | | 消耗品 | 281 円 |
| | | 核物質部門出張補助 | 200,000円 |
| | | 報告書(印刷費)300 冊発注 | 318,816円 |
| | | 報告書(郵送代)91通 | 34, 580 円 |
| | | 望遠鏡設計最適化委託 | 1, 998, 000 円 |
| 合 計 | 10,000,000円 | 合 計 | 10, 000, 000 円 |

表 6 2018 年度予算執行報告 – 戦略イニシアティブ分 – - 戦略イニシアティブ予算分-

| 収 入 | | 支 出 | | |
|-------|---------------|-------------------------------|---------------|--|
| 項目 | 金額 | 項目 | 金額 | |
| 運営交付金 | 3, 100, 000円 | TGSW 航空運賃(補填分) | 424, 450 円 | |
| | | TGSW 国内交通費・謝金当日払い (仮払い) | 123,000円 | |
| | | TGSW 事後精算国内交通費・謝金 | 42,790円 | |
| | | TGSW 国内招聘者講演謝金 | 20,000円 | |
| | | TGSW 会場備品貸出料・駐車場料金 | 16, 994 円 | |
| | | TGSW 招聘者 6 名分宿泊費 | 178, 500 円 | |
| | | TGSW 茶菓子 | 10, 101 円 | |
| | | TGSW 短期雇用 | 12,326円 | |
| | | 人社棟スペースチャージ | 121, 200 円 | |
| | | 金先生、武政研究員海外研究打 合せ(韓国 10 月) | 149,800円 | |
| | | 海外研究打合せ(仏グルノーブ ル)新田先生、久野先生 | 489, 795 円 | |
| | | 海外実験遂行(韓国 KAIST)武内 先生他、計4名 | 565, 021 円 | |
| | | 国内学会・研究会での研究成果 発表(計4名) | 169, 510円 | |
| | | 備品費(複合機) | 241,514円 | |
| | | ワークショップ旅費・茶菓子・ 短期雇用 | 73, 225 円 | |
| | | 電話料金 | 11,024円 | |
| | | 事務補佐員【人件費】2-3月 | 450, 750 円 | |
| 合 計 | 3, 100, 000 円 | 合 計 | 3, 100, 000 円 | |

| 収 入 | | 支 出 | | |
|---------------|---------------|-------------------------------------|---------------|--|
| 項目 | 金 額 | 項目 | 金額 | |
| TGSW 財政支援 | 250,000円 | 海外研究ユニット招致 PI Kim Soo-Bong【旅費】一部 | 356, 218 円 | |
| 渡邉助教 人件費補填 | 82, 493 円 | クロスアポイントメント教員 【旅費】一部 | 795, 970 円 | |
| 年度末処理 | 3, 318, 602円 | 研究員【旅費】一部 | 228, 272 円 | |
| | | TGSW 国際航空券代 外 | 250,000円 | |
| | | 消耗品費 | 311,039円 | |
| | | 役務(修繕費) | 42, 228 円 | |
| | | その他(専用回線使用料 SIM パッケージ) | 29, 160 円 | |
| | | 各部門活動費(4部門)一部 | | |
| | | 南極 | 143, 623 円 | |
| | | 素粒子 | 31, 130円 | |
| | | 光量子 | 469, 425 円 | |
| | | 核物質 | 994, 030 円 | |
| 合 計 | 3, 651, 095 円 | 숌 핡 | 3, 651, 095 円 | |

―宇宙史研究センター共通・グローバル化推進経費―

| 収 入 | | 支 出 | | |
|-------------------|----------|-----------|----------|--|
| 項目 | 金額 | 項目 | 金 額 | |
| 運営費交付金等 (本部から) | 250,000円 | TGSW 航空運賃 | 250,000円 | |
| 合 計 | 250,000円 | 슴 計 | 250,000円 | |
| ※使途 TGSW | | | | |

―宇宙史研究センター共通・IR 広報戦略経費―

| 収入 | | 支 出 | | |
|--------------------------|----------|-----------------------|-----------|--|
| 項目 | 金 額 | 項目 | 金 額 | |
| 運営費交付金等 (科学技術週間等支援事業) | 45, 000円 | 2018 年度科学技術週間 短期雇用 | 29, 582 円 | |
| 運営費交付金等 (科学技術週間等支援事業) | 41,000円 | | | |
| 合 計 | 86,000円 | 合 計 | 56, 418 円 | |

※使途 科学技術週間

第 II 部 研究部門活動報告

9 南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy)

部門長

久野 成夫 (数理物質系物理学域 教授)

構成教員

新田 冬夢(数理物質系物理学域助教)

渡邉 祥正(数理物質系物理学域助教)

中井 直正 (数理物質系物理学域 教授) クロスアポイントメント教員

徂徠 和夫(数理物質系物理学域准教授)クロスアポイントメント教員

連携教員

瀬田 益道(関西学院大学理工学部 教授)

梅村 雅之 (計算科学研究センター 教授)

笠井 康子 (情報通信研究機構 上席研究員) 客員教授

西堀 俊幸 (宇宙航空研究開発機構 主幹研究開発員) 客員准教授

南極天文学研究部門では、地上で最も天体観測に適した南極内陸部に 10m 級テラヘルツ望遠鏡を建設し、可視光では観測が困難な原始銀河の探査をテラヘルツ波帯で行う南極テラヘルツ望遠鏡計画を推進している。テラヘルツ望遠鏡に搭載する予定の超広視野超伝導電波カメラの開発へ向けた実機 1 号機として、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡に搭載する MKID カメラの開発も進めている。また、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡や南米チリの高地に建設されたアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)など既存の望遠鏡を用いて銀河、銀河系、星形成領域などの研究を行った。さらに、情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター 34m アンテナの性能評価を行い、34m アンテナを用いた大学連携 VLBI 観測に参加した。

クロスアポイントメント教員の徂徠准教授は、南極望遠鏡を使ったサブミリ波帯での炭素原子のスペクトル線観測を近傍銀河に対して実現するために、国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡で取得したミリ波帯のデータを解析し、どのような対象を観測すべきか検討を進めた。また、南極望遠鏡に搭載する分光計の仕様を検討した。

南極天文学の推進を中心として研究力強化のため、2018 年 7 月 1 日に関西学院大学教授の中井直正教授がクロスアポイントメント教員として着任し、10 mテラヘルツ望遠鏡予算獲得のための活動やアンテナの仕様検討、30cm サブミリ望遠鏡の南極移設計画の検討に参加した。また、南極でのテラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの中で、特に活動銀河核についての検討を進めた。

(1) 南極天文学の推進

南極テラヘルツ望遠鏡計画

東アジア内での連携をはかるため、台湾の中央研究院天文及天文物理研究所および中国の紫金山天文台を訪問し、南極でのテラヘルツ観測に関する連携についての検討を開始した。また、電波カメラ開発の連携を進めるため、グルノーブル大学を訪問し、力学インダクタンス検出器(MKID)の開発に関する共同研究を開始した。南極におけるテラヘルツ望遠鏡の鏡面測定法の検討を進めた。一つは点格子干渉計であり、もう一つは近傍界の Phase Retrieval Holography 法である。国立極地研究所のサポートを受け、南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス(星惑星系形成)を国立極地研究所研究集会として極地研究所にて開催した。

超伝導電波カメラの開発

南極 10m テラヘルツ望遠鏡へ向けた超伝導電波カメラの開発として、昨年度に引き続き野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの開発を進めている。観測周波数は 100-GHz 帯であり、超伝導検出器には力学インダクタンス検出器 (MKID) を用いている。電子線蒸着により、 3 インチ Si 基板上に Al 薄膜を成膜して、109 素子 Al-MKID アレイを製作した。実験室にて、1K の放射で制限される環境 (ダーク環境) にて性能評価を行った結果、歩留まりは約 93% (101/109 素子)、共振の鋭さを表す Q 値 (Qi) は約 105、雑音等価電力 (NEP) は 25 素子の平均で NEP $=3.2\times10^{-16}$ [W/\sqrt{Hz}] となった。また、100-GHz 帯発振源を用いたビームウエストサイズの測定、フーリエ分光器を用いた周波数特性の測定を行い、それぞれ想定通りの結果を得ることができた。

2018 年 5 月 10 日から 2018 年 6 月 1 日にかけて、野辺山 45m 電波望遠鏡への搭載試験を行った。受信機室での性能評価では、焦点面の到達温度は 64 mK、また検出器歩留まりも実験室と同様の結果を得た。望遠鏡駆動時の雑音対策として、カメラの常温部と低温部それぞれに磁場シールドを設けた結果、望遠鏡駆動時でも雑音の増加はなく、実験室と同等の結果を得ることができた。大気および月の仰角スキャン、惑星(火星、金星、木星)および電波源(3C84)をラスタースキャンにて観測した。データ取得システムは想定通りに動作することを確認した。ビームパターンはシミュレーション結果と概ね一致する 17.7 ± 2.2 arcsec となり、安定性も観測に影響がないことを確認した。一方、主ビーム能率、開口能率が想定よりも 10% 程度低いこと、観測感度が目標値よりも一桁悪いことが分かった。今後、観測感度向上に向けて、MKID の高感度化が課題である。

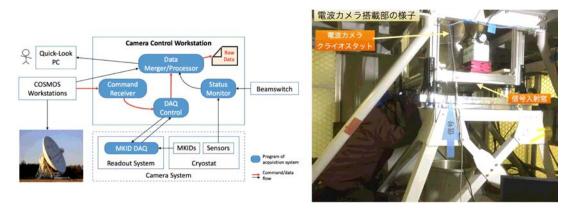


図 23 (左)電波カメラのデータ取得システムのブロック図。(右)野辺山 45m 電波望遠鏡に電波カメラを搭載した様子。

30cm サブミリ望遠鏡

南極観測用に開発された 30cm サブミリ望遠鏡を南極ドーム C に移設する計画の検討を開始し、それに向けて 30cm 望遠鏡に搭載されている 500GHz 帯用 SIS 受信機の広帯域化を進めた。現在のところ Lower Side Band 側だけであるが、従来の 4-8GHz という帯域幅を 12-18GHz に拡大することに成功した。

(2) 電波観測による銀河・銀河系の研究

M83 における巨大分子雲の星形成効率に関する研究

ALMA によって得られた近傍銀河 M83 の 12 CO(J=1-0) 輝線データと野辺山 45 m鏡のデー

タを結合し、巨大分子雲を分解しうる分解能を達成した。179 個の巨大分子雲を同定し、巨大分子雲の自由落下時間で規格化された星形成効率を調べた結果、質量で重み付けした平均の星形成効率は、 $9.4\times10^{-3}M_{\odot}$ であった。これは、乱流によって星形成が抑制されるモデルと一致している。一方で、星形成効率は場所による違いが見られ、渦状腕の一部では $2.7\times10^{-2}M_{\odot}$ と他より5倍以上高い値となっていることがわかった。この結果から、巨大分子雲の寿命の間に、星形成率は一定というわけではないということが示唆された。

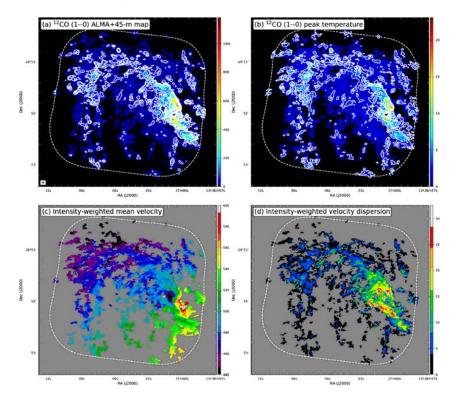


図 24 ALMA と野辺山 4 5 m鏡で得られた $^{12}{\rm CO}(J=1-0)$ データ。(a) 積分強度 (b) ピーク温度 (c) 平均速度 (d) 速度分散

相互作用銀河 NGC 4567/4568 における分子ガスの衝突面の発見

相互作用の初期段階にある銀河 NGC 4567/4568 の 12 CO(J=1-0) 輝線を ALMA で観測した結果、この銀河ペアにおける分子ガスの衝突面を初めて発見した。速度分散は $16.8\pm1.4~{\rm km~s}^{-1}$ であった。さらにその衝突面に、R バンドのダークレーンに対応してサイズが $1800~{\rm pc}\times350~{\rm pc}$ という巨大なフィラメント状の構造が存在することが明らかとなった。このフィラメントの内部には半径 $30~{\rm pc}$ で質量が $10^6 M_{\odot}$ の 4 個の巨大分子雲が含まれていることもわかった。これらの巨大分子雲は重力的に束縛されており、Super Star Cluster の母体となる可能性があると考えられる。

超新星残骸 Kes79 に付随する分子・原子雲の発見

野辺山宇宙電波観測所 45 m鏡を用いて、超新星残骸 Kes79 の 12 CO(J=1-0) 観測を行った結果、視線速度 $\sim 80~{\rm km~s^{-1}}$ の Kes79 に付随する分子・原子雲の同定に成功した。このガス雲は、X 線および電波で観測されているシェル構造と空間的によく一致しており、 $\sim 4~{\rm km~s^{-1}}$ で膨張していることが

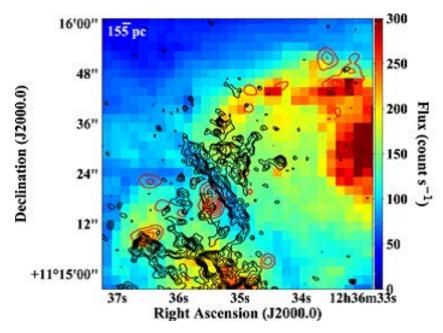


図 25 カラー:R バンド、赤コントア: ${\rm H}\alpha$ 、黒コントア:ALMA によってえられた $^{12}{\rm CO}(J=1-0)$ 積分強度(2330 — 2380 km s $^{-1}$)。

`

明らかになった。また、このガスは、CO(J=3-2) と CO(J=1-0) の輝線強度比が>0.8 で、超新星による衝撃波で ~ 24 K まで加熱されていることがわかった。このガスの視線速度から、超新星残骸の運動学的距離が ~ 5.5 kpc で半径が ~ 8 pc と見積もられた。超新星残骸内の陽子密度は ~ 360 cm $^{-3}$ でこのうち原子は 10% 程度だけであると見積もられた。

(3) 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 34m アンテナ

大学 VLBI 連携観測のサポート

大学 VLBI 連携による観測における鹿島宇宙技術センターの 34m アンテナの運用に参加した。今年度は、鹿島局アンテナも用いた VLBI 観測が 2019 年 2 月 21-22 日の 1 度実施された。当日は、現地・鹿島宇宙技術センターに赴き、観測の実施、34m アンテナの監視等を行った。観測は無事成功し、現在PI により解析中である。

鏡面能率測定による鏡面精度の算出

昨年度から実施していた複数の周波数帯域に対する電波望遠鏡の開口能率からアンテナ鏡面精度を算出するための、鏡面開口能率測定を継続して実施した。2018 年 11 月 13-14 日、12 月 13-14 日と 12 月 20-21 日に観測を実行し、データの取得に成功した。ただし、今年度前期に行ったアンテナ改修工事に伴い、アンテナの鏡面裏構造の改修や鏡面パネルの調整が実施されたため、昨年度と今年度のデータは個別に解析し、アンテナの鏡面精度の算出だけでなく、改修に伴う鏡面精度の改善についても検証を行った。解析の結果、改修前(昨年度)の鏡面誤差が 1.01mm、改修後(今年度)の鏡面誤差が 0.87mm と算出された。観測誤差などを考慮した結果、アンテナ改修によりアンテナの鏡面誤差は 0.2 – 0.3mm 程度改善されている可能性があることが明らかになった。これらの結果は、学士論文(秋葉)としてまとめられた。

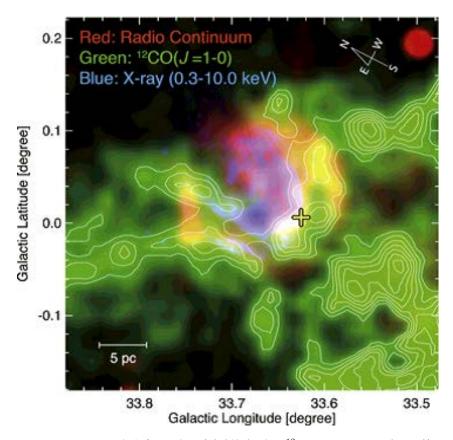


図 26 Kes79 の 3 色合成図。赤:電波連続波、緑: 12 CO(J=1-0)、青:X 線

,

〈査読付き論文〉

- Salak, D., Tomiyasu, Y., Nakai, N., Kuno, N., Miyamoto, Y., Kaneko, H., "Dense Molecular Gas in the Starburst Nucleus of NGC 1808", The Astrophysical Journal, Volume 856, Issue 2, article id. 97, 19 pp., 2018
- 2. Nishimura, A., Minamidani, T., Umemoto, T., Fujita, S., Matsuo, M., Hattori, Y., Kohno, M., Yamagishi, M., Tsuda, Y., Kuriki, M., Kuno, N., Torii, K., Tsutsumi, D., Okawa, K., Sano, H., Tachihara, K., Ohama, A., Fukui, Y., "FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). III. Possible evidence for formation of NGC 6618 cluster in M 17 by cloud-cloud collision", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP2, id.S42, 2018
- 3. Kohno, M., Torii, K., Tachihara, K., Umemoto, T., Minamidani, T., Nishimura, A., Fujita, S., Matsuo, M., Yamagishi, M., Tsuda, Y., Kuriki, M., Kuno, N., Ohama, A., Hattori, Y., Sano, H., Yamamoto, H., Fukui, Y., "FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN): Molecular clouds toward W 33; possible evidence for a cloud-cloud collision triggering O star formation", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP2, id.S50, 2018
- 4. Torii, K., Fujita, S., Matsuo, M., Nishimura, A., Kohno, M., Kuriki, M., Tsuda, Y., Minamidani, T., Umemoto, T., Kuno, N., Hattori, Y., Yoshiike, S., Ohama, A., Tachihara, K., Shima, K., Habe, A., Fukui, Y., "Large-scale CO J = 1-0 observations of the giant molecular cloud associated with the infrared ring N35 with the Nobeyama 45 m telescope", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP2, id.S51, 2018
- 5. Kaneko, H., Kuno, N., Saitoh, T. R., "Discovery of a Molecular Collision Front in Interacting Galaxies NGC 4567/4568 with ALMA", The Astrophysical Journal Letters, Volume 860, Issue 1, article id. L14, 5 pp., 2018
- 6. Komugi, S., Miura, R. E., Kuno, N., Tosaki, T., "Gas, dust, stars, star formation, and their evolution in M 33 at giant molecular cloud scales", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue 3, id.48, 2018
- 7. Hirota, A., Egusa, F., Baba, J., Kuno, N., Muraoka, K., Tosaki, T., Miura, R., Nakanishi, H., Kawabe, R., "ALMA 12CO (J = 1-0) imaging of the nearby galaxy M 83: Variations in the efficiency of star formation in giant molecular clouds", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue 4, id.73, 2018

- 8. Kuriki, M., Sano, H., Kuno, N., Seta, M., Yamane, Y., Inaba, T., Nagaya, T., Yoshiike, S., Okawa, K., Tsutsumi, D., Hattori, Y., Kohno, M., Fujita, S., Nishimura, A., Ohama, A., Matsuo, M., Tsuda, Y., Torii, K., Minamidani, T., Umemoto, T., Rowell, G., Bamba, A., Tachihara, K., Fukui, Y., "Discovery of Molecular and Atomic Clouds Associated with the Gamma-Ray Supernova Remnant Kesteven 79", The Astrophysical Journal, Volume 864, Issue 2, article id. 161, 10 pp., 2018
- 9. Hiura, K., Nagai, H., Kino, M., Niinuma, K., Sorai, K., Chida, H., Akiyama, K., D' Ammando, F., Giovannini, G., Giroletti, M., Hada, K., Honma, M., Koyama, S., Orienti, M., Orosz, G., Sawada-Satoh, S., "VERA monitoring of the radio jet 3C 84 in the period of 2007–2013: detection of non-linear motion", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.70, No.5, pp.83:1-11, 2018
- 10. Takekoshi, T., Minamidani, T., Komugi, S., Kohno, K., Tosaki, T., Sorai, K., Muller, E., Mizuno, N., Kawamura, A., Onishi, T., Fukui, Y., Bot, C., Rubio, M., Ezawa, H., Oshima, T., Austermann, J. E., Matsuo, H., Aretxaga, I., Hughes, D. H., Kawabe, R., WILSON, G. W., Yun, M. S., "The Dust-Selected Molecular Clouds in the Northeast Region of the Small Magellanic Cloud", The Astrophysical Journal, Vol.867, No.2, pp.117:1-13, 2018
- Higuchi, A. E., Sakai, N., Watanabe, Y., Lpez-Sepulcre, A., Yoshida, K., Oya, Y., Imai, M., Zhang, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Codella, C., Bachiller, R., Hirota, T., Sakai, T., Yamamoto, S., " Chemical Survey toward Young Stellar Objects in the Perseus Molecular Cloud Complex", The Astrophysical Journal, Volume 236, Issue 2, article id. 52, 25 pp., 2018
- Miyamoto, Y., Seta, M., Nakai, N., Watanabe, Y., Salak, D., Ishii, S., "ALMA [C I] observations toward the central region of Seyfert galaxy NGC 613", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue 3, id.L1, 2018
- 13. Furuya, K., Watanabe, Y., Sakai, T., Aikawa, Y., Yamamoto, S., "Depletion of 15N in the center of L1544: Early transition from atomic to molecular nitrogen?", Astronomy & Astrophysics, Volume 615, id.L16, 5 pp., 2018
- 14. Shimonishi, T., Watanabe, Y., Nishimura, Y., Aikawa, Y., Yamamoto, S., Onaka, T., Sakai, N., Kawamura, A., "A Multiline Study of a High-mass Young Stellar Object in the Small Magellanic Cloud with ALMA: The Detection of Methanol Gas at 0.2 Solar Metallicity", The Astrophysical Journal, Volume 862, Issue 2, article id. 102, 14 pp., 2018
- Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Lpez-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Yamamoto, S., "Sub-arcsecond Kinematic Structure of the Outflow in the Vicinity of the Protostar in L483", The Astrophysical Journal, Volume 863, Issue 1, article id. 72, 14 pp., 2018
- Zhang, Y., Higuchi, A. E., Sakai, N., Oya, Y., Lpez-Sepulcre, A., Imai, M., Sakai, T., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Yamamoto, S., "Rotation in the NGC 1333 IRAS 4C Outflow", The Astrophysical Journal, Volume 864, Issue 1, article id. 76, 11 pp., 2018
- Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jrgensen, J. K., Van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., "The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398-3359", The Astrophysical Journal Letters, Volume 864, Issue 2, article id. L25, 7 pp., 2018
- Imai, M., Sakai, N., Lpez-Sepulcre, A., Higuchi, A. E., Zhang, Y., Oya, Y., Watanabe, Y., Sakai, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Yamamoto, S., "Deuterium Fractionation Survey Toward Protostellar Sources in the Perseus Molecular Cloud: HNC Case", The Astrophysical Journal, Volume 869, Issue 1, article id. 51, 26 pp., 2018
- Harada, N., Nishimura, Y., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Aikawa, Y., Sakai, N., Shimonishi, T., "Molecularcloud-scale Chemical Composition. III. Constraints of Average Physical Properties through Chemical Models", The Astrophysical Journal, Volume 871, Issue 2, article id. 238, 25 pp., 2019
- 20. Imai, M., Oya, Y., Sakai, N., Lpez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Yamamoto, S., "Unveiling a Few Astronomical Unit Scale Rotation Structure around the Protostar in B335", The Astrophysical Journal Letters, Volume 873, Issue 2, article id. L21, 7 pp., 2019
- 21. Fujita, S., Torii, K., Tachihara, K., Enokiya, R., Hayashi, K., Kuno, N., Kohno, M., Yamagishi, M., Nishimura, A., Umemoto, T., Minamidani, T., Matsuo, M., Tsuda, Y., Sano, H., Tsutsumi, D., Ohama, A., Yoshiike, S., Okawa, K., Fukui, Y., FUGIN members, "FUGIN: Molecular Gas in Spitzer Bubble N4—Possible Evidence for a Cloud-Cloud Collision as a Trigger of Massive Star Formations", The Astrophysical Journal, Volume 872, Issue 1, article id. 49, 15 pp., 2019
- 22. Ando, R., Kohno, K., Umehata, H., Izumi, T., Ishii, S., Nishimura, Y., Sorai, K., Tosaki, T., Taniguchi, A., Tamura, Y., "The Excitation State of Galactic Diffuse Molecular Gas, Investigated with ALMA Observations of Multi-transition Absorption Lines", The Astrophysical Journal, Vol.871, No.2, pp.256:1-7, 2019
- 23. Nitta, T., Sekimoto, Y., Hasebe, T., Noda, K., Sekiguchi, S., Nagai, M., Hattori, S., Murayama, Y., Matsuo, H., Dominjon, A., Shan, W., Naruse, M., Kuno, N., Nakai, N.,"Design, Fabrication and Measurement of Pyramid-Type Antireflective Structures on Columnar Crystal Silicon Lens for Millimeter-Wave Astronomy", Journal of Low Temperature Physics, 193(5-6), 976-983, 2018
- 24. Nagai, M., Hisamatsu, S., Zhai, G., Nitta, T., Nakai, N., Kuno, N., Murayama, Y., Hattori, S., Mandal, P., Sekimoto,

- Y., Kiuchi, H., Noguchi, T., Matsuo, H., Dominjon, A., Sekiguchi, S., Naruse, M., Maekawa, J., Minamidani, T., Saito, M., "Data Acquisition System of Nobeyama MKID Camera", Journal of Low Temperature Physics, 193(3-4), 585-592, 2018
- 25. Hasebe, T., et al., (95 番目 Nitta, T.), "Concept Study of Optical Configurations for High-Frequency Telescope for LiteBIRD", Journal of Low Temperature Physics, 193(56), 841850, 2018
- 26. Suzuki, A., et al., (97 番目 Nitta, T.), "The LiteBIRD Satellite Mission: Sub-Kelvin Instrument", Journal of Low Temperature Physics, 193(56), 10481056, 2018
- 27. Hasumi, M., et al., (95 番目 Nitta, T.), "LiteBIRD: A Satellite for the Studies of B-Mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection", Journal of Low Temperature Physics, 194(56), 443452, 2019

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- 1. Okumura, T., "A Novel Wavefront Sensor for Antarctic Terahertz Telescope", 19th East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology, (Sanda, Japan, 2018)(ポスター)
- 2. Nara, S., Froidevaux, L., Livesey, N. J., Walker, K. A., Yamada, T. and Kasai, Y., "HCl observation in MLT region using Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)", 19th East Asia Sub-millimeter-wave Receiver Technology Workshop 5th RIKEN-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology, (Sanda, Japan, 2018)(ポスター)
- 3. Kuno, N., "Antarctic Terahertz Telescope (ATT)", International Workshop on Submillimeter Astronomy, (Purple Mountain Observatory, China, 2019)(招待講演)
- 4. Dominjon, A., Sekimoto, Y., Noguchi, T., Nagai, M., Shan, W. L., Nakai, N., Kuno, N., Nitta, T., Murayama, Y., Hattori, S., Shu, S., Sekiguchi, S., "Development and Characterization of a MKID Camera for the Nobeyama Radio Observatory 45m Telescope", 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), (Sorrento, ITALY, 2017)(ポスター)
- 5. Nitta, T., Sekimoto, Y., Noda, K., Hasebe, T., Sekiguchi, S., Matsuo, H., Nagai, M., Dominjon, A., Shan, W., Murayama, Y., Hattori, S., Naruse, M., Kuno, N., Nakai, N., "Pyramid-type Antireflective Structures on Silicon Lenses for Millimeter-wave Observations", 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, (Kurume, Fukuoka, Japan, July 17-21, 2017)(ポスター)
- 6. Murayama Y., "Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Astronomical Observations," The inaugural symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe, (Ibaraki, Japan, March 27, 2018)(一般講演)
- 7. Nitta, T., "Development of millimeter-wave band MKID camera for wide-field continuum observations", Tsukuba Global Science Week 2018, the 5th International Workshop on "Universe Evolution and Matter Origin", (Tsukuba, Ibaraki, September 21, 2018)(一般講演)

[国内学会・研究会]

- 1. 田中隆広, 久野成夫, 渡邉祥正, 廣田晶彦, 徂徠和夫, 矢島義之, 宮本祐介, 金子紘之, 竹内努, Dragan Salak, 中井直正, 「棒渦巻銀河 NGC7479 における棒状構造のパターン速度の測定」, 日本天文学会 2019 年春季年会, (2019 年 3 月 15 日, 法政大学小金井キャンパス) (一般講演)
- 2. 喜多将一朗, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 小松崎龍聖, 渡邉祥正, 徂徠和夫, 矢島義之, 柴 田修吾, 梶川明祐実, 八嶋裕, 宮本祐介, 金子紘之, 依田萌, 竹内努, 村岡和幸, 黒田麻友, 諸隈佳菜, 小林将人, Dragan SALAK, 野間勇斗, 瀬田益道, 中井直正, 中西裕之, 他 COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING(25):エッジオン銀河における CO 輝線比」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 14 日-17 日, 法政大学小金井キャンパス)(ポスター)
- 3. 矢島義之, 徂徕和夫, 宮本祐介, 久野成夫, 村岡和幸, 小松崎龍聖, 「NRO レガシープロジェクト COMING (24): CO(J = 21)/CO(J = 10) 比の 変動が銀河内の分子ガス質量, 並びに KennicuttSchmidt 関係へ及ぼす影響」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 14 日-17 日, 法政大学小金井キャンパス) (ポスター)
- 4. 三浦飛未来, 小野寺幸子, 金子紘之, 徂徠和夫, 久野成夫, 宮本祐介, Daniel Espada, 村岡和幸, Pan Hsi-An, 他 COMING チーム, 「NRO レガシープロジェクト COMING (23):銀河間重力相互作用下における分子ガス中心集中度」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 15 日, 法政大学小金井キャンパス)(一般講演)
- 5. 保田敦司, 久野成夫, 田中隆広, 渡邉祥正, 徂徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾, 宮本祐介, 金子紘之, Daniel Espada, 村岡和幸, 黒田麻友, 依田萌, 竹内努, 諸隈佳菜, 小林将人, 中西裕之, 他 COMING, 「NRO レガシープロジェクト COMING(22):Dust-to-Gas ratio を用いた近傍銀河における CO-H2 質量変換係数 α CO の導出」,(日本天文学会 2019 年春季年会,2019 年 3 月 15日, 法政大学小金井キャンパス)(一般講演)
- 6. 河野樹人, 立原研悟, 藤田真司, 西村淳, 大浜晶生, 佐野栄俊, 花岡美咲, 福井康雄, 鳥居和史, 梅本智文, 南谷哲宏, 松尾光洋, 久野成夫, 栗木美香, 徳田一起, 切通僚介, 大西利和, 津田裕也, FUGIN チーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): 巨大分子雲複合体 W43 における高密度ガスとミニスターバースト II」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 14 日, 法

- 政大学小金井キャンパス) (一般講演)
- 7. 鳥居和史,藤田真司,西村淳,河野樹人,立原研悟,犬塚修一郎,徳田一起,松尾光宏,南谷哲宏,梅本智文,宮本祐介,久野成夫,栗木美香,津田裕也,FUGIN チーム,「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN):銀河面における分子雲中の高密度ガス質量比の定量」,(日本天文学会 2019 年春季年会,2019 年 3 月 14 日,法政大学小金井キャンパス)(一般講演)
- 8. 佐藤一樹, 長谷川哲夫, 梅本智文, 阪本成一, 齋藤弘雄, 久野成夫, 瀬田益道, 他 FUGIN チーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): ホットコアカタログの銀経 20 50 への拡張」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 15 日, 法政大学小金井キャンパス) (一般講演)
- 9. 佐藤雄登, 久野成夫, 中井直政, 瀬田益道, 長崎岳人, 関本裕太郎, 「南極望遠鏡用 500GHz 帯 2SB 受信機の中間周波数 (IF) 帯域の広帯域化」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 15 日, 法政大学小金井キャンパス) (一般講演)
- 10. 永井 誠, 新田冬夢, 村山洋佑, Zhai Guangyuan, Pranshu Mandal, 鈴木隆, 樋川遼太朗, 久野成夫, 中井直正, 関本裕太郎, 松尾宏, 都築俊宏, 木内等, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 江崎翔平, 宮地晃平, Shan Wenlei, 野口卓, 成瀬雅人, 南谷哲宏, 前川淳, 御子柴廣, 藤茂, 宮澤千栄子, 45m 運用メンバー, 「野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯 109 素子 MKID カメラの搭載試験」, (日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年 3 月 15 日, 法政大学小金井キャンパス)(一般講演)
- 11. 森島優菜、須藤広志、谷口義明、山内彩、中井直正,「セイファート銀河 NGC 1068 の VLBI 観測による中心核ブラックホール 質量の 推定」,(日本天文学会 2019 年春季年会 2019 年 3 月 16 日 法政大学)(一般講演)
- 12. 矢島義之, 徂徠和夫, 久野成夫, 村岡和幸, 竹内努, 宮本祐介, 金子紘之, 渡邉祥正, 小林将人, 田中隆広, 黒田麻友, 保田敦司, 依田 萌, 柴田修吾, 他 COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING(21): CO 3 輝線で探る棒渦巻銀河にお ける 分子ガスの物理状態と星形成」, (日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 19 日, 兵庫県立大学姫路工学部キャンパス) (一般講演)
- 13. 野間勇斗, Salak Dragan, 瀬田益道, 中井直正, 徂徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾, 梶川明祐実, 八嶋裕, 宮本祐介, 金子紘之, 久野成夫, 渡邉祥正, 田中隆広, 保田敦司, 喜多将一朗, 小松崎龍聖, 竹内努, 依田萌, 村岡和幸, 黒田麻友, 中西裕之, 大井渚, 諸隈佳菜, 松本尚子, PAN Hsi-An, 他 COMING, 「NRO レガシープロジェクト COMING(20):CO 分子ガス速度場のフーリエ解析から求める銀河の基本量と棒状構造の角速度」, (日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 19 日-21 日, 兵庫県立大学姫路工学部キャンパス)(ポスター)
- 14. 村岡和幸, 黒田麻友, 徂徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾, 梶川明祐実, 八嶋裕, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 喜多将一朗, 小松崎龍聖, 渡邉祥正, 宮本祐介, 金子紘之, 依田萌, 竹内努, 諸隈佳菜, 小林将人, Dragan SALAK, 野間勇斗, 瀬田益道, 中井直正, 中西裕之, 他 COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING(19):銀河中の星形成効率の動径分布」, (日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 19 日-21 日, 兵庫県立大学姫路工学部キャンパス)(一般講演)
- 15. 奥村大志,今田大皓,永井誠,新田冬夢,久野成夫,中井直正,周斌,「電波点回折干渉計 (III)」,(日本天文学会 2018 年秋季年会,2018 年 9 月 19 日-21 日,兵庫県立大学姫路工学部キャンパス)(ポスター)
- 16. 村山洋佑, 新田冬夢, 服部将吾, 久野成夫, Guangyuan Zhai, Pranshu Mandal, 奥村大志, 中井直正, 永井誠, 松尾宏, 都築俊宏, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 江崎翔平, 宮地晃平, 関本裕太郎, 野口卓, 成瀬雅人、「野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの光学評価」、(日本天文学会 2018 年秋季年会、2018 年 9 月 19 日 21 日、兵庫県立大学姫路工学キャンパス) (ポスター)
- 17. Dragan Salak, Naomasa Nakai, Masumichi Seta, Yusuke Miyamoto,「ALMA Resolves the Circumnuclear Disk of NGC 1808 in [CI] (1-0)」,(日本天文学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 20 日 兵庫県立大学)(一般講演)
- 18. 齋藤弘雄, 久野成夫, 梅本智文, 鳥居和史, 西村淳, 長谷川哲夫, 松尾光洋, 南谷哲宏, 河野樹人, 西村淳, 藤田真司, 半田利弘, 中西裕之, 瀬田 益道, 小野寺幸子, 濤崎智佳, 大西利和, 徳田一起, 他 FUGIN チーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN):銀河系内域における分子雲同定 2」, (日本天文学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 20 日 兵庫県立大学) (一般 講演)
- 19. 村瀬建, 上杉正裕, 水窪耕平, 岩井智美, 大山まど薫, 椎原駿介, 前畑美瑠, 楊梓, 和田晃司, 石崎滉也, 平田優志, 半田利弘, 面高俊宏, 高桑繁久, 梅本智文, 松尾光洋, 南谷哲宏, 鳥居和史, 砂田和良, 仲野誠, 久野成夫, 「FUGIN に基づく野辺山アンモニアサーベイ (KAGONMA) の現状:W33 について」, (日本天文学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 20 日 兵庫県立大学)(一般講演)
- 20. 矢島義之、徂徠和夫、久野成夫、田中隆広、保田敦司、宮本祐介、金子紘之、竹内努、依田萌、村岡和幸、黒 田麻友、'Physical Properties of Molecular Gas in Nearby Barred Spiral Galaxies'、『銀河進化研究会』、(愛媛大学、2018 年 6 月) (一般講演)
- 21. Sorai, K., 他 COMING メンバー, "COMING: Properties of Molecular Gas and Star Formation in Nearby Galaxies", ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2018,(2018 年 12 月 27 日, 国立天文台)(招待講演)
- 22. Yajima, Y., Sorai, K., 'Dynamical effect on molecular gas density and star formation in nearby barred spiral galaxies', "ALMA WS for Nearby Galaxies: Science and Techniques", (国立天文台, 2019 年 2 月) (一般講演)
- 23. Atsushi Yasuda, Nario Kuno, Yoshimasa Watanabe, Takahiro Tanaka, Shoichiro Kita, Kazuo Sorai, Kazuyuki Muraoka, Yusuke Miyamoto, Hiroyuki Kaneko, Hiroyuki Nakanishi, Tsutomu Takeuchi, Dragan Salack, Kana Morokuma, Yoshiyuki Yajima, Shugo Shibata, Moe Yoda, Yuto Noma, Mayu Kuroda, and COMING members, "Measurement of the amount of H2 gas in nearby galaxies", Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2018, (Tsukuba, Japan, September 21, 2018) (ポスター)
- 24. Atsushi Yasuda, Nario Kuno, Yoshimasa Watanabe, Takahiro Tanaka, Kazuo Sorai, Yoshiyuki Yajima, Shugo Shi-

- bata, Kazuyuki Muraoka, Mayu Kuroda, Yusuke Miyamoto, Hiroyuki Kaneko, Daniel Espada, Hiroyuki Nakanishi, Tsutomu Takeuchi, Moe Yoda, Kana Morokuma-Matsui, and COMING members, "CO-H2 conversion factor with Dust-to-Gas ratio in nearby galaxies", 2018 ALMA/45m/ASTE Users Meeting, (2018 年 12 月 26 日- 27 日, 国立天文台三鷹) (ポスター)
- 25. Takahiro Tanaka, Nario Kuno, Akihiko Hirota, Yoshimasa Watanabe, Dragan Salak, Kazuo Sorai, Tsutomu Takeuchi, Hiroyuki Kaneko, Yusuke Miyamoto, Yoshiyuki Yajima, Naomasa Nakai, 「Determination of the bar pattern speed in NGC 7479」、ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2018、(2018 年 12 月 26-27 日、国立天文台三鷹)(ポスター)
- 26. Yosuke Murayama, Tom Nitta, Shogo Hattori,Ryuji Suzuki, Ryota Hikawa, Pranshu Mandal, Guangyuan Zhai, Taishi Okumura, Nario Kuno, Naomasa Nakai, Makoto Nagai, Hiroshi Matsuo, Toshihiro Tsuzuki, Shan wenlei, Mitsuo Fukushima, Kenji Mitsui, Shohei Ezaki, Akihira Miyachi, Yutaro Sekimoto, Takashi Noguchi, Masato Naruse, "Optical characteristics of the 100-GHz band MKID camera for the Nobeyama 45-m telescope", 2018 ALMA/45m/ASTE Users Meeting, (2018 年 12 月 26 日-27 日, 国立天文台三鷹) (ポスター)
- 27. 奥村大志, "電波領域の点回折干渉計による新しい波面測定法", 第 48 回天文・天体物理若手夏の学校, (2018 年 7 月) (一般 講演)
- 28. 久野成夫, "南極テラヘルツ望遠鏡" , 日本学術会議マスタープラン 2020 第 2 回シンポジウム, (2019 年 1 月, 国立天文台) (一般講演)
- 29. 久野成夫, "南極テラヘルツ望遠鏡計画", 宇宙電波懇談会シンポジウム 2018:「電波天文学の将来サイエンス」, (2018 年 12 月, 国立天文台)(一般講演)
- 30. Murayama, Y., "100-GHz band continuum observations using the MKID camera for the Nobeyama 45-m telescope", TCHoU Workshop, (2019 年, 筑波大学) (一般講演)
- 31. Okumura, T., "Radio Point-diffraction Interferometer", TGSW-IWP, (筑波大学、2018) (ポスター)
- 32. Takahiro Tanaka, Nario Kuno, Akihiko Hirota, Yoshimasa Watanabe, Dragan Salak, Kazuo Sorai, Tsutomu Takeuchi, Hiroyuki Kaneko, Yusuke Miyamoto, Yoshiyuki Yajima, Naomasa Nakai, 「Direct measurement of the Bar pattern speed of barred spiral galaxy NGC 7479」, TGSW-IWP、(2018年, 筑波大学)(ポスター)
- 33. 新田冬夢, 他、「Commissioning of the 100-GHz band MKID camera for the Nobeyama 45-m telescope」、ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2018、(2018年12月26-27日、国立天文台)(ポスター)

10 素粒子構造研究部門 (Division of Elementary Particles)

部門長

武内 勇司(数理物質系物理学域准教授)

構成教員

石橋 延幸(数理物質系物理学域教授)

受川 史彦(数理物質系物理学域 教授)

原 和彦(数理物質系物理学域准教授)

佐藤 構二 (数理物質系物理学域 講師)

大川 英希(数理物質系物理学域助教)

伊敷 吾郎(数理物質系物理学域 助教)

佐藤 勇二 (数理物質系物理学域 助教) 2019年3月1日福井大へ転出

飯田 崇史(数理物質系物理学域 テニュアトラック助教)

金 信弘(数理物質系物理学域特命教授)

KIM, Soo-Bong (ソウル国立大学 教授) 海外教育研究ユニット招致 PI

吉田 拓生(福井大学教授)クロスアポイントメント教員

池上 陽一(KEK 准教授) クロスアポイントメント教員

連携教員

松浦 周二 (関西学院大学 教授) 客員教授

【人事異動】佐藤 勇二助教が退職し、福井大学准教授に転出した (2019年3月1日)。

素粒子構造部門では、大きく分けて3つの研究を行った。それらは、

- (1) ビーム衝突型の高エネルギー粒子加速器を用いた陽子陽子衝突実験
- (2) 宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索
- (3) 超弦理論の研究

である。

(1) は、欧州原子核研究機構(CERN 研究所)の LHC 加速器での陽子陽子衝突実験 ATLAS において、世界最高エネルギーでの素粒子反応を観測し、素粒子とその性質を実験的に解明する研究である。特に、ヒッグス粒子の性質の詳細な研究は、電弱対称性の破れと素粒子質量の起源を明らかにするとともに、素粒子標準理論を超える物理への手がかりを与える。LHC 加速器は、ビームエネルギーを本来の設計値で運転するために2013-2014年の2年間の改造・調整を行ってきたが、2015年度には、重心系エネルギー13 TeV での運転が開始され、ATLAS実験も新たなエネルギー領域での衝突事象データを取得し、物理成果も生みだしている。2019-2020年の2年間に再び加速器、及び検出器の増強が行われる。

当研究領域には国際テニュアトラック助教が配置された。同助教は CERN 研究所に常駐して、衝突実験を遂行し物理解析を行うとともに、検出器増強を行った。実験の現場に滞在することは極めて重要であり、現地の研究者との連絡を密にして連携を深め研究を推進し、また、現地に滞在する大学院生の教育を行った。

さらに 2020 年代半ばには LHC 加速器の輝度の大幅な向上が予定されており、ATLAS 検出器も増強が必要となる。そのための粒子飛跡検出器の開発を並行して行っている。当検出器開発は光量子計測器開発部門の

プロジェクトの一つとして密接な連携のもと進められており、当報告書の光量子計測器開発部門活動報告に詳細が記述されている。

- (2) は、ニュートリノがクォークやレプトンと比べてはるかに小さな質量を持つことに着目し、その質量の 絶対値を決定して素粒子質量の起源を解明することを目標とする。ニュートリノの輻射崩壊で生じる赤外線領域の光子を観測するために、超伝導接合素子(Superconducting Tunnel Junction、STJ)を用いた、高いエネルギー分解能を持つ光検出器を開発している。将来は、宇宙背景ニュートリノの観測のために、ロケットおよび人工衛星を利用した実験を計画している。なお、宇宙背景ニュートリノが観測されれば、素粒子物理学を超えて、宇宙論にも大きな影響を与える。
- (3) は、素粒子が点でなく弦(ひも)であるという考えに基づき、重力を含めた素粒子の基礎理論を構築しようという研究である。現在の素粒子標準理論は、相対論的な場の量子論をその枠組みとしているが、重力の量子論はまだ作られていない。超弦理論はその可能性を持つ最も有力な理論である。

上記プロジェクトの他にも、宇宙暗黒物質の直接探索やニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊探索実験への応用を見据えた新規大発光量シンチレータの開発も行われている。また、2011 年度に運転終了した陽子・ 反陽子衝突実験のデータを用いた物理解析も続行されている。

当部門では、これらの研究を通して、宇宙を構成する基本要素としての素粒子と、それらの間に働く相互作用について、その構造と本質を明らかにし、統一的な描像を得ることを目標とする。ひいては、ビッグバンに始まる宇宙の歴史の最初期を解き明かすことにつながる。以下に、2017年度に行われた研究活動をより詳しく述べる。

当センターでは、国内外の研究機関・研究者との連携をより緊密にして研究を強力に推進するための、密接な共同研究の体制を構築している。素粒子構造部門において 2017 年度には、以下の 3 名の研究者を本学教員として招き、活動を行っている。

教 授 KIM, Soo-Bong 国際教育研究ユニット招致 PI (韓国ソウル国立大学)

教 授 吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員、福井大学)

准教授 池上 陽一 (クロスアポイントメント教員、高エネルギー加速器研究機構)

また、大川英希(国際テニュアトラック助教)は 2017 年度半ばまで欧州原子核研究機構(CERN 研究所)に 常駐し、現地研究者と密に連携して、ATLAS 実験の検出器運転、データ取得、および物理解析に従事した。 テニュア審査を経て 2018 年 4 月にテニュアを獲得した。

Soo-Bong KIM 教授は、一年間の約一割の期間、筑波大学に滞在し、ニュートリノ崩壊探索のプロジェクトの共同研究者として、ニュートリノ崩壊探索実験の物理・検出器検討に参加している。また、自身が韓国や日本で行っているニュートリノ実験の知識・経験を踏まえて、韓国の素粒子物理実験分野のグループとの共同研究の提案、国内外のニュートリノ物理現状に関するセミナーや本学大学院生の教育にも当たっている。吉田教授も、一ヶ月間に数日の頻度で本部門に来訪し、ニュートリノ崩壊探索のプロジェクトの共同研究者として、福井大が所有する世界に類を見ない遠赤外分子レーザーの強みを活かし、主にニュートリノ崩壊光検出器・分光装置の校正用光源の検討に従事している。また、本部門教員や学生が福井大の遠赤外線分子レーザー装置を使用する際は、現地にて指導に当たった。池上准教授は、一ヶ月間に数日の頻度で来訪し、本部門教員と共にATLAS実験のシリコン検出器増強に従事し、本学、及び高エネルギー加速器研究機構において本学大学院生の指導に当たった。

(1) LHC ATLAS 実験(受川、原、佐藤構二、大川、池上、金) 欧州原子核研究機構 CERN の Large Hadron Collider (LHC) は、世界最高エネルギーでの陽子・陽子 衝突型加速器である。2011-2012年の Run-1実験では、重心系エネルギー $7 \sim 8$ TeV での陽子・陽子衝突を行った。2013-2014年のエネルギー増強のための改良を経て、2015年から 2018年の Run-2実験では、重心系エネルギー13 TeV で衝突実験を続けてきた。2019年ー2020年には、アップグレードのためのシャットダウンを行い、2021年から Run-3実験で、さらに多くの陽子・陽子衝突事象のデータを蓄積する予定である。

図 27 に ATLAS 実験で取得した年ごとのデータ量を示す。Run-2 で ATLAS 実験は、2015 年に $3.7~{\rm fb}^{-1}$ 、2016 年に $35.9~{\rm fb}^{-1}$ 、2017 年に $46.9~{\rm fb}^{-1}$ の衝突データを取得したのに引き続き、2018 年 も LHC 加速器、ATLAS 検出器ともに順調に運転し、 $63.3~{\rm fb}^{-1}$ のデータを記録した。

2018 年度にも、われわれは精力的に取得した衝突データを解析した。多くの物理解析では、 $2015\sim2016$ 年の 2 年間に取得した約 $36~{\rm fb}^{-1}$ 、または 2017 年までに取得していた $80~{\rm fb}^{-1}$ のデータ* 1 を用いて研究を行った。2019 年春には、2018 年末までの全 Run-2 データを用いた物理解析結果もいくつか公表した。

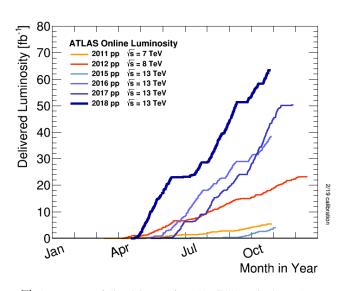


図 27 ATLAS 実験で取得したデータ量の推移を、年ごとに示している。

ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、ATLAS および CMS 両実験により、2012 年に LHC 加速器での陽子・陽子衝突データを用いて発見された。Run-1 のデータの解析によりすでに、スピン・パリティの測定結果が標準理論の予言値 0^+ と整合がよいことが確認された。ヒッグス粒子が弱ゲージボソン対に崩壊する $H \to ZZ^*$ 、 $H \to WW^*$ の崩壊モードおよび、トップクォークのループ・ダイアグラムが寄与する $H \to \gamma\gamma$ 崩壊が、 5σ を超える有意度で観測された。とくに、 $H \to ZZ^* \to 4\ell$ と $H \to \gamma\gamma$ の崩壊チャンネルは、バックグラウンドを抑えながら崩壊粒子をすべて検出できるため、ヒッグス粒子の精密測定に使いやすい。2018 年には、Run-1、Run-2 の全データを用いてこれら 2 崩壊チャンネルを解析した結果、ヒッグス粒子の質量は 124.97 ± 0.24 GeV/ c^2 と測定された。この質量測定解析での、チャンネルごとおよび 2 チャンネルを足し合わせた測定結果、または Run-1 と Run-2 データを単独で解析した測定結果の比較

^{*1} 記録された全データ量は 2 年間で $39.6~{\rm fb}^{-1}$ だが、検出器に不具合がある状況で取得したデータは物理解析には用いない。解析に使われるデータ量が取得した全データより少ないのはこのためである。

を図 28 に示す。この ATLAS 実験単独での結果は、Run-1 データを用いた ATLAS と CMS 両実験を 足し合わせて得られたこれまでの世界平均と同等の測定精度を達成している。

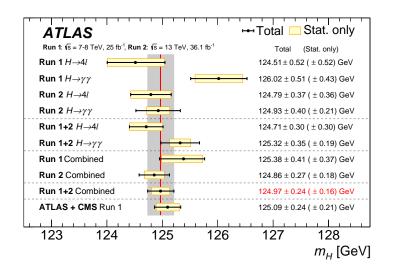
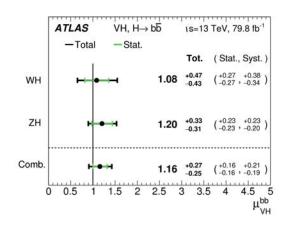


図 28 ATLAS 実験でのヒッグス粒子の質量測定結果。 $H\to ZZ^*\to 4\ell$ と $H\to \gamma\gamma$ の 2 チャンネルを合わせて測定しているが、同時に各チャンネルの単独の結果はお互いによく一致している。

Run-1 のデータの詳細な解析により、 $H \to \tau \tau$ が ATLAS と CMS 両実験の複合結果で 5σ を超える有意度で観測されたことで、Run-2 が始まる前には、ヒッグス粒子のフェルミオン対への崩壊も観測されていた。しかし、ヒッグス粒子とクォークとの結合を直接観測することは Run-2 での課題として残っていた。

標準理論では 125 GeV/ c^2 のヒッグス粒子のボトムクォーク対への崩壊分岐比は 58% と予想されている。一方で、ボトムクォークに起因するジェットは陽子・陽子の QCD 反応で高い頻度で生成されるため、膨大なバックグラウンドに $H\to b\bar{b}$ 事象は埋もれてしまって観測が難しい。ヒッグス粒子が弱ボソン W および Z を伴って生成される WH および ZH 生成過程で、W や Z ボソンがレプトンまたはニュートリノに崩壊する事象を探すことでバックグラウンドは大幅に減らすことができる。ATLAS 実験ではこれら解析チャンネルで $H\to b\bar{b}$ 崩壊の観測を目指してきたが、2017 年度には Run-2 データのうち 36.1 fb $^{-1}$ の解析により 3.5 σ の有意度で信号の兆候を観測していた。2018 年度には、Run-1 の全データと Run-2 の 79.8 fb $^{-1}$ のデータを用いて $H\to b\bar{b}$ 崩壊を 5.4 σ の有意度で観測することに成功した。標準理論の予言値で規格化した WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果と、2 つのボトムクォークの不変質量を図 29 に示す。

トップクォークは、湯川結合によって質量を得るフェルミオンの中でもっとも重く、したがってヒッグス粒子との結合が強い。そして、フェルミオンの中で唯一、電弱対称性が敗れるエネルギー・スケールに質量がある。トップクォークとヒッグス粒子の結合を測定することは、とくに興味深い。これを直接測定できる解析チャンネルが、 $t\bar{t}H$ 生成過程である。2017 年度には、ヒッグス粒子 WW^* , ZZ^* , $\gamma\gamma$, $b\bar{b}$ に崩壊する解析チャンネルの解析結果を足し合わせることで、36.1 fb $^{-1}$ のデータを使って 4.3 σ の有意度で信号の兆候を観測することができていた。2018 年度には、 $\gamma\gamma$ および $ZZ^* \to 4\ell$ 崩壊モードの解析を 79.8 fb $^{-1}$ の Run-2 データを用いてアップデートし、2017 年の WW^* , $b\bar{b}$ 崩壊モードの解析結果と新たに足し合わせた結果、6.3 σ の有意度で $t\bar{t}H$ 生成過程を観測することができた。事象の信号



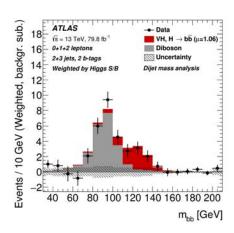
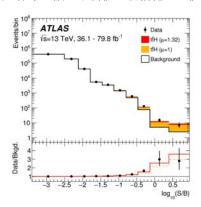


図 29 (E)WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果。測定値は、標準理論による理論値で規格化してある。測定結果は、標準理論の予言とよく一致している。(右) 事象内の 2 つのボトムクォークの不変質量の分布。電弱相互作用で生成される WZ と ZZ バックグラウンド事象以外のバックグラウンドの寄与を差し引いた後の分布であり、灰色の部分がバックグラウンド。ヒッグス粒子の信号のベストフィットを赤いヒストグラムで表している。

らしさを全チャンネルで一つにまとめてプロットした図と、 $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積を標準理論の予言値で規格化した値を、図 30 に示す。



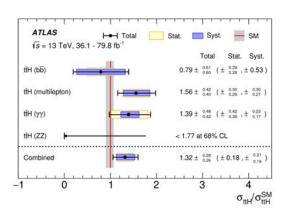


図 30 (左) $t\bar{t}H$ 事象探索の各解析チャンネルで評価した事象の信号らしさを、全チャンネルまとめてプロットしたもの。ここでの信号らしさは、各解析の最終段階のヒストグラムの S/B の値を使っている。(右) ヒッグス粒子の崩壊モードごとに測定した $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積と標準理論の予言値の比。

Run-1 での $H \to \tau\tau$ 、2018 年度の $H \to b\bar b$ と $t\bar t H$ 過程の観測により、LHC での研究が難しいニュートリノを除いて、第 3 世代のフェルミオンとヒッグス粒子の間の結合がすべて確認できた。続いて、第 2 世代のフェルミオンの質量の起源もヒッグス粒子であることを確かめることが大切であり、ATLAS 実験では、 $H \to \mu\mu$ の崩壊過程の観測を目指している。図 31 に、2018 年度にアップデートした解析における 2 つの μ 粒子の不変質量分布を示すが、いまのところバックグラウンドとの一致がよく、信号は確認できていない。ヒッグス粒子の生成断面積と $H \to \mu\mu$ 崩壊分岐比の積に対して、標準理論の予言値の 2.1 倍より大きい値を 95% の信頼度で棄却した。

ヒッグス粒子はもっとも最近に発見された粒子であり、その性質を詳しく測定して標準理論を厳しく 検証することは重要である。ATLAS実験では、ここまで述べてきた通り、さまざまなヒッグス粒子の 生成、崩壊過程を個別に測定し、標準理論の予言と比べている。同時に、これら複数の解析チャンネ

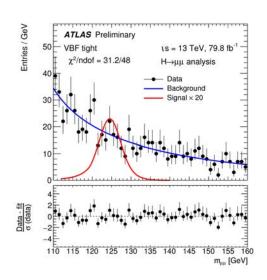


図 31 $H \to \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析。バックグラウンドが少ないベクトル・ボソン融合による生成過程に感度が高い解析チャンネルでの、2つの μ 粒子の不変質量分布。

ルを総合的に解析することで、より精度よくヒッグス粒子と他の標準理論粒子の間の結合の強さを測定することができる。2019 年 3 月には、79.8 fb $^{-1}$ のデータを用いて複合測定による結合測定をアップデートし、公表した。この解析では、79.8 fb $^{-1}$ のデータを用いた $H \to \gamma\gamma(t\bar{t}H$ 生成過程を含む)、 $H \to ZZ^* \to 4\ell(t\bar{t}H$ 生成過程を含む)、VH、 $H \to b\bar{b}$ 、 $H \to \mu\mu$ および、36.1 fb $^{-1}$ のデータを用いた $H \to WW^*$ 、 $H \to \tau\tau$ 、 $t\bar{t}H$ ($H \to b\bar{b}$ または $H \to b\bar{b}$ またに $H \to b\bar{b}$ または $H \to b\bar{b}$ または $H \to b\bar{b}$ またに $H \to b\bar{b}$ また $H \to b\bar{b}$ またに $H \to b\bar{b}$ またに $H \to b\bar{b}$ またに $H \to b\bar{b}$

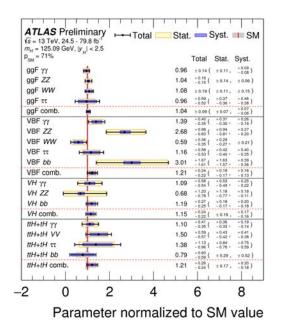
ヒッグス粒子が2個同時に生成される過程の探索

ヒッグス粒子が2つ同時に生成される事象は、LHCでは図33に示す生成過程が考えられる。標準理論通りであれば左と中の2つの過程が混ざりあって生成するが、こうした事象を発見し精密に測定することでヒッグス粒子の自己相互作用を測定できる。一方で、たとえば重い中性ヒッグス粒子など、標準理論を超える理論では、ヒッグス粒子2つに崩壊する重い新粒子を予言する理論も多い。そうした新粒子が存在すれば、2ヒッグス事象は標準理論の予言する頻度よりもはるかに頻繁に起こりうる。

ATLAS 実験では、ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象を、 $HH \to b\bar{b}\nu\bar{\tau}$, $HH \to b\bar{b}b\bar{b}$, $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \to W^+W^-W^+W^-$, $HH \to W^+W^-\gamma\gamma$, $HH \to b\bar{b}W^+W^-$ の各崩壊モードで探索した。信号はまだ確認できておらず、データはバックグラウンドとよく一致した。図 33 にこれら解析で得られた 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限を示す。全解析モードを合わせることで、標準理論が予言する生成断面積の 6.9 倍以上の断面積を棄却した。

標準理論を超えたヒッグス粒子の探索

標準理論では、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。一方で、有力視されている超対称性



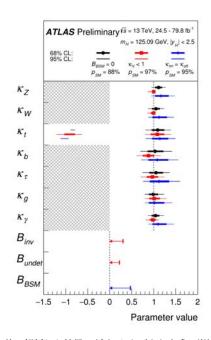


図 32 ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子解析の結果を総合的に解析した結果。(左)さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して、断面積と分岐比の積を測定した結果。結果は標準理論の予言値で規格化して表示している。(右)さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を、標準理論の予言する結合の値で規格化して表示している。光子とグルーオンの結合も実効的な量として測定する。フィットは、ヒッグス粒子が標準理論通りの崩壊しかしない場合(黒)、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊過の探索結果を考慮した場合(赤)、オフシェルでの $H \to ZZ^* \to 4\ell/2\ell 2\nu$ 解析からのヒッグス粒子の質量幅への制約を考慮した場合(青)の 3 通りで行った。

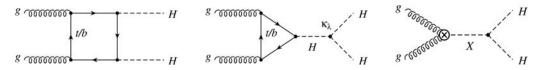


図 33 LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

理論をはじめ、標準理論を超えるさまざまな素粒子理論で、複数の種類のヒッグス粒子の存在が提唱されている。荷電を持ったヒッグス粒子の存在も、多くの理論で示唆されている。とくに、200 ${\rm GeV}/c^2$ 以上の質量の場合、荷電ヒッグス粒子はトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比が大きくなると予想されている。

2018年には、トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子を Run-2 データ $36.1~{\rm fb}^{-1}$ を使って探索したが、データがバックグラウンドの予想とよく一致しており、信号事象の有意な超過を観測しなかった。図 $35~{\rm c}$ 、荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して本研究が与えた上限値、および棄却した ${\rm h_{MSSM}}$ シナリオでのパラメータ領域を示す。

ATLAS 実験では、ここで記述した 2 ヒッグス過程や荷電ヒッグス粒子の探索以外にも多くの解析チャンネルで、既に発見されているのとは別のヒッグス粒子を探索している。これらさまざまな直接探索解析の結果による h_{MSSM} シナリオに対する制約をまとめたのが図 36 である。

ATLAS SCT シリコン検出器の運転

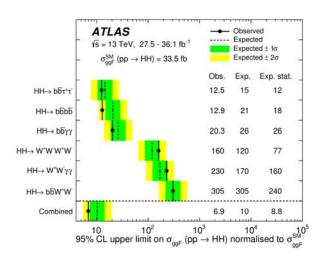


図 34 2ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。標準理論の予言値で規格化して表示している。

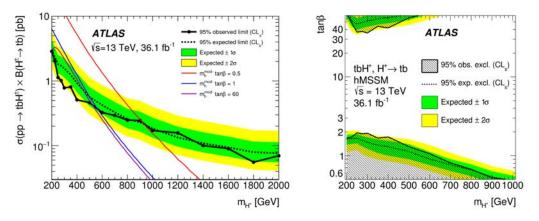


図 35 (左) 荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して得られた上限値。荷電ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットしている。(右) h_{MSSM} シナリオに対する制約。

2018 年は Run2 データ収集の最後の年となったが、筑波大グループでは建設に大きな貢献をした SCT シリコン半導体ストリップ型検出器を主とした内部飛跡検出器の運転に継続して取り組んだ。

(i) SCT 検出器の検出効率の評価

図 37 は 2018 年の運転期間における SCT 検出器の検出効率の推移を中央部(バレル部)と前後方部(エンドキャップ部)の 3 領域に分けて示すものである。検出効率は 99% 以上と高い値であるが、 3 領域による違いや変動の原因を調査した。暫定的な Run2 終了時の検出効率は 99.5%、99.2% であるが、2009 年の 99.8% や Run1 終了時の 99.74% は領域に依らず、値としても差異がある。調査の結果、データ取得が一時停止するためのみかけの効率低下が 0.2%(バレル部)もしくは 0.4~0.5%(エンドキャップ部)があり、これらを考慮するとすべての領域で SCT 検出器本来の検出効率は 99.7% であり、従来の評価値と不変である。SCT は 10 年の運転期間にわたり高い効率を維持していることを示す重要なデータである。

(ii) SCT 検出器総合効率のオンライン評価

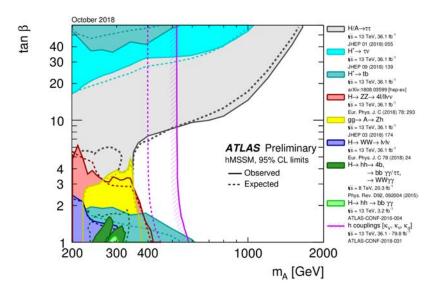


図 36 ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見できている 125 GeV/c^2 のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

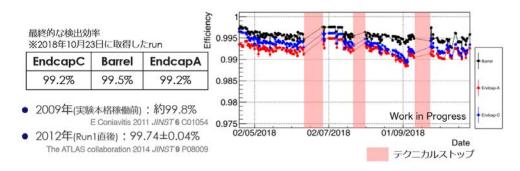


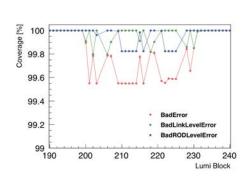
図 37 右側に 2018 年の運転期間中の SCT 検出効率の推移を 3 つの検出器領域に分けて示す。Run2 終了時での暫定 的な評価値と以前の評価値との比較を左に示す。詳細な評価により、SCT は 10 年の運転期間にわたり高い効率を維持していることが判明した。

ATLAS では収集データを約1分ごとに区分化した LumiBlock 単位で物理解析に用いることのできるデータ品質であるかを判断する。SCT では coverage という量を評価し、データ品質の指標に用いるが、これは衝突点から見込んだ SCT 検出面の正常動作割合であり単に検出効率だけでなくどの部分が動作していないかを考慮して総合的に評価する。図 38 左はその目的のためにプログラムを開発し計算した coverage の、ある区間の推移を示す。SCT の異常は様々な要因があるが、図にはそれぞれの原因のモニターに基づき、異常個所の位置を特定して算定している様子が示されている。

(iii) SCT 検出器のノイズ評価

シリコン検出器は放射線損傷のために特性が変化し、顕著な現象はバルク部の高抵抗 n 型シリコンが損傷により p 型に反転する。読み出し電極は低抵抗 p^+ で作製されているため、型反転後はセンサーを全空乏化しないと信号分離が失われる。不純物密度が増えることで全空乏化電圧は上昇するため、センサー耐圧(約 500 V)を超えると SCT の寿命となる。そのため、どのように放射線損傷を受けているかの理解は運転計画を大きく左右する。検出器のノイズ(入力電荷換算ノイズ ENC)は、ストリップ電極間の容量が大きく影響し、型反転前は少しのバイアス電圧で小さくなり一定値になるが、型反転後

は、全空乏化を経てから減少する。図 38 右は、放射線の影響を受けやすいバレル部最内層での ENC のバイアス電圧依存性を時間とともに評価した結果である。2017 年 11 月のデータから型反転の兆候が現れ、時間を経て全空乏化電圧が上昇している様子が伺える。現在、暗電流などのデータも含めて総合的に放射線損傷の評価を進めている。



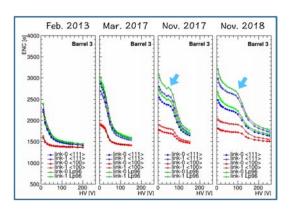


図 38 (左)あるデータ収集区間における SCT coverage の評価結果。これに基づき SCT が正常に動作し物理解析に使用できる状態であったかを判断する。(右)SCT 最内層(Barrel 3) の入力電荷換算ノイズ (ENC) のバイアス電圧依存性をセンサーの配置と種類ごとに時間経過とともに示す。

(2) 宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索(武内,飯田、S.B. Kim、吉田、金)

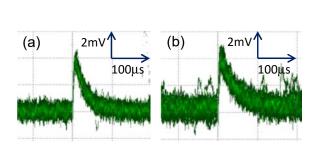


図 39 電荷-電圧利得を向上した試作 SOI 電荷積分型増幅器の 0.49fC 電荷入力に対する出力信号波形。増幅器を (a) 冷凍機内の室温環境下、及び (b) 同 3K 環境下 (b) における測定結果がそれぞれ示されている。

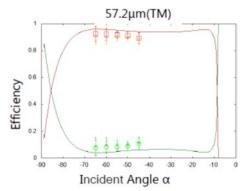


図 40 57 μ m の TM 偏光レーザー光源に対する評価用回折光子の 0,及び 1 次光回折強度比の実測データ (点),及びシミュレーション (曲線) の比較。

COBAND 実験は、筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同実験であり、現在観測値として与えられているニュートリノ寿命下限値 10^{12} 年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を観測する実験を計画中である。我々のグループでは、観測ロケット実験で使用予定のニオブ (超伝導ギャップエネルギー $\Delta=1.55$ meV, $T_c=9.23$ K) とアルミニウム ($\Delta=0.172$ meV, $T_c=1.20$ K) を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ (Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた超伝導ギャップエネルギーが更に小さいハフニウム ($\Delta=20~\mu{\rm eV},~T_c=0.165~{\rm K}$) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

現在,産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発,並びに STJ 信号極低雑音 読み出し系として KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っており、産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 素子は、低漏れ電流性能をほぼ達成している。極低温増幅器の 開発については、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いた増幅器の試作を行い、極低温で動作さ せた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した。超伝導トンネル接合素子 STJ は、比較的大きな静電容量を持つため、その信号増幅には低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器が 適している。そこで、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって実現された低入力インピーダンスの電 荷積分増幅器を FD-SOI プロセスにより設計・製作した。帰還容量により電荷-出力電圧利得を調整可 能であるが 0.1eV エネルギー領域に合わせた増幅器において極低温冷凍機の 3 K 環境での動作試験を 実施し、室温で期待された増幅率約 4mV/fC に対し極低温でもほぼ変わらない増幅率を確認した(図 39)。また増幅器自体がもつ出力の入力換算雑音電荷の実測値は冷凍機内部での使用環境下において約 $0.1 {
m fC}$ と測定され、これは近赤外光の単一光子 ($h
u \sim 1 {
m eV}$) に対する ${
m STJ}$ の応答電荷 $1 {
m fC}$ に対し十分 小さく, この近赤外の単一光子に対する STJ の応答信号の増幅器として実用に足ることが確認された。 実際の STJ 単一光子応答の増幅試験を現在準備中である。また利得の向上・入力換算雑音の改善には まだ十分な余地があり、性能向上は十分可能である。

また、Hf-STJ の開発においては、ハフニウム層形成条件を見直し表面粗さの小さい条件を使用し、150mK の温度での測定においてリーク電流密度を約 $3nA/\mu m^2$ までの低減を達成した。50mK 以下の温度での測定で、リーク電流は更に改善することが見込まれ、現在韓国 IBS のグループと共同研究により、無冷媒断熱消磁冷凍機を用いた 50mK 以下での測定、及び X 線源からの X 線に対する応答測定を行っている。

Nb/Al-STJ 単体では、25 meV の光子に対して必要なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出が実現できれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。ロケット実験に向けた望遠鏡の光学系及び Nb/Al-STJ による分光測定のための回折格子を含むロケット実験用の光学系の開発も福井大、関西学院大等との共同研究により進められている。回折格子設計には、予想されるニュートリノ崩壊光の波長域(約 50μ m)の波動光学シミュレーションが必要となるが、シミュレータソフトウェアの検証のため、福井大の遠赤外線分子レーザを用いた評価用回折格子の回折効率の実測値とシミュレーションの比較を行った(図 40)。実測値とシミュレーションは振る舞いが良く一致しており、シミュレータの妥当性が示された。現在、シミュレータソフトウェアをもとにロケット望遠鏡光学系の設計の要求値に応じた回折格子の設計を行っている。

(3) 超弦理論の研究(石橋,佐藤勇二,伊敷)

超弦理論グループは弦の場の理論,行列模型,ゲージ重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。弦の場の理論と次元正則化,弦の場の理論の古典解の研究,重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅,行列模型における古典極限と幾何学の関係,ゲージ理論の部分的閉じ込め相の研究等の超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

超弦理論は散乱振幅の摂動論に紫外発散がないことが知られているが、超弦の場の理論においてはコン

タクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上(釧路高専)らとのこれまでの研究で、様々な場合について光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化を用いた計算により、第一量子化の計算と一致する結果を得ることができるということを示してきた。今年度は、次元正則化を用いた超弦の場の理論から計算されるすべての散乱振幅が第一量子化の結果を再現することを示した(論文 121)。また、光円錐ゲージの超弦の場の理論を用いた 1 loop の計算の例を示した。

ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での4次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。

佐藤は、伊藤(東京工業大)、鈴木(静岡大)と共に、6 点強結合散乱振幅を与える Z_4 可積分模型の熱力学的ベーテ仮説方程式が、化学ポテンシャル・質量項が大きな極限で解析的に解けることを示し、対応する強結合 6 点散乱振幅を求めた。これは、散乱振幅の研究で重要な役割を果たしてきた Z_6 対称性を持つ運動学的配位および soft/collinear 極限での強結合散乱振幅を内挿する解析的表式を与えるものである。また、これまでに解析されてきた運動学的配位と対照的に、こうした運動学的配位においては強弱結合の散乱振幅の振舞いが大きく異なることを明らかにした(論文 122)。

行列模型における非可換幾何の研究

超弦理論の非摂動的定式化として期待されている行列模型では、弦や D ブレーンといった物体は、行列を変数とするある種の非可換幾何により表される。伊敷・松本は Sogang 大学の村木研究員との共同研究において、この非可換幾何が Berezin-Toeplitz 量子化と呼ばれる方法により通常の微分幾何と対応づけられることを示した (論文 123)。伊敷と松本はさらにこの対応について研究を進め、非可換幾何における微分同相写像を定式化した (論文 124)。また、伊敷・松本は上述の村木研究員、慶応大学の松浦教授、前橋工科大学の浅川嗣彦准教授らとともに、伊敷が過去に提唱した行列の幾何学の定式化について研究を行った。その結果、この方法が超弦理論におけるタキオン凝縮と呼ばれる現象において重要な役割を果たすことが示された (論文 125)。

constant magnetic field に対応した弦の場の理論の古典解の研究

弦の場の理論の運動方程式の厳密解は、Schnabl によるタキオン真空解の発見以来活発に研究されている。最近 Erler と Maccaferri は、時間に依らない運動方程式の解の場合、任意の BCFT に対応する厳密解を書き下すことができることを示した。石橋は、岸本 (新潟大)、増田 (プラハ物理学研究所)、高橋 (奈良女子大) らとともに、Erler と Maccaferri の方法を用いて構成された constant magnetic field に対応した弦の場の理論の厳密解のベクトル場の配位とトポロジーとの関係を調べた (論文 126)。

ゲージ理論の部分的閉じ込め相の研究

伊敷・渡辺は英国 Southanpton 大学の花田研究員との共同研究において、ゲージ理論における閉じ込め相と非閉じ込め相の中間領域に「部分的閉じ込め相」と呼ばれる新たな相が存在し得ることを指摘した (論文 127)。伊敷らはオーダーパラメータであるポリヤコフループの位相分布が、いくつかのゲージ理論で実際に部分的に閉じ込めを起こしていることを確かめた。さらに調べた全ての例におい

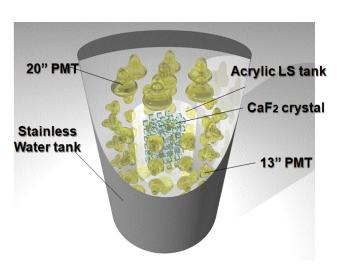
て、部分的閉じ込め相から完全な非閉じ込め相への相転移は2次元のゲージ理論において発見された Gross-Witten-Wadia 相転移と同じ形をとることが確認され、この性質が部分的閉じ込め相の持つ普遍 的なものであることが示唆された。伊敷らはさらにこの部分的閉じ込め相が、ゲージ/重力対応の文脈 において小さなブラックホールの存在する相に対応することを議論した。

(4) ニュートリノ二重ベータ、新規大発光量シンチレータの開発(飯田)

⁴⁸Ca の二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノ研究に残された喫緊の課題は,質量の絶対値測定やマヨラナ性の検証であり,これは物質や宇宙の成り立ちを理解する上で欠かせない。ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)の観測は,これらを一気に解明しうる現実的に唯一の手段である。ニュートリノがマヨラナであった場合,粒子・反粒子は同一であり,片方の核子から出たニュートリノがもう一方に吸収される $0\nu\beta\beta$ が起こりうる。この崩壊率がニュートリノ有効質量の二乗に比例するため, $0\nu\beta\beta$ の半減期から未だ不明なニュートリノ質量の測定も可能である。また,マヨラナ粒子は右巻きと左巻きでそれぞれ別の質量項を持つことが出来る。我々の世界では左巻きニュートリノしか観測出来ないが,右巻きニュートリノの非常に重い質量を考えると,振動実験で示唆される極端に小さいニュートリノ質量を自然に説明できる(シーソー機構)。さらに粒子数保存則が破れ,宇宙初期に生成された重い右巻きニュートリノの崩壊にCPの破れを考慮することで現在の物質優勢宇宙を説明することが出来る(レプトジェネシス)。

我々は大阪大学等と共同で岐阜県の神岡地下実験施設内に CANDLES 検出器を構築し、 48 Ca の二重ベータ崩壊の研究を推進している。 48 Ca は Q 値が $^{4.27}$ MeV と全核中最大であり、あらゆる自然放射線のベータ線、ガンマ線よりも高いため、超低バックグラウンド観測が実現可能である。CANDLES は岐阜県神岡の地下 1000 m に約 300 kg の 200 CaF2 シンチレータ結晶を 200 の液体シンチレータ中に沈め、周囲に 62 本の光電子増倍管を配置したプロトタイプ検出器(図 41)を作り、将来計画に向けたスタディを行っている。



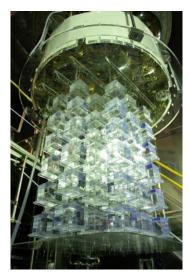
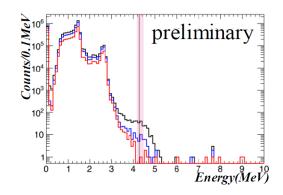


図 41 CANDLES 実験の概略図(左)と CaF₂ 結晶の写真(右)

2017 年には 131 日間の測定データを用いて、 48 Ca に対して、これまでで世界最高感度を達成した。

2018 年度は,この結果を国内外の会議で報告するとともに,低バックグラウンド測定を継続し,新たに 373 日分のデータを得ることに成功した。合計 504 日分のデータから得られたエネルギースペクトルを 図 42 左に示す。これは Th 系列の放射性不純物量が 10 μ Bq 以下の高純度結晶を抽出した場合である。 すべてのカットかけた後,Q 値領域(4.17 - 4.48 MeV)で残ったのは 1 事象であったが,これは Th 系列の放射性不純物含有量から予測されるバックグラウンド数と矛盾しない。この結果から 48 Ca の二 重ベータ崩壊に対する世界最高感度を更新し続けている。

また、二重ベータ崩壊探索実験では、単一エネルギーの信号を探索するためエネルギースケールの較正が極めて重要である。しかし、 48 Ca の場合、Q値(4.27 MeV)が高いため、標準的に使用できるガンマ線源では較正が難しく、系統誤差として問題になっていた。そこで我々は 28 Si や 58 Ni が中性子を捕獲した際に出すガンマ線を利用したエネルギー較正システムを開発した。これは Si や Ni の粉末をポリエチレンで固めてブロック状にし、複数個のブロックを検出器の上部に組み上げて中心に中性子線源を配置したものである。これにより、今まで2.61 MeV で行っていた較正が、Q値を挟むように複数の点で行うことが可能となった。2018 年度はこのシステムを用いて取られたデータの解析から、検出器のQ値におけるエネルギースケールの精度の見積もりを行った。図42 右はこの較正システムを用いて得られた結果である。横軸は今まで通り2.61 MeV で較正されたエネルギーであり、下図の縦軸が各ガンマ線の再構成エネルギーが実際のエネルギーとどれだけずれているかを表している。これによりQ値におけるエネルギースケールは0.3% 以内で一致しており、十分な精度が確認された。



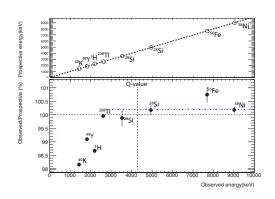


図 42 (左) CANDLES 実験で得られたエネルギースペクトル。各カットステップごとに載せているが、赤色の線が全てのカットをかけた後のスペクトルである。(右) 新エネルギー較正システムを導入して得られた結果で、3 MeV 以上の 4 点が新たに加わった較正点。上下とも横軸は 2.61 MeV で較正されたエネルギー、上図縦軸はガンマ線エネルギーの真のエネルギー(文献値)、下図縦軸は真のエネルギーと較正エネルギーの比である。

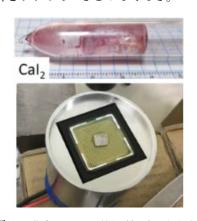
新規高性能シンチレータの開発

宇宙暗黒物質の直接探索実験やニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 $(0\nu\beta\beta)$ 探索実験などの,低エネルギー極稀事象探索のための新規無機シンチレータ結晶の開発を東北大学と共同で行っている。暗黒物質のエネルギーは指数関数的に分布しており,どれだけ低いエネルギーまで観測出来るかが非常に重要になる。一方の $0\nu\beta\beta$ 探索実験では,ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 $(2\nu\beta\beta)$ が究極のバックグラウンドとなるが,それを防ぐためにはエネルギー分解能を高める必要がある。また,どちらの事象も極めて稀なため,大量の標的を用意する必要がある。これらの問題を解決するためには,大発光量のシンチレータを開発することが一つの鍵となりうる。

ヨウ化カルシウム (CaI₂) 結晶は 1964 年に R. Hofstadter らによって発見されており, 一般的に用い

られる NaI(Tl) の 2 倍以上の発光量であることが知られている。しかし、当時の未熟な結晶育成・加工技術のせいで、一般に広まることなく技術が埋没してしまった。我々は、無機シンチレータの育成加工に高い実績を誇る東北大学金属材料研究所の吉川研究室と共同で、同研究室が所有する最新の装置と技術を駆使して CaI₂ を含む新規高性能シンチレータ結晶の技術を確立することを目指している。 2017 年度に作成した CaI₂ 結晶で、NaI(Tl) の 2.7 倍となる 107,000 ph./MeV を達成している。 2018

年度には、その CaI_2 の波形弁別能力の調査を行った。暗黒物質や二重ベータ崩壊の探索実験においては、低バックグラウンド環境が極めて重要であり、無機シンチレータでは粒子毎の波形の違いを用いた波形弁別法によって信号とバックグラウンドを分離して、低バックグランド環境を実現する方法が一般的に用いられる。作製した結晶(図 43 左上)をドライルーム内で $5\times5\times1$ mm 程度のサイズに切り出し、図 43 左下のように光電子増倍管で光信号を読みだした。アルファ線源として 241 Am、ガンマ線源として 137 Cs を用いて、その波形を 400 MHz サンプリングレートの Waveform digitizer で取得し、データ解析を行い比較した。それぞれ 1 万事象のデータを取得し、平均波形を作成したものを図 43 右に示す。赤がアルファ線、黒がガンマ線を照射した際の波形だが、特に最初の 300 ns に大きな違いがあることを発見した。これは CaI_2 が非常に高い波形弁別能を持つことを示唆しており、現在詳細な解析をすすめているところである。



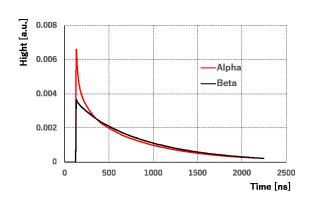


図 43 作成した Cal₂ 結晶 (左上) を切り出して、光電子増倍管上に設置した (左下)。右図は、アルファ線(赤)とガンマ線(黒) を照射した際の平均波形。

上記の通り, CaI_2 結晶が非常に高いシンチレータ特性を示す一方で,劈開性が極めて強く加工や取り扱いが困難であることも分かっている。そこで我々は, CaI_2 のヨウ素 (I) を一部臭素 (Br) で置き換えた, $CaBr_{2-x}I_x$ の開発も並行して進めることにした。 CaI_2 と同様の石英封止型ブリッジマン法を用い作製した Eu 添加 $CaBr_{0.7}I_{1.3}$ 結晶を図 44 左に示す。一部を Br で置き換えることにより劈開性が弱まり,5 mm 角で切り出すことに成功した。図 44 右は,横軸が $CaBr_{2-x}I_x$ の x の値,縦軸が発光量の関係である。組成を変えて何種類か試した結果,ヨウ素の割合が多い方が,発光量が大きくなることが判明した。また,Eu ドープの有無を比較した場合,Br を混ぜたものでは,Eu をドープした方が,発光量が大きくなることも分かった。加工性と発光量を考慮し,今後は Br と I が 1:1 である CaBrI の大型化を目指していく。

(5) <u>陽子・反陽子衝突実験 CDF</u> (受川, 原, 武内, 佐藤構二, S.B. Kim, 吉田, 金) CDF 実験は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり、日本をはじめアジア、北米、欧州の計 14 ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれ

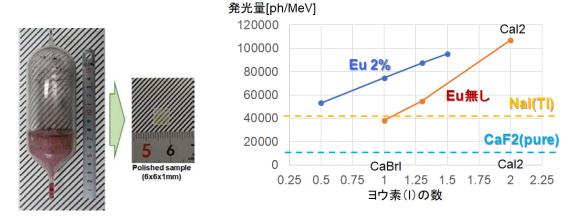


図 44 (左)作成した ${
m CaBr_{0.7}I_{1.3}}$ 結晶。劈開性が弱まったため,加工が可能となった。(右)横軸が ${
m CaBr_{2-x}I_x}$ の x の値,縦軸が発光量の関係。青が Eu ドープ有,オレンジが Eu ドープ無である。比較のため,NaI(Tl) と ${
m CaF_2}$ の 発光量を載せている。

た。2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが,2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 $\rm fb^{-1}$ である。この全データを用いた物理解析もそのほとんどが終了し,論文の発表も終幕を迎えつつある。2018—19 年には 7 篇の原著論文が公表された。

金信弘特命教授が CDF 実験における研究業績「2TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップクォークの発見, Bc 中間子の発見, および Bs 中間子の粒子反粒子振動の初観測をはじめとする素粒子物理の研究」により, 2018 年度成和記念財団「金萬有学術賞」を受賞した。受賞式は 2019 年 5 月 11 日に学士会館(東京)で開催された。

2019 年春には、CDF 実験グループが D0 実験グループとともに、欧州物理学会の 2019 年高エネルギー素粒子物理学賞を受賞することが決定した。対象は「トップクォークの発見とその性質の詳細な測定」である。この賞は 1989 年に創設され、2 年毎に、高エネルギー物理学の実験、理論、もしくは技術領域における傑出した貢献を成した個人や共同研究グループに授与されるものである。受賞式は7月15日に EPS-HEPP Conference 2019、Ghent、Belgium において開催される。

〈査読付き論文〉

- T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa et al. [CDF Collaboration], "Search for Higgs-like particles produced in association with bottom quarks in proton-antiproton collisions," Phys. Rev. D 99, no. 5, 052001 (2019).
- 2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa et al. [CDF Collaboration], "Measurement of the differential cross sections for W -boson production in association with jets $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV," Phys. Rev. D 98, 112005 (2018).
- 3. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], "Search for standard-model Z and Higgs bosons decaying into a bottom-antibottom quark pair in proton-antiproton collisions at 1.96 TeV," Phys. Rev. D **98**, 072002 (2018).
- 4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa et al. [CDF and D0 Collaborations], "Tevatron Run II combination of the effective leptonic electroweak mixing angle," Phys. Rev. D 97, 112007 (2018).
- T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa et al. [CDF Collaboration], "A search for the exotic meson X(5568) with the Collider Detector at Fermilab," Phys. Rev. Lett. 120, 202006 (2018).
- T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa et al. [CDF and D0 Collaborations],
 "Combined Forward-Backward Asymmetry Measurements in Top-Antitop Quark Production at the Tevatron,"
 Phys. Rev. Lett. 120, 042001 (2018).

- 7. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa et al. [CDF Collaboration], "Search for $B_s^0 \to \mu^+\mu^-$ and $B^0 \to \mu^+\mu^-$ decays with the full CDF Run II data set," Phys. Rev. D 87, no. 7, 072003 (2013) Erratum: [Phys. Rev. D 97, 099901 (2018)].
- 8. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the $Z\gamma \to \nu \overline{\nu} \gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings," JHEP **1812**, 010 (2018).
- 9. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Comparison between simulated and observed LHC beam backgrounds in the ATLAS experiment at $E_{\rm beam}=4$ TeV," JINST 13, no. 12, P12006 (2018).
- 10. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Observation of $H \to b\bar{b}$ decays and VH production with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **786**, 59 (2018).
- 11. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the azimuthal anisotropy of charged particles produced in $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.02$ TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 12, 997 (2018).
- 12. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1811**, 085 (2018).
- 13. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Combination of the searches for pair-produced vector-like partners of the third-generation quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. 121, no. 21, 211801 (2018).
- 14. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using 36 fb⁻¹ of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 98, no. 5, 052008 (2018).
- 15. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying into hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092005 (2018).
- 16. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Constraints on off-shell Higgs boson production and the Higgs boson total width in $ZZ \to 4\ell$ and $ZZ \to 2\ell 2\nu$ final states with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **786**, 223 (2018).
- 17. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. **121**, no. 19, 191801 (2018). Erratum: [Phys. Rev. Lett. **122**, no. 8, 089901 (2019)]
- 18. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena in events with same-charge leptons and *b*-jets in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1812**, 039 (2018).
- 19. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for dark matter in events with a hadronically decaying vector boson and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP 1810, 180 (2018).
- 20. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs bosons produced via vector-boson fusion and decaying into bottom quark pairs in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 98, no. 5, 052003 (2018).
- 21. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson pair production in the $\gamma\gamma WW^*$ channel using pp collision data recorded at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 12, 1007 (2018).
- 22. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for charged Higgs bosons decaying via $H^{\pm} \to \tau^{\pm}\nu_{\tau}$ in the τ +jets and τ +lepton final states with 36 fb⁻¹ of pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment," JHEP **1809**, 139 (2018).
- 23. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for lepton-flavor violation in different-flavor, high-mass final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092008 (2018).
- 24. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson pair production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ final state with 13 TeV pp collision data collected by the ATLAS experiment," JHEP **1811**, 040 (2018).
- 25. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Prompt and non-prompt J/ψ elliptic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}}=5.02$ Tev with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **78**, no. 9, 784 (2018).

- 26. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Searches for exclusive Higgs and Z boson decays into $J/\psi\gamma$, $\psi(2S)\gamma$, and $\Upsilon(nS)\gamma$ at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 786, 134 (2018).
- 27. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for pair- and single-production of vector-like quarks in final states with at least one Z boson decaying into a pair of electrons or muons in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Phys. Rev. D 98, no. 11, 112010 (2018).
- 28. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Observation of centrality-dependent acoplanarity for muon pairs produced via two-photon scattering in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. 121, no. 21, 212301 (2018).
- 29. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for the Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying into two spin-zero particles in the $H \to aa \to 4b$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1810**, 031 (2018).
- 30. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Probing the quantum interference between singly and doubly resonant top-quark production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. 121, no. 15, 152002 (2018).
- 31. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of higgsinos in final states with at least three *b*-tagged jets in $\sqrt{s} = 13$ TeV *pp* collisions using the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092002 (2018).
- 32. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Operation and performance of the ATLAS Tile Calorimeter in Run 1," Eur. Phys. J. C 78, no. 12, 987 (2018).
- 33. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for chargino-neutralino production using recursive jigsaw reconstruction in final states with two or three charged leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092012 (2018).
- 34. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying into high- p_T W bosons and top quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1808**, 048 (2018).
- 35. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for resonant WZ production in the fully leptonic final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **787**, 68 (2018).
- 36. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 784, 173 (2018).
- 37. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the Higgs boson mass in the $H \to ZZ^* \to 4\ell$ and $H \to \gamma\gamma$ channels with $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector," Phys. Lett. B **784**, 345 (2018).
- 38. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena using the invariant mass distribution of same-flavour opposite-sign dilepton pairs in events with missing transverse momentum in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **78**, no. 8, 625 (2018).
- 39. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Combined measurement of differential and total cross sections in the $H \to \gamma \gamma$ and the $H \to ZZ^* \to 4\ell$ decay channels at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **786**, 114 (2018).
- 40. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for resonances in the mass distribution of jet pairs with one or two jets identified as *b*-jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, 032016 (2018).
- 41. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of jet fragmentation in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. C 98, no. 2, 024908 (2018).
- 42. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of dijet azimuthal decorrelations in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and determination of the strong coupling," Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092004 (2018).
- 43. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the suppression and azimuthal anisotropy of muons from heavy-flavor decays in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}}=2.76$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. C **98**, no. 4, 044905 (2018).
- 44. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for flavor-changing neutral currents in top quark decays $t \to Hc$ and $t \to Hu$ in multilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 3, 032002 (2018).

- 45. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Angular analysis of $B_d^0 \to K^* \mu^+ \mu^-$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1810**, 047 (2018).
- 46. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Prompt and non-prompt J/ψ and $\psi(2S)$ suppression at high transverse momentum in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS experiment," Eur. Phys. J. C 78, no. 9, 762 (2018).
- 47. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of colour flow using jet-pull observables in $t\bar{t}$ events with the ATLAS experiment at $\sqrt{s}=13\,\text{TeV}$," Eur. Phys. J. C 78, no. 10, 847 (2018).
- 48. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for supersymmetry in final states with charm jets and missing transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector," JHEP 1809, 050 (2018).
- 49. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for heavy resonances decaying to a photon and a hadronically decaying Z/W/H boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 3, 032015 (2018).
- 50. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of b-jet tagging efficiency with the ATLAS detector using $t\bar{t}$ events at $\sqrt{s}=13$ TeV," JHEP 1808, 089 (2018).
- 51. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for heavy particles decaying into top-quark pairs using lepton-plus-jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 7, 565 (2018).
- 52. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "A search for lepton-flavor-violating decays of the Z boson into a τ -lepton and a light lepton with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 98, 092010 (2018).
- 53. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for R-parity-violating supersymmetric particles in multi-jet final states produced in p-p collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC," Phys. Lett. B **785**, 136 (2018).
- 54. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with ATLAS," Phys. Rev. D **98**, no. 3, 032009 (2018).
- 55. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for low-mass dijet resonances using trigger-level jets with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Phys. Rev. Lett. **121**, no. 8, 081801 (2018).
- 56. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for a heavy Higgs boson decaying into a Z boson and another heavy Higgs boson in the $\ell\ell bb$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **783**, 392 (2018).
- 57. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson decays into pairs of light (pseudo)scalar particles in the $\gamma\gamma jj$ final state in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **782**, 750 (2018).
- 58. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for top squarks decaying to tau sleptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, no. 3, 032008 (2018).
- 59. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for flavour-changing neutral current top-quark decays $t \to qZ$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1807**, 176 (2018).
- 60. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of up-type vector-like quarks and for four-top-quark events in final states with multiple b-jets with the ATLAS detector," JHEP 1807, 089 (2018).
- 61. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for electroweak production of supersymmetric particles in final states with two or three leptons at $\sqrt{s} = 13 \,\text{TeV}$ with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 12, 995 (2018).
- 62. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Eur. Phys. J. C 78, no. 11, 903 (2018).
- 63. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of differential cross sections of top quark pair production in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," JHEP **1810**, 159 (2018).
- 64. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for the Decay of the Higgs Boson to Charm Quarks with the ATLAS Experiment," Phys. Rev. Lett. 120, no. 21, 211802

- (2018).
- 65. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **98**, 052005 (2018).
- 66. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson decays to beyond-the-Standard-Model light bosons in four-lepton events with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV," JHEP **1806**, 166 (2018).
- 67. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for photonic signatures of gauge-mediated supersymmetry in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 97, no. 9, 092006 (2018).
- 68. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for a Structure in the $B_s^0\pi^\pm$ Invariant Mass Spectrum with the ATLAS Experiment," Phys. Rev. Lett. 120, no. 20, 202007 (2018).
- 69. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for $W' \to tb$ decays in the hadronic final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **781**, 327 (2018).
- 70. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for High-Mass Resonances Decaying to $\tau\nu$ in pp Collisions at \sqrt{s} =13 TeV with the ATLAS Detector," Phys. Rev. Lett. **120**. no. 16, 161802 (2018).
- 71. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of $t\bar{t}$ differential cross-sections of highly boosted top quarks decaying to all-hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Rev. D 98, no. 1, 012003 (2018).
- 72. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the cross section for isolated-photon plus jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Lett. B 780, 578 (2018).
- 73. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a $b\bar{b}$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **97**, no. 7, 072016 (2018).
- 74. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 97, no. 7, 072003 (2018).
- 75. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *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**, no. 5, 052010 (2018).
- 76. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the production cross section of three isolated photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Lett. B **781**, 55 (2018).
- 77. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the inclusive and fiducial $t\bar{t}$ production cross-sections in the lepton+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, 487 (2018).
- 78. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *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 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector," JHEP **1803**, 174 (2018). Erratum: [JHEP **1811**, 051 (2018).]
- 79. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for heavy ZZ resonances in the $\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ and $\ell^+\ell^-\nu\bar{\nu}$ final states using proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 4, 293 (2018).
- 80. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for exclusive Higgs and Z boson decays to $\phi\gamma$ and $\rho\gamma$ with the ATLAS detector," JHEP **1807**, 127 (2018).
- 81. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 36 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **97**, no. 11, 112001 (2018).
- 82. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the Higgs boson coupling properties in the $H \to ZZ^* \to 4\ell$ decay channel at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1803**, 095 (2018).
- 83. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1806**, 022 (2018).

- 84. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 3, 186 (2018).
- 85. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for top-squark pair production in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum using 36 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector," JHEP **1806**, 108 (2018).
- 86. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the Soft-Drop Jet Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector," Phys. Rev. Lett. **121**, no. 9, 092001 (2018).
- 87. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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).
- 88. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of differential cross sections and W^+/W^- cross-section ratios for W boson production in association with jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1805**, 077 (2018).
- 89. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of inclusive jet and dijet cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP 1805, 195 (2018).
- 90. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and multiple *b*-jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1806**, 107 (2018).
- 91. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 1, 18 (2018).
- 92. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *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, no. 3, 199 (2018).
- 93. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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).
- 94. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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).
- 95. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 3, 250 (2018).
- 96. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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**, no. 3, 032003 (2018).
- 97. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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**, no. 5, 052012 (2018).
- 98. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a Z boson in protonproton collisions at 13 TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **780**, 557 (2018).
- 99. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 1, 24 (2018).
- 100. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 2, 102 (2018).
- 101. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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**, no. 3, 032005 (2018).
- 102. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for additional heavy neutral Higgs and gauge bosons in the ditau final state produced in 36 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1801**, 055 (2018).

- 103. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "A search for resonances decaying into a Higgs boson and a new particle X in the $XH \rightarrow qqbb$ final state with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 779, 24 (2018).
- 104. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], "Combination of inclusive and differential $t\bar{t}$ charge asymmetry measurements using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV," JHEP **1804**, 033 (2018).
- 105. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 2, 129 (2018).
- 106. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of τ polarisation in $Z/\gamma^* \to \tau\tau$ decays in protonproton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 2, 163 (2018).
- 107. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of quarkonium production in protonlead and protonproton collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 3, 171 (2018).
- 108. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of longitudinal flow decorrelations in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 2.76$ and 5.02 TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 78, no. 2, 142 (2018).
- 109. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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).
- 110. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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).
- 111. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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, no. 2, 154 (2018).
- 112. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *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).
- 113. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the exclusive $\gamma\gamma \to \mu^+\mu^-$ process in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 777, 303 (2018).
- 114. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *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**, no. 2, 024904 (2018).
- 115. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for a new heavy gauge boson resonance decaying into a lepton and missing transverse momentum in 36 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment," Eur. Phys. J. C 78, no. 5, 401 (2018).
- 116. M. Aaboud, K. Hara, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of jet fragmentation in 5.02 TeV proton-lead and proton-proton collisions with the ATLAS detector," Nucl. Phys. A 978, 65 (2018).
- 117. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *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**, no. 2, 110 (2018). Erratum: [Eur. Phys. J. C **78**, no. 11, 898 (2018).]
- 118. M. Aaboud, K. Hara, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa 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).
- 119. S. H. Kim, Y. Takeuchi, K. Takemasa, K. Nagata, K. Kasahara, S. Yagi, R. Wakasa, R. Senzaki, K. Moriuchi, C. Asano, S. B. Kim et al., "Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment," Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017), SPPHY 213, 242 248 (2018).
- 120. K.Takemasa, S.H.Kim, Y.Takeuchi et al., "Development of Superconducting Tunnel Junction Detector Using Hafnium for COBAND Experiment," Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017), SPPHY 213, 254 - 258 (2018).
- 121. N. Ishibashi, "Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Superstring Field Theory for Type II Superstrings," arXiv:1810.02801 [hep-th], UTHEP-724.

- 122. Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, "MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations," JHEP 1808 (2018) 002.
- 123. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, "Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry," Phys.Rev. D98 (2018) no.2, 026002.
- 124. G. Ishiki, T. Matsumoto, "Diffeomorphisms on Fuzzy Sphere," arXiv:1904.00308 [hep-th], UTHEP-734.
- 125. T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura and H. Muraki, "Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation," PTEP 2018, no. 6, 063B04.
- 126. N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda and T. Takahashi, "Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background," JHEP 1805 (2018) 144.
- 127. M. Hanada, G. Ishiki, H. Watanabe, "Partial Deconfinement," JHEP 1903, 145 (2019).
- 128. M. Anderson, T. Iida, et al., "Search for invisible modes of nucleon decay in water with the SNO+ detector," Phys. Rev. D 99, 032008 (2019).
- 129. K. Nakajima, T. Iida, et al., "Background studies of high energy γ rays from (n, γ) reactions in the CANDLES experiment,"
 - Astroparticle Physics, Volume 100, July 2018, Pages 54-60

〈その他論文等〉

1. S.H. Kim et al. (COBAND collaboration), "宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験," 観測ロケットシンポジウム 2018 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2018 https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/897525. SA6000127012, IV-2 (2018), (Online edition)(査読なし).

〈学位論文〉

[修士論文]

- 1. 内山 和貴: HL-LHC に向けたシリコンピクセル検出器の雑音及び検出効率の研究
- 2. 山内 大輝: 大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX4 で構築した飛跡再構成システムの 120 GeV ビームを用いた性能評価
- 3. 和田 冴:4 次元飛跡検出のための内部増幅機能付き半導体検出器 LGAD の基礎研究
- 4. 栗田 竣介:「QED の漸近対称性と低エネルギー領域の物理」
- 5. 武田 潤:「非臨界次元の弦理論と $Tar{T}$ deformation」
- 6. 渡辺 展正:「ゲージ/重力対応における small Schwarzschild black hole の新しい記述法」

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- Hideki Okawa, "Latest results on the H(125) from the LHC",
 Asian Linear Collider Workshop (ALCW) 2018, May 28 June 1, 2018, Fukuoka, Japan. (招待講演)
- 2. Shunsuke Honda, "Highlights of top quark production measurements at ATLAS", LISHEP2018, International School on High Energy Physics, Sept. 9 14, 2018, Salvador, Brazil. (招待講演)
- 3. S.H. Kim *et al.*, "Development of Superconducting Tunnel Junction Far-Infrared Photon Detectors for Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND Experiment", ICHEP2018, July 4–11, 2018, COEX Seoul, Korea (一般講演)
- 4. Y. Takeuchi, "COBAND, Cosmic Background Neutrino Decay Search", International Symposium on Neutrino Frontiers (ISoNF2018), Jul. 16–19, 2018, ICISE center, Quy Nhon, Vietnam (招待講演)
- 5. Y. Takeuchi et al., "Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND experiment",
- the 13th Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE13), Sep. 10-13, 2018, Sorrento, Italy (招待講演)
- 6. T. Iida, K. Takemasa, "Development of Hafnium STJ for cosmic neutrino background search,"
 The 15th Vienna Conference on Instrumentation(VCI2019), Feb. 19-23, 2019, Vienna, Austria (ポスター)
- 7. A. Kasajima *et al.*, "Development of Cryogenic Charge Sensitive Amplifier for STJ readout," TGSW-IWP2018, Sep. 21, 2018, Tsukuba, Ibaraki, Japan. (ポスター)
- 9. S.H. Kim, "Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND Experiment Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ",
 - CUP Seminar, Oct. 16, 2018, IBS/CUP, Daejeon, Korea (セミナー)
- 10. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge string field theory and dimensional regularization Computation of FI D

terms

西宮湯川記念国際滞在型研究会 "New Frontiers in String Theory 2018", July 2-August 3, 2018, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan.(招待講演)

- 11. Nobuyuki Ishibashi,「An overview of string field theory」 KEK theory workshop 2018, 17-20 December 2018, KEK, Tsukuba, Japan.(招待講演)
- 12. Yuji Satoh, 「World-sheet approaches to non-geometric backgrounds in string theory」 String: T-duality, Integrability and Geometry, March 4 – March 8, 2019, Tohoku Forum for Creativity, Sendai, Japan.(招待講演)
- 13. Goro Ishiki, 「The gauge/gravity correspondence for the BFSS matrix model」
 International workshop "Quantum Gravity meets Lattice QFT," Sep 3–7, 2018, The European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento, Italy. (招待講演)
- 14. Goro Ishiki, 「Diffeomorphisms for fuzzy spaces」
 International workshop "Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory," Jul 9–13, 2018, The Erwin Schrodinger International Institute for Mathematics and Physics, Vienna, Austria. (招待講演)
- 15. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」 IPMU Focus Week on Quantum Gravity and Holography, Japan, Apr 2-6, 2018, Kavli IPMU, Chiba, Japan. (招待講演)
- 16. Takaki Matsumoto, 「Diffeomorphism for fuzzy spaces,」 KEK theory workshop 2018 Dec 17–20, 2018,(KEK, Ibaraki, Japan. (ポスター)
- Takaki Matsumoto, 「Diffeomorphism for fuzzy sphere,」
 YITP workshop "Strings and Fields 2018," Jul 30-Aug 3, 2018, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto,
 Japan.
- 18. T. Iida *et al.*, 「First result of the CANDLES III experiment searching for double beta decay of 48Ca,」 XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO2018), 2018 年 6 月 4 日, Heidlberg, Germany.(ポスター)
- 19. T. Iida *et al.*, 「High light yield calcium iodide (CaI2) scintillator for astroparticle physics ,」The 15th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2019), 2019 年 2 月 18 日, Vienna, Austria. (ポスター)

[国内学会・研究会]

- 1. 和田冴: 内部増幅機能付き検出器 (LGAD) 開発に向けた基礎研究, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス. (一般講演)
- 2. 大鳴匡至: 内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) のビームテストに用いるテレスコープの位置分解能の評価, 日本物理学会 第74 回年次大会(2019 年 3 月 14–17 日), 九州大学伊都キャンパス. (一般講演)
- 3. 本多俊介:ATLAS 検出器を用いたトップクォーク・ヒッグス粒子随伴生成の H → bb-bar 崩壊様式での探索, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年 3 月 14–17 日),九州大学伊都キャンパス . (日本物理学会 若手奨励賞受賞記念講演)
- 4. 若狭玲那:LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるシリコンストリップ検出器の検出効率の測定, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス. (一般講演)
- 5. 内山和貴: ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器のノイズ評価, 日本物理学会 第74回年次大会(2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス. (一般講演)
- 6. 原田大豪: ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器の放射線照射後の性能評価, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス. (一般講演)
- 7. 大鳴匡至:HL-LHC に向けた初期量産型 ATLAS ストリップ型検出器の放射線耐性の評価, 日本物理学会 2018 年秋季大会大会(2018 年 9 月 14–17 日), 信州大学松本キャンパス. (一般講演)
- 8. 佐藤構二:ATLAS 実験でのトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索, 日本物理学会 2018 年秋季大会大会(2018 年 9 月 14–17 日),信州大学松本キャンパス. (一般講演)
- 9. 内山和貴:ATLAS 検出器増強に向けた新型 ASIC 搭載ピクセルセンサーモジュールの性能評価,日本物理学会 2018 年秋季大会大会(2018 年 9 月 14–17 日),信州大学松本キャンパス. (一般講演)
- 10. 原田大豪: ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセルセンサーモジュールの閾値の評価, 日本物理学会 2018 年秋季大会大会 (2018 年 9 月 14-17 日), 信州大学松本キャンパス. (一般講演)
- 11. 和田冴: 内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の時間分解能測定法最適化に関するテストビームデータを用いた研究, 日本物理学会 2018 年秋季大会大会 (2018 年 9 月 14-17 日), 信州大学松本キャンパス. (一般講演)
- 12. 武政健一: COBAND 実験に向けた超伝導検出器の開発, 宇宙史研究センター第1回構成員会議・成果報告会 (2018 年 6 月 4 日), 筑波大学. (一般講演)
- 13. 武内勇司:COBAND プロジェクト, 宇宙史研究センター第 1 回構成員会議・成果報告会 (2018 年 6 月 4 日), 筑波大学. (招待講演)
- 14. 若狭玲那: COBAND 実験に向けた極低温電荷積分型前置増幅器の研究開発, 埼玉大学 素粒子論研究室セミナー (2018 年 6 月 8 日), 埼玉大学. (セミナー)
- 15. 金信弘:宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,

ISAS 観測ロケットシンポジウム (2018 年 7 月 17-18 日), JAXA/ISAS. (一般講演)

16. 武政健一: COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 IV,

日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日), 信州大学. (一般講演)

17. 笠島誠嘉: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 VIII, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日), 信州大学. (一般講演)

18. 飯田崇史: COBAND 実験のための光学系設計開発 I, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日), 信州大学. (一般講演)

19. 飯田崇史: COBAND 実験報告,

第 2 回 TCHoU 全体会議 (2018 年 11 月 22 日), 筑波大学. (招待講演)

20. 金信弘:宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験, 核物理将来 WG 第 4 回研究会 (2019 年 1 月 31 日-2 月 1 日), KEK. (招待講演)

21. 武内勇司: R&D of FIR quantum photo-sensors based on STJs for COBAND, 第1回 TCHoU ワークショップ (2019年2月4-5日), 筑波大学. (招待講演)

22. 辻悠汰:"アンテナ構造付 Nb/Al-STJ の品質評価,

第1回 TCHoU ワークショップ (2019年2月4-5日), 筑波大学. (招待講演)

23. 武政 健一:遠赤外一光子分光のための Hf-STJ 開発,

第1回 TCHoU ワークショップ (2019年2月4-5日), 筑波大学. (招待講演)

24. 寺田 侑史: STJ 信号増幅及び SOI-FET 極低温動作,

第1回 TCHoU ワークショップ (2019年2月4-5日), 筑波大学. (招待講演)

25. 笠島 誠嘉: STJ 信号増幅のための電荷積分型極低温 SOI 増幅器の開発,第1回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)

26. 橋 光太郎:遠赤外域分光光学系の開発,

第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日),筑波大学. (招待講演)

27. 高橋光太郎, 辻悠汰, 寺田侑史: (ポスター発表) COBAND 実験に向けた STJ 遠赤外領域単一光子分光検出器の開発, 第 4 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 3 月 8 日), つくば国際会議場. (ポスター)

28. 橋光太郎: COBAND 実験のための光学系設計開発 II,

日本物理学会第74回年次大会(2019年3月14-17日), 九州大学伊都キャンパス. (一般講演)

29. 笠島誠嘉:COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 IX,

日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14–17 日),九州大学伊都キャンパス. (一般講演)

30. 伊敷吾郎:「行列の幾何と Berezin-Toeplitz 量子化,」

東京理科大学研究会「ポアソン幾何とその周辺」, 東京理科大学, 2018年12月8日-9日. (招待講演)

31. 松本高興: 「Berezin-Toeplitz quantization and diffeomorphisms for fuzzy spaces,」 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会, 2018 年 9 月 9 日-12 日, 東北大学. (招待講演)

32. J. Cotler, 花田政範, 伊敷吾郎, 渡辺展正:「ゲージ/重力対応におけるブラックホールと部分的非閉じ込めの関係,」 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日–17 日, 九州大学. (一般講演)

33. 伊敷吾郎,松本高興:「D ブレーン間の相互作用と行列正則化,」 日本物理学会第74回年次大会,2019年3月14日-17日,九州大学.(一般講演)

34. 伊敷吾郎, 松本高興: 「Diffeomorphism for fuzzy sphere,」 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 14 日–17 日, 信州大学. (一般講演)

35. 飯田崇史: 「宇宙史研究のための CaI2 シンチレータ開発の現状 II,」 日本物理学会 2018 年秋季大会,2018 年 9 月 14 日–17 日, 信州大学.(一般講演)

36. 飯田崇史:「新規シンチレータによるニュートリノ物理,」

Scintillator for Medical, Astroparticle and Environmental Radiation Techniques 2017 (SMART2018) , 2018 年 5 月 18 日, 沖縄科学技術大学院大学. (招待講演)

37. 飯田崇史:「新規高性能シンチレータによる宇宙史研究,」

関西学院大学理工学部講演会, 2018 年 6 月 13 日, 関西学院大学三田キャンパス. (招待講演)

38. 飯田崇史:「素粒子地下実験入門:日本のニュートリノ研究最前線,」

徳島大学物理学科セミナー, 2018 年 12 月 14 日, 徳島常三島キャンパス. (セミナー)

39. 飯田崇史:「二重ベータ崩壊探索実験のための新規シンチレータ開発,」 第 33 回放射線検出器とその応用, 2019 年 1 月 29 日, 高エネルギー加速器研究機構小林ホール. (一般講演)

40. 飯田崇史: 「ダブルベータ,」

第4回「核物理の将来WG(基礎物理班)」研究会, 2019年2月1日, 高エネルギー加速器研究機構4号館. (招待講演)

〈その他特記事項〉

〈受賞〉

1. 和田 冴:2018 年度筑波大学数理物質科学研究科研究科長表彰。

"4 次元飛跡検出のための内部増幅機能付き半導体検出器 LGAD の基礎研究"(修士論文,筑波大学,2019 年)

- 2. 渡辺展正:2018年度筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻長賞,
 - "ゲージ/重力対応における small Schwarzschild black hole の新しい記述法" (修士論文, 筑波大学, 2019 年)
- 3. 本多俊介:第13回(2019年)日本物理学会若手奨励賞素粒子実験領域,
 - "Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector" (博士論文, 筑波大学, 2018 年)
- 4. 金 信弘:2018 年度(第 42 回)成和記念財団「金萬有学術賞」,「2TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップクォークの発見,Bc 中間子の発見,および Bs 中間子の粒子反粒子振動の初観 測をはじめとする素粒子物理の研究」
- 5. CDF and D0 Collaborations: the 2019 European Physical Society $^{\lceil}$ High Energy and Particle Physics Prize $_{
 lap{I}}$, "for the discovery of the top quark and the detailed measurement of its properties."

〈国際会議・研究会の実施〉

- 1. 伊敷吾郎:研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス」世話人 (東北大学, 2018 年 9 月 9 日-12 日).
- 2. 飯田崇史:研究会「Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2018)」 実行委員

(沖縄科学技術大学院大学, 2018年5月17~19日).

11 クォーク・核物質研究部門 (Division of Quark Nuclear Matters)

部門長

江角 晋一(数理物質系物理学域 准教授)

構成教員

三明 康郎(数理物質系物理学域教授)

小澤 顕(数理物質系物理学域 教授)

中條 達也 (数理物質系物理学域 講師)

Norbert Novitzky (数理物質系物理学域 助教) 海外教育研究ユニット招致 副 PI

坂井 真吾(数理物質系物理学域研究員)

金谷 和至 (数理物質系物理学域 教授) 宇宙史研究センター長

山口 貴之(埼玉大学准教授)クロスアポイントメント教員

小沢 恭一郎 (高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所 准教授) クロスアポイントメント教員 佐甲 博之 (日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・ハドロン原子核物理研究グループ 研 究主幹) クロスアポイントメント教員

Thomas Peitzmann(オランダ・ユトレヒト大学 教授)海外教育研究ユニット招致 PI 2018 年 3 月 \sim Marco van Leeuwen(オランダ・ユトレヒト大学 教授)海外教育研究ユニット招致 PI 2018 年 3 月 \sim

連携教員

藏增 嘉伸(数理物質系物理学域教授)

谷口 裕介(数理物質系物理学域准教授)

鈴木 伸司(数理物質系物理学域助教)

杉立 徹 (広島大学・理学研究科 教授) 客員教授

濱垣 秀樹 (長崎総合科学大学・新技術創成研究所 教授) 客員教授

秋葉 康之(理化学研究所・仁科加速器研究センター・延興放射線研究室 副主任研究員)客員教授

若杉 昌徳 (理化学研究所・仁科加速器研究センター 実験装置開発室長) 客員教授

永宮 正治(高エネルギー加速器研究機構 名誉教授、理化学研究所 研究顧問)

郡司 卓(東京大学・理学系研究科・原子核科学研究センター 准教授)

志垣 賢太 (広島大学・理学研究科 教授)

ドイツ・ハイデルベルグ大学滞在の Oliver Busch 国際テニュアトラック助教は、2018 年 4 月からつくばでのテニュア助教としての着任準備を進めていたが、インフルエンザからの肺炎により入院先のドイツ・マンハイムの病院で 2018 年 3 月 31 日に、急逝された。

クロスアポイント教員のオランダ・ユトレヒト大学の Thomas Peitzmann 氏、Marco van Leeuwen 氏は、 筑波大学グループと LHC-ALICE 実験を共同で推進するとともに、ALICE 実験における将来計画である FoCal 検出器の開発研究を共同で進めた。また、原子力研究開発機構の佐甲博之氏、高エネルギー加速器研究機構の小沢恭一郎氏は、J-PARC 施設における高密度核物質研究に関する共同研究を進め、埼玉大学の山口貴 之氏は、理研の RIBF 施設における元素合成に関する共同研究を進めた。

ビッグバン直後の宇宙初期に実現したと考えられるクォーク・グルオン・プラズマ状態から通常のハドロン 物質への相転移前後のクォーク物質の様々な熱力学的性質は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解 明において重要である。これは本質的に非摂動的な問題であり、格子 QCD による QCD 第一原理からの大規模シミュレーションが不可欠である。クォーク物質の相構造や熱力学特性を引き出すために、有限温度・有限密度格子 Q C D を研究し、またそのための技術開発を進めた。スイス・フランスの欧州共同原子核研究機構(CERN)の LHC 加速器や、アメリカ・ブルックへブン国立研究所(BNL)の RHIC 加速器を用いた高エネルギーの原子核実験衝突実験により、高温の宇宙初期状態から高密度の中性子星内部の状態にわたる広範囲の QCD 層構造の解明を目指している。特に、2018 年度末から始まった RHIC における第 2 期ビームエネルギー走査実験(BES2)により、QCD 臨界点と 1 次相転移の探索実験を行う。将来的には、ドイツ FAIR 計画、ロシアの NICA 計画、中国の HIAF 計画や、日本の J-PARC 施設での重イオン加速計画などによる、臨界点の向こう側のさらに高密度領域での研究を目指す。また、理研での RIBF 施設における元素合成研究による宇宙における物質生成のメカニズム、超新星爆発、中性子星合体、ブラックホール合体における物質生成を紐解く研究を推進する。

(1) LHC-ALICE 実験における重心系衝突エネルギー 5.02 TeV 陽子-陽子衝突での荷電粒子ジェット生成量測定高エネルギー原子核衝突実験において、ある特定の方向・領域に高運動量の粒子群がしばしば観測される。この現象はジェットと呼ばれ、衝突初期における大きな運動量移行を伴ったパートン散乱 (Hard scattering) を起源とする。このジェット生成の素過程は摂動計算が可能であることが期待され、摂動論的量子色力学 (pQCD) による理論的な予言が可能である。このため、実験による測定結果と理論予測との比較を通じて、pQCD 計算の予言能力を検証することができる。

本研究は、欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型円形加速器 (LHC) を用いた ALICE 実験によって 2015 年に収集された重心系衝突エネルギー 5.02 TeV での陽子-陽子衝突実験データを 我々筑波大学グループが中心となり解析したものである。観測された荷電粒子情報に基づき、荷電粒子ジェットの生成断面積を測定した。実験による測定結果は Next-to-Leading Order (NLO) までの pQCD 計算に基づく理論計算結果と比較され、測定結果が理論予測とよく一致することが確認された (図 45)。本結果は論文として査読付き学術誌 (Phys. Rev. D) へと投稿され、2019 年 6 月現在査読中である [1]。

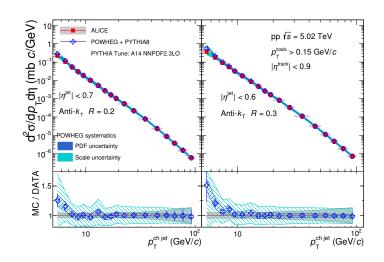


図 45 測定された荷電粒子ジェットの生成断面積と NLO pQCD 計算に基づく理論予測との比較 [1]

LHC-ALICE 実験における heavy flavour 起源の jet 測定

高エネルギー原子核衝突実験における特有の現象に、parton のエネルギー損失による粒子生成の抑制がある。量子色力学 (QCD) の計算によるとエネルギー損失は parton の質量に依存することが予想されており [2]、高温高密度下での QCD 検証をする上でエネルギー損失機構を理解することは重要である。LHC-ALICE 実験では主に D meson や heavy flavour 起源 (charm quark と beauty quark) 電子を測定することにより、QGP 中での heavy flavour のエネルギー損失の研究が行われており、現在までに heavy quark を含む粒子生成の強い抑制効果が確認されている [3][4]。さらに詳細なエネルギー損失機構を理解をするためには初期の parton レベルの情報を引き出す必要があり、heavy flavour 起源のjet (charm, beauty quark が形成する粒子群) の測定が進められている。図 46 は陽子-鉛衝突実験で測定された heavy-flavour 起源の電子を含む jet の生成断面積を QCD が予想する haevy flaour 由来 jet の生成断面積と比較したものである。QCD 計算はよく実験結果を再現しており、この測定方法で heavy flavour 起源の jet 測定が可能であることがわかる。今後は charm quark と beauty quark 由来の jet の分離を行い、エネルギー損失の研究を推進する。

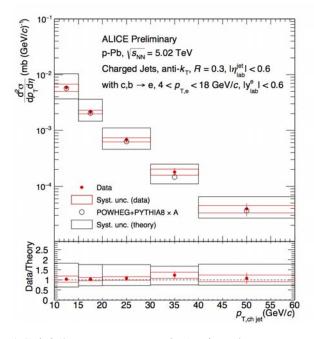


図 46 陽子-鉛衝突実験での heavy flavour 起源の電子を含む jet と QCD による予想

LHC-ALICE 実験における重クォーク起源の電子の測定

欧州原子核研究機構にある世界最大の加速器 LHC では $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV の p-Pb 衝突という世界最高の衝突エネルギーでの p-A 衝突データが 2016 年に取得された。図 47 は、この 8.16 TeV p-Pb 衝突 のデータを用いて取得に成功した重クォーク起源電子の断面積を用いた pp 衝突に対する p-Pb 衝突での粒子生成量の増大/抑制の度合いを定量的に表す因子である Nuclear modification factor(R_{pPb}) である。結果、重クォークの生成抑制は 8.16 TeV p-Pb 衝突においても見られずジェットクエンチングが起こっていないことがわかった。また、 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV の結果との比較から、冷たい原子核効果に衝突エネルギー依存性はなく両衝突エネルギーにおいてその影響は同程度であることがわかった。[5]

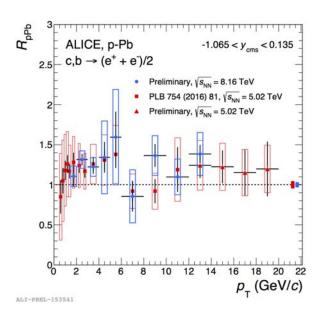


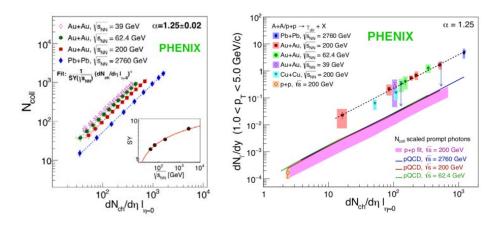
図 47 $\sqrt{s_{NN}}=5.02~{
m TeV}$ と $\sqrt{s_{NN}}=8.16~{
m TeV}$ p-Pb 衝突における重クォーク起源の電子の R_{pPb} の比較

(2) Universal scaling of the direct photon production

Direct photons emerging from the heavy ion collisions are considered an important probe of the entire evolution of the colliding system. Unlike the hadron observables which mostly encode information at the freezout temperature, the direct photons have a much longer mean-free-path, hence, once they are created escape the medium without further interaction. Theory predicted that the created thermal medium in heavy ion collisions would emit thermal radiation in forms of direct photons. In experimental data a large low- $p_{\rm T}$ excess of direct photons compared to the $N_{\rm coll}$ -scaled pQCD expectations is contributed to the thermal radiation of the system. The measured 'thermal' radiation is the mixture of the partonic and hadronic states of the dynamic evolution of the medium.

The thermal photon production depends on the temperature of the system, in analogy of the black body radiation (Stefan-Boltzmann law) the yield of the emitted photons are proportional to the third power of the temperature. Experimentally, we can control the volume of the created medium at fixed collision energy by varying the centrality - which is proportional to the charged particle multiplicity in the collision system. We observe [6] a universal slope of the number of nucleon-nucleon binary collisions as a function of the particle multiplicity of various heavy ion collisions at different collisions energies $(N_{coll} \propto (dN_{ch}/d\eta)^{1.25})$, shown in left panel in Fig. 48.. While varying the collision energy enable us to create different energy densities in the collisions. Combining both controls, the measured charge particle multiplicity is reflecting the total energy in the collision system. Therefore, the study of the thermal photon production as a function of the total energy would shine the light on the created collision system. The integrated yield of direct photons as a function of the charged particle density show a universal scaling with a slope approximately of

 $dN^{\gamma}/d\eta \propto (dN_{ch}/d\eta)^{1.25}$, shown in right panel in Fig 48. The direct photon production in the heavy ion collisions is factor of 10 higher then the expected yield from the binary scalled p+p collisions. The paper of the measurement [6] has been accepted in the Phys. Lett. journal and to be published in near future.



 \boxtimes 48 Left: Geometrical scaling of the number of binary collisions as a function of the charged multiplicity in heavy ion collisions. Right: The integrated direct photon yield $(p_T > 1 \text{ GeV}/c)$ as a function of the charged multiplicity.

(3) RHIC-STAR 実験における net-charge 分布の高次揺らぎ測定

格子 QCD 計算によれば、低バリオン密度領域における QGP 相-ハドロン相の相転移は、明確な境界のないクロスオーバーであると考えられている。しかし現在のところ、クロスオーバーを示す実験的な証拠は見つかっていない。QCD 相図、特に一次相転移の終わりを示す臨界点の位置を明らかにするため、RHIC では 2010 年から 2014 年にかけてさまざまなビームエネルギーで原子核衝突実験が行われた。net-charge 分布の揺らぎは、臨界点の位置を探るうえで重要なシグナルを示すと考えられている。図 49 は、BESI で測定された各衝突エネルギーにおける net-charge 揺らぎの $\Delta\eta$ 依存性を示している [7]。STAR では 2018 年に EPD が導入され、衝突点の前後方で中心衝突度を決めることで、volume fluctuation の影響を軽減することが期待されている。

RHIC-STAR 実験における 2 粒子相関の反応平面依存性

重イオン衝突では、強く散乱したパートンと QGP との間に強い相互作用が生じる。pT の高いトリガー粒子との Dihadron 方位角相関について研究することは、ジェットと媒体の間の相互作用について理解する為の有効な手段である。重イオンの初期形状を制御するために提案された ESE (Event Shape Engineering) は、同じ粒子多重度クラス内でフローベクトルの大きさを選択することによって、イベントごとのフローの変動を抑制する。セントラリティと ESE を組み合わせることによって、これまでのイベントプレーン依存の Dihadron 相関の測定よりもジェットと媒体の相互作用についてより深く理解できると考えられる。今回の解析には 2011 年に行われた $\sqrt{s_{NN}}=200{\rm GeV}$ 金 + 金衝突における 2 次事象面に関するトリガー角選択を伴う 2 粒子相関の測定データを用いた。この結果、図 50 から、反応平面方向ではジェットの通過・突き抜け効果が支配的であり、それと垂直方向では失われたエネル

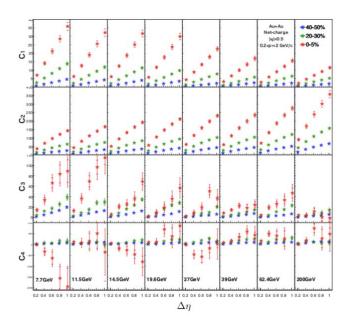


図 49 net-charge 揺らぎの $\Delta\eta$ 依存性

ギーの再分配効果が支配的であると思われる。したがって、QGP の幾何学的形状とその集団的膨張が ジェットに伴う粒子生成に影響を与えていると考えられる [8]。

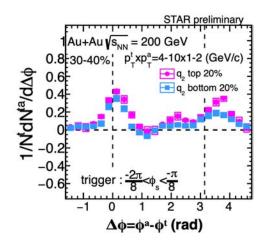


図 50 セントラリティ 30-40% における ϕ 方向の 2 粒子相関

RHIC-STAR 実験における固定標的実験 指向的方位角異方性の測定

QCD 相構造において、QGP 相からハドロン相への一次相転移面を探索するために有効な測定量が、系の密度、圧力状態に敏感とされる v_1 である。しかし、この特性を完全に説明する理論モデルは存在しない。よって、一次相転移面を探索するプローブとして v_1 を用いるために、 v_1 の特性をより詳しく調べる事が非常に重要である。そこで未だ詳細に測られていないエネルギー領域である、固定標的を用いた金 + 金 $\sqrt{s_{NN}}=4.5~{\rm GeV}$ において、 v_1 を粒子種毎に測定し、 p_T 、ラピディティ依存性に

関する解析を行った。図 51 は各粒子の v_1 の p_T 依存性で、メソンはどの粒子種も同様の傾向を示し、 $p_T < 0.6~GeV/c$ では v_1 の符号は負、 $p_T > 0.6~GeV/c$ では正を示していることがわかる。一方 バリオンは、ラピディティを分割することで、おおよそどの領域でも p_T に対して単調増加を示すことが分かった。これらの結果は低い衝突エネルギーにおける v_1 の振る舞いに対し新たな立場を与え、今後の理論モデルに対して制限を与える事ができると考えられるため引き続き定量的な判断をする必要がある。指向的方位角異方性 v_1 は二つの原子核の通過中のプロセスに由来する量であるため、衝突初期の状態、特に系の密度や圧力に対して敏感な測定量であるとされている。流体力学計算によると、相転移面において状態方程式の最も柔らかい点(softest point)が観測されると予測され、 v_1 はこの softest point において、 $dv_1/dy|_{ycm}=0$ が極小値を持つという特徴的な振る舞いが期待されている [9]。 $\sqrt{s_{NN}}=4.5~{\rm GeV}$ における QGP 生成は起こっておらず、また、 v_1 の起源は衝突初期ではなく、衝突過程の後期に起こるハドロン相互作用が支配的である事が分かった。定量的な判断をするために引き続き実験を行う必要がある。

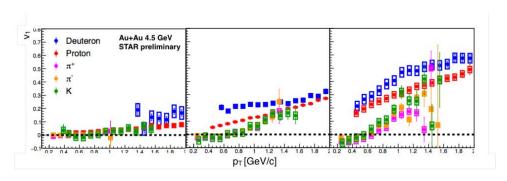


図 51 各粒子の v_1 の p_T 依存性

RHIC-STAR 実験における 1 次イベント平面に対する HBT 半径の方位角依存性の測定

高エネルギー原子核衝突実験では同種粒子間の量子力学的な干渉効果を用いることにより、衝突後 QGP がハドロン層へと冷やされ放出粒子の運動量が決定する時間 (運動学的フリーズアウト) における粒子源のサイズを調べることができる HBT 測定というものがある。HBT 測定によって得られる粒子源のサイズ (HBT 半径) を指向的方位角異方性の主軸 (1 次イベント平面) に対して方位角毎に分けて測定することにより、粒子発生源のサイズだけでなく発生源の幾何学的形状、特にビーム軸方向からの系の傾きを測定することが可能になり、運動量空間における指向的方位角異方性に対して空間的な視点から新たな情報を提供することが期待されている [10]。RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200~{\rm GeV}$ 金+金衝突において 1 次イベント平面に対する HBT 半径の方位角依存性の測定を行なった。図 52 は金+金衝突における HBT 半径の 1 次のイベント平面に対する方位角依存性の結果である。図 52 の、 $R_{\rm ol}^2$ 及び $R_{\rm sl}^2$ には方位角に対して 1 次の振幅が見えている。これは 1 次のイベント平面に対して フリーズアウト時における粒子源のビーム軸からの傾き (Tilt) の寄与が、 $\sqrt{s_{NN}}=200~{\rm GeV}$ のエネルギー領域においても存在することを示唆している。この粒子源の傾きは先行研究でのモデル予測ともおおよその一致を示している。引き続きこの粒子源の傾きがどのように他の測定量に影響しているかの研究を行っていく必要がある。

RHIC-STAR 実験における Λ の Global polarization の測定

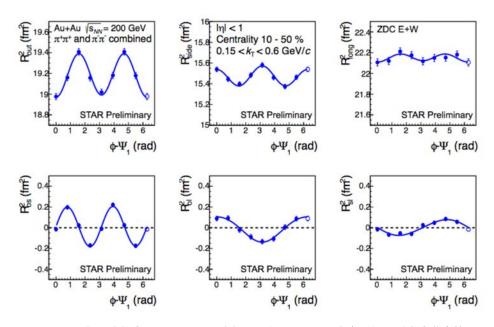


図 52 金 + 金衝突における HBT 半径の 1 次のイベント平面に対する方位角依存性

近年の研究から原子核衝突実験において、非中心衝突事象では生成される系は非常に大きな渦構造を持つことが考えられている。この QGP 流体中のクォークとグルーオンが融合することによって生成される粒子のスピン方向は、spin-orbit coupling によって系のスピン方向に揃う傾向がある。このようにして系全体のスピン方向が偏ることを Global polarizaton という。Global polarization は QGP 流体の渦構造に起因するため QGP の物性を解明する手がかりになることが期待される。これまでに RHIC-STAR 実験では、 Λ を用いて 7.7 GeV から 200 GeV にかけて Global polarization が測定され、有限なシグナルが得られている(図 53)。この結果やモデル計算から Λ と $\overline{\Lambda}$ では初期磁場の寄与によって値が異なることが予想されている。しかし不確かさが大きくこれらの違いは観測されていない。そこでさらに高統計なデータを用いて測定する必要がある。そこで現在、比較的高統計である 2017 年に測定された金 + 金衝突 $\sqrt{s_{\rm NN}}$ = 200 GeV を用いて測定を行なっている。

(4) ALICE 実験高度化に向けた前方光子検出器 FoCal の性能評価

QGP(Quark-Gluon Plasma) の性質の解明を目的として、スイス・ジュネーブにある欧州原子核機構 (CERN) では LHC 加速器を用いて ALICE 実験が行れている。この実験の改良を目的として、新たな 検出器である FoCal を作る FoCal project がある。FoCal のは超前方方向に設置され、目的は重イオンの衝突後ビーム軸の前方方向に生成される高い運動量を持った光子・ハドロン・ジェットの測定である。この project は 2014 年に始動し過去に様々な試作機を作り、CERN をはじめとする様々な加速器 施設でテスト実験を重ねてきた。その結果、昨年度までに 100GeV 以上の高エネルギー帯や MIP(最小電離損失粒子) のシグナルの読み出しといった様々なエネルギー帯でのシグナルの読み出しができる 機体の作成に成功した。2018 年度はより高エネルギー帯での読み出しをするために mini-focal と呼ばれる試作機を作成し、CERN の SPS 加速器を用いてテスト実験を行なった。図 54 はこの実験で取れた 150GeV 正電荷粒子ビームの陽電子候補の総エネルギー損失量である。この結果からわかるように

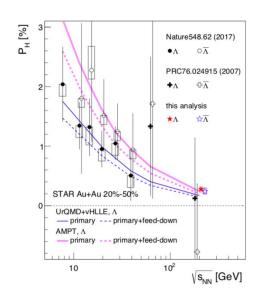


図 53 Global polarization の衝突エネルギー依存性 [11]

mini-focal を用いて今までより高エネルギーでのシグナルの読み出しに成功した。また、エネルギー分解能も 5.9% と Geant4 によるシミュレーション値 4% にかなり近い値となった [12]。今後は ALICE 実験への導入のために検出器のさらなる拡張を目的として読み出しエレキや検出器の改良に取り組んでいく。

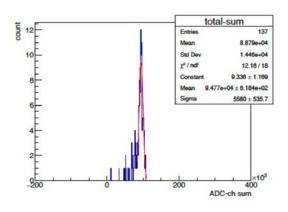


図 54 150GeV 正電荷粒子ビームの陽電子候補の総 エネルギー損失量

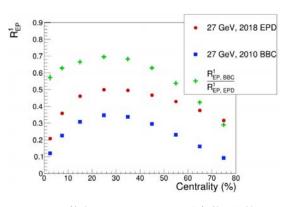


図 55 検出器 EPD と BBC の分解能の比較

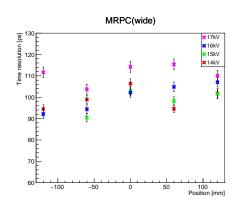
RHIC-STAR 実験における新反応平面検出器 Event Plane Detector の導入・稼働

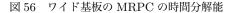
Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) の STAR 実験で行われている第一ビームエネルギースキャン (BES1) 実験に より、量子色力学 (QCD) の臨界点と一次相転移の両方について兆候が見えた。これらの特徴を検証し位置を特定するための重要な観測量は、反応平面の決定に依存している。よって、良い精度で反応平面を決定することができる検出器は、QCD の相構造を明らかにするために重要である。STAR 実験が 2018 年に新しく導入した反応平面検出器である Event Plane Detector (EPD) によ

り、既存の検出器 Beam Beam Counter (BBC) よりも細かく、広い領域における測定が可能になった。 EPD は、STAR 検出器の中心からビーム軸上の東西 ± 3.75 m に設置されたシンチレーターの円盤 2 枚 からなっている。それらは 372 個の光学的に分離されたタイルで構成され、各タイルには波長変換ファイバーが埋め込まれている。EPD は前後方向の立体角(ラピディティー)領域 $2.1<|\eta|<5.1$ を覆っており、衝突で発生する粒子の分布から反応平面 Ψ_{RP} を決定する。図 55 は、衝突中心度(centrality)ごとの 1 次の反応平面 Ψ_1 の分解能を表している [13]。この結果から、EPD の分解能は BBC の分解能より約 1.4 倍改善された。今後は 2019 年から 2020 年にかけて行われる BES2 実験と固定標的実験において EPD を用いたデータ解析を行い、QCD の相構造を探索する。

J-PARC E16 実験に向けた Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の性能評価

J-PARC[14] で現在計画されている E16 実験では、衝突点から 5 m の距離で $0.8~{\rm GeV/c}$ 以下の運動量領域で μ/π を識別するために $30~{\rm ps}$ という高い時間分解能を持つ飛行時間測定器 (TOF 測定器) が必要である。TOF 測定器としては様々なものが存在するが、高い時間分解能をもち、設計の自由度が高い低コストな TOF 測定器として MRPC が E16 実験での採用が見込まれている。先行研究 [15] で、小型 MRPC はパッド幅が狭いほうが高い時間分解能を持つことが分かっている。このことから $2018~{\rm t}$ 度は、パッド幅が $22~{\rm mm}$ のワイド基板とパッド幅が $10~{\rm mm}$ のナロー基板の $2~{\rm t}$ 種類の基板でそれぞれ大型の MRPC を製作し、時間分解能及び信号反射特性について評価をした。プリアンプの増幅率が $20~{\rm t}$ 倍のときの $2~{\rm t}$ 種類の MRPC の時間分解能の印加電圧依存性、位置依存性は図 56、図 $57~{\rm t}$ の結果となった。プリアンプの増幅率が $15~{\rm t}$ 6のときのナロー基板の MRPC が最も時間分解能がよく $70.6\pm2.0~{\rm t}$ だった。また、シグナルと反射波の比はナロー基板の MRPC 方が小さく、反射が抑えられていることが確認できた。今後は、シグナルを足し合わせる部分のインピーダンスマッチングを適切に行うことでさらに信号の反射を抑えること、プリアンプの増幅率や周波数帯域が適切なものを検証することが課題になると考えられる。





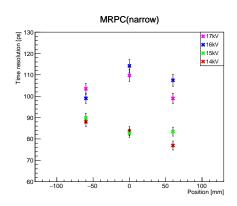


図 57 ナロー基板の MRPC の時間分解能

J-PARC E16 実験に向けた飛跡検出器 Gas Electron Multiplier(GEM) の性能評価

原子核を構成している陽子、中性子などのハドロンの質量の起源はカイラル対称性の自発的破れによって生成される「真空へのクォーク凝縮」によるものとされている。高温または高密度状態においてはカイラル対称性が回復するために質量が減少すると考えられている。現在、この研究のために茨城県東海

村にある J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) で行われている実験のうちの1つが E16 実験である。E16 実験では MR と呼ばれる加速器から取り出した約30 GeV の1次陽子ビームを標的の原子核に当てることで発生する2次粒子の質量分布の変化を系統的に調べることで、カイラル対称性の破れの回復度合いの密度と質量変化の定量的な関係を導き出すことが目標とされている。E16 実験で使用される検出器の一つとして Gas Electron Multiplier(GEM) がある。GEM は荷電粒子の飛跡を検出する検出器で、電子の増幅率や高速の応答性から、飛跡検出器として使用される。この検出器の性能評価として東北大学電子光理学研究センターの陽電子ビーム照射実験を行った。GEM の strip 番号ごとの信号を3次元的に表した(図58)。今後は位置分解能やその電圧依存性、レート依存性を調べる。

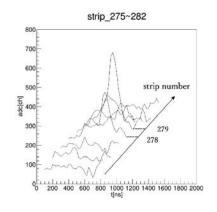


図 58 各 strip の信号



図 59 1 mm 間隔でワイヤーを張ったアノード面

Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) の製作と動作試験

茨城県の東海村に位置する J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)[14] では、J-PARC-HI(J-PARC Heavy Ion Project) と呼ばれる重イオン衝突実験を計画中である。J-PARC-HI は宇宙初期の高温・高密度状態に存在していたとされる QGP(Quark-Gluon Plasma) とハドロン相 との臨界点の探索を低温・高バリオン密度領域で目指している。J-PARC-HI での重イオンビームは $\sim 10^{11}~{\rm Hz}$ と世界最高強度であり、その実験のために高レート対応の検出器が必要とされている。本 研究では従来の MWPC よりもワイヤー間隔の狭い 1 mm 間隔で、高位置分解能、高レート対応の MWPC 製作を試みた (図 59)。

3次元位置敏感型中性子飛行時間検出器

中性子検出器として、理化学研究所の西村俊二氏と連携して、3 次元位置敏感型中性子飛行時間検出器を開発した。長いシンチレーション slat 棒($100x1.2x1.2~cm^3$)を 4x4 本組み合わせ、両端を 2 つの 8x8 マルチアノード型光電子増倍管 (PMT) で読み出した。 8x8 のアノードを 8+8 の読み出しエレキで読み出すために、抵抗分割によって計 8 アノード分の信号をつなぎ、両端から Flash-ADC によるデジタル波形読み出しを行なった。図 60 には、slat 方向の位置情報を表すために両端の 2 つの PMT からの信号到達時間差と信号波高比の相関(左図)、slat 間の位置情報を表すために抵抗分割した信号の到達時間差と波高比の相関(中図)、100 cm 程度離して設置した 252 C_f 線源からの γ 線と中性子の飛行時間分布(右図)を示す。検出位置情報を加えた中性子識別の可能性を示すことができた。

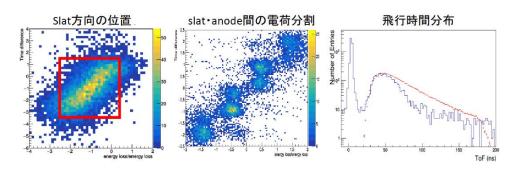


図 60 (左) slat 方向の位置情報:時間差一波高比の相関、(中) slat 間の anode 信号の電荷分割による 位置情報:時間差一波高比の相関、(右) y 線と中性子の飛行時間分布。

(5) 元素合成分野の研究

元素合成は、自然界に存在する陽子からウランまでの原子核が、宇宙でいかに合成したかを研究する分野である。ウランまでの合成過程の中で、特に、鉄からウランまでの重元素のうち半分を生成したと考えられている r プロセスは、宇宙での起源も明らかになっておらず、実験的にはほとんど検証されていない。我々のグループは、r プロセスを決める物理量の中で質量に注目し、r プロセスに関与する不安定核 (RI) の質量測定を行なっている。

rプロセスにより合成したと考えられる元素の合成量は、顕著な3つピークを持つ。3つのピークの起源は、それぞれ中性子数が50、82、126の魔法数によると考えられている。よって、質量も含めた物理量の測定は、これらの領域を中心に進められている。2018年度は、稀少RIリングを使って、中性子数が50と82の領域で質量測定を行なった。⁷⁴Ni、⁷⁶Ni、¹²³Pdなどである。実験データは解析中である。稀少RIリングでは、飛行時間から質量を求めているが、使用する飛行時間検出器の時間分解能向上と検出率向上が、質量測定に重要である。このため、我々は、飛行時間検出器の開発も進めている。我々の検出器は、薄膜と交差電磁場を組み合わせたもので、RIの薄膜通過により発生した二次電子を、交差電磁場によりマイクロチャンネルプレートに導き時間信号を取得する。これまでの開発研究では、すでに、十分な時間分解能は得ていたが、2018年度は、交差電磁場の一様性を向上させ、検出効率がほぼ100%になるようにした。この飛行時間検出器は、2019年度以降の質量測定実験に使用される予定である。

(6) 格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QC Dの研究

金谷、谷口らは、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授らとの共同研究で、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質を、改良ウイルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより研究した。格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、エネルギー運動量テンソルを並進対称性に伴う保存カレントとして定義できない。これに起因して、格子 QCD によるエネルギー運動量テンソルの評価には、5種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非摂動論的に求めなければならないという理論的・数値的な困難が存在している。本研究では、この非摂動論的なくりこみの問題に関して、グラジエントフロー(勾配流)を用いて根本的な解決を図る。Lüscher らにより提案されたグラジエントフローは格子上の物理量計算に様々な革新をもたらしているが、特に、共同研究者である鈴木らにより、これまで格子での計算

や定義に大きな困難が伴っていた様々な物理量の非摂動論的評価に新しい方法が提案された。この方法は、ウイルソン型クォーク作用で大きな困難となっていたカイラル凝集や位相感受率などの評価にも有効である。我々は鈴木らの方法を動的クォークを含む full QCD シミュレーションに適用して、クォーク物質の熱力学特性を研究している。2016-2017 年度に実行したクォークが重い場合の $N_F=2+1$ QCD で最初の研究により、エネルギー運動量テンソルの対角成分が従来の方法によ状態方程式を再現することを示し、カイラル感受率がクロスオーバー温度でピークを示すことをウイルソン型クォークとして初めて示した。また、位相感受率を評価し、アクシオン質量がインスタントン模型の予想と一致する温度依存性を持つことを示した。2018 年度は、この研究を発展させ、現実のクォーク質量での研究と格子間隔を変えたシミュレーションを推進した。並行して、エネルギー運動量テンソルの相関関数やグラジエントフロー法のマッチング係数における高次項の効果の研究などを行った。

Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究 (1) 物理点でのシミュレーション

グラジエントフロー法による状態方程式の評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。また、グラジエントフローのクーリング効果によって、誤差の大部分を占めるゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の計算手法に比べて高精度の計算が可能になることが期待される。クォークが重い場合にグラジエントフロー法の高い有用性が示されたことをうけ、計算コストの高い物理点での研究をグラジエントフロー法で推進することとし、改良ウイルソン型クォーク作用と岩崎ゲージ作用を用いて、クォーク質量を現実の値に合わせた研究を開始した。PACS-CS Collaboration が生成した $32^3 \times 64$ 格子間隔 $a \approx 0.09$ fm のゼロ温度物理点配位を利用し、固定格子間隔法で $T \approx 122$ -544MeV $(N_t = 18$ -4) の温度をシミュレーションしている。クォークが重い場合の $a \approx 0.07$ fm より格子がやや粗いので、温度 $T = 1/(N_t a)$ をより細かく変える為に、奇数の N_t も数点採用している。クォークが重い場合は 190MeV 周辺が臨界温度であったが、クォークが軽いのでより低温側にシフトすると予想される。しかし、この格子作用の場合の臨界温度はわかっていない。

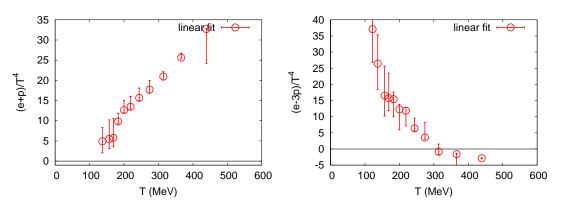


図 61 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式。現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。 左図:エントロピー密度 $\epsilon+p$ 。右図:トレース・アノマリ $\epsilon-3p$ 。 横軸は温度 T。 (学会発表 13)

格子場の理論国際会議 LATTICE2017 で行った中間発表 (論文 1) で、エネルギー運動量テンソルの一点関数やカイラル凝集について、クォークが重い場合とほぼ同様に有意な計算が可能であることが確認された。他方、クォーク質量が小さい効果に加え、格子間隔がやや粗いことが影響して、クォークが重い場合より格子化誤差が大きい傾向があり、より高い統計と精密な系統誤差評価が必要である。この発

表の段階である程度完了していた $T>157 {
m MeV}$ $(N_t\leq 14)$ でのシミュレーションから、相転移温度がかなり低そうである $(T_{
m pc}<169 {
m MeV})$ ことが示唆されたが、相転移点の特定には至らなかった。 その後、より低温側の $T\approx 122 {
m MeV}$, $137 {
m MeV}$ $(N_t=18,16)$ を含むシミュレーションを系統的に進めた。図 61 に、2018 年度末の学会発表の段階での状態方程式の結果を示す。クォークが重い場合と違って、同じ配位を用いた通常の方法による状態方程式の結果はまだ無いが、クォークが重い場合の経験から、T>247 ${
m MeV}$ $(N_t\leq 8)$ では格子化誤差が小さくないと予想される。

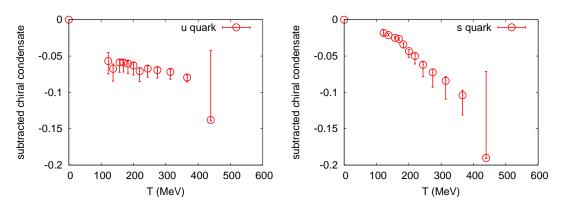


図 62 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD のカイラル凝集。真空期待値が差し引かれている。 現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。 左図:u, d クォーク。右図:s クォーク。 (学会発表 13)

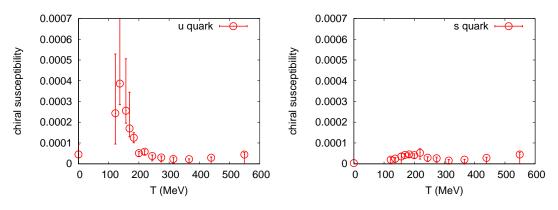


図 63 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD のカイラル感受率の非連結部分。現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。左図:u, d クォーク。右図:s クォーク。(学会発表 13)

物理点でのカイラル凝集の現状の結果を図 62 に示す。左図は u, d クォークのカイラル凝集、右図は s クォークのカイラル凝集である。クォークが重い場合には、u, d クォーク質量が s クォーク質量と同程度だったために、両者のカイラル凝集が同様の振る舞いを示していたが、u, d クォークの質量が下がると、軽いクォークのカイラル凝集の温度依存性が大きく変わることがわかる。s クォークのカイラル凝集から、 $T\sim130\text{-}150~\text{MeV}$ を臨界温度と考えると、そこで軽いクォークのカイラル凝集はかなり急激に変化すると思われる。これまでシミュレーションした範囲では低温側のデータが無いので明確な結論は難しいが、クォークが軽くなればなるほどカイラル相転移が際立つだろうという理論的期待と矛盾しない。

低温格子 $(N_t = 18, 16$ など) の統計はまだ十分ではないが、これらの結果から相転移点近傍であるこ

とが想像される。それをより明確に見るために、カイラル感受率の非連結部分を図 63 に示す。この u,d クォークの結果からは、 $122 < T_{\rm pc} < 146 {\rm MeV}$ に臨界温度があると示唆される。この低い臨界温度は、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果 $T \sim 150 {\rm MeV}$ と矛盾しない。現在、この臨界温度近傍で、統計を上げるための配位生成や、奇数 N_t シミュレーションを進めている。

Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究 (2) 格子間隔依存性

2016-2017 年度に実行したクォークが重い場合の (2+1)-flavor QCD で最初の研究では、エネルギー運動量テンソルやカイラル感受率、位相感受率などで、物理的期待と一致する様々な結果が得られた。これらの結果は、 $a\approx 0.07 \mathrm{fm}$ の格子間隔 1 点で得られたものである。様々な物理量で、全く異なる評価方法の結果が良く一致していることにより、この格子が連続極限に近いことが強く示唆されるが、格子間隔依存性が小さいことは直接確認しておく必要がある。そのために、このクォークが重い場合で格子間隔を変えた研究も進めている。統計がまだ十分ではないが、状態方程式について格子間隔依存性が大きくないことを示唆する中間結果を得た。(学会発表 7)

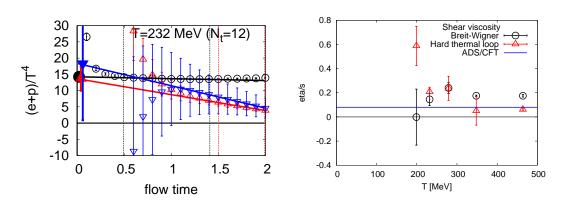


図 64 グラジエントフロー法による、有限温度 (2+1)-flavor QCD における、エネルギー運動量テンソルの二点相関関数の研究。 クォークが重い場合の結果 (preliminary)。 左図:様々な方法で計算したエントロピー密度。 横軸はフロー時間 t。 (論文 2) 右図:剪断粘性係数 η とエントロピー密度 s の比。 青線は ADS/CFT 対応から予言される $1/(4\pi)$ 。 (論文 4)

Gradient flow を用いたエネルギー運動量テンソル相関関数と輸送係数の研究

グラジエントフロー法でエネルギー運動量テンソルそのものが計算できるようになったことにより、その非対角要素や二点相関関数も直接評価可能となった。そこから、輸送係数など、クォーク物質の様々な熱力学特性を引き出す試みを進めている。最初の試みとして、クォークが重い場合を研究した。

図 64 の左図に、様々な方法で計算したエントロピー密度の結果を示す。赤三角と青三角はエントロピー密度をエネルギー運動量テンソルの異なる成分の二点関数から線形応答関係式を用いて評価した結果で、黒丸はエネルギー運動量テンソルの一点関数から求めた我々の 2017 年の結果である。誤差はまだ大きいが、フロー時間がゼロの極限 $t\to 0$ で、格子間隔依存性が取り除かれ、三つの結果が期待どおり一致することが見て取れる。(論文 2)

図 64 の右図では、エネルギー運動量テンソルの二点関数から評価した剪断粘性係数 (shear viscosity η) の中間結果を示す。剪断粘性率の計算にはスペクトル関数の低エネルギー極限を評価する必要がある。ここでは、エネルギー運動量テンソルの二点関数をスペクトル関数に関する 2 種類のモデル関数 (Breit-Wigner 型および hard thermal loop 型) でフィットし、その低エネルギー極限をとった。図 4 の右図でこれら 2 種類の評価結果を黒丸と赤三角で示す。重イオン衝突実験の示唆する $\eta/s\sim0.12$

や AdS/CFT 対応理論の予言である $\eta/s=1/(4\pi)$ に近い結果を得た。ただし、二点関数では格子化 誤差が一点関数より大きくなる傾向があり、系統誤差の精密な評価に向けて更なる研究が必要である。 (論文 4)

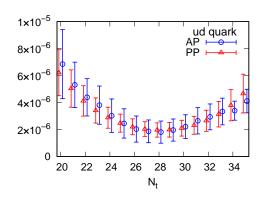
その他

相転移点の特定において、カイラル感受率の非連結部分が大きな役割を果たした。カイラル感受率の連結部分については、計算にクォーク二体演算子の相関関数の評価が要求される。スタガード型クォークなどを使った先行研究では、カイラル感受率の連結部分は相転移に敏感では無さそうであることが報告されている。グラジエントフローを使ってクォークが重い場合の連結部分を評価した結果、ウイルソン型クォークでも同様の振る舞いが示唆されることを見た。(論文3)

フル QCD の研究と並行して、SU(3) ゲージ理論における一次相転移の研究も継続している。これは、有限密度 QCD やクエンチ近似 QCD 近傍のクォークが非常に重い場合に期待されている一次相転移やその端点(臨界点)の検出に向けての計算技法開発の一環でもある。グラジエントフロー法を用いてSU(3) ゲージ理論の潜熱評価を見直し、従来の方法との比較や、格子間隔効果、有限体積効果の検証を行った。(論文 5)

(7) Gradient flow による K 中間子 B パラメータの研究

K 中間子の $K^0-\bar{K}^0$ 混合は、間接的な CP の破れを与える重要な物理現象である。 $K^0-\bar{K}^0$ 混合の実験結果から弱い相互作用の CKM 行列要素を引き出すためには、強い相互作用による補正項である B パラメータ B_K を量子色力学に基づき評価しておく必要がある。非摂動論的問題なので、計算機を用いた格子による評価が重要で、多くの先行研究がある。ダブラー問題を避けて Wilson フェルミオンにより B パラメータを評価しようとすると、従来の計算では、カイラル対称性の陽な破れのために、本来カイラル対称性から禁じられている寄与が混入してしまい、これを差し引きするために大きな誤差がもたらされていた。



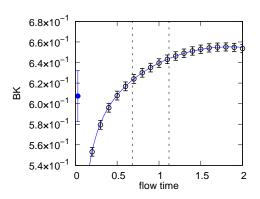


図 65 グラジエントフロー法による、K 中間子 B パラメータの研究。左図:PCAC 関係式の計算。(学会発表 16)横軸は空間距離。右図:K 中間子 B パラメータ B_K の計算。横軸はフロー時間 t_{\circ} (学会発表 17)

この問題に対する解決策として、我々はグラジエントフローを用いる方法を有力視している。上記有限温度の場合と同様に、ゼロ温度でも、カイラル対称性の関係した物理量の正しくくりこまれた値を評価する上で、グラジエントフロー法が有力であると期待している。グラジエントフローによるカイラル対称性の回復を確認するために、谷口、鈴木、馬場は、グラジエントフロー法を用いて PCAC 関係式の

検証を行った。図 65 の左図で、赤と青のデータはそれぞれ PCAC 関係式の左辺と右辺の評価結果を表している。期待どおり、両者がよく一致していることがわかる。(学会発表 16)

これを受け、谷口と鈴木は B パラメータの数値計算に着手した。図 65 の右図で、今回測定された B パラメータのフロー時間依存性を示す。黒が各フロー時間 t で得られた B_K の結果を表し、青が、小さな t での格子誤差を避けながら $t\to 0$ に外挿した結果である。ここから $B_K=0.607(24)$ を得た。ただし、現在計算に使用しているクォークは 物理的な値と比して非常に重い($m_\pi\sim630{\rm MeV}$)。このために、今回の結果は FLAG 等の結果よりも大きな値となっていると考えられる。(学会発表 17)

参考文献

- [1] ALICE Collaboration, Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, arXiv:1905.02536
- [2] S. Wicks, W. Horowitz, M. Djordjevic, M. Gyulassy, Nucl. Phys. A. 783 (2007), pp. 493-496
- [3] JHEP 1810 (2018) 174
- [4] Phys. Lett. B 771 (2017) 467-481
- [5] 川名大地 H30 年度修士論文, LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV 陽子陽子衝突及び $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV 陽子-鉛衝突における重クォーク起源の電子及びジェットの測定
- [6] A. Adare et al. [PHENIX Collaboration], Beam-energy and centrality dependence of direct-photon emission from ultra-relativistic heavy-ion collisions, Submitted to PRL [arXiv:1805.04084].
- [7] 杉浦哲郎 H30 年度博修士論文, Exploring the QCD phase diagram measured by cumulants of netcharge distributions in Au+Au collisions at the STAR experiment
- [8] 青山遼, H30 年度博修士論文, Collision geometry and event plane dependence of two particle correlations in $\sqrt(s_{NN}) = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-STAR
- [9] H. Stoecker, Collective flow signals the quark gluon plasma, Nucl. Phys. A750 121147 (2005)
- [10] M A Lisa et al. New J. Phys. 13 065006 (2011)
- [11] STAR Collaboration. Phys. Rev. C 98 (2018) 14910.
- [12] 高須早織, H30 年度修士論文 (広島大学), ALICE 実験高度化に向けた前方光子検出器 FoCal の性能評価
- [13] S. Kagamaster for the STAR Collaboration, RHIC/AGS Annual Users Meeting (2019) (Poster)
- [14] J-PARC, J-PARC Heavy Ion Project, https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/hadron/jparc-hi/overview.html
- [15] 加藤浩樹, H28 年度卒業論文, 飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の開発; 陽電子ビームと宇宙線を用いた読み出しパッド形状の最適化に向けた性能評価

〈査読付き論文〉

- Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takash Umeda [WHOT-QCD Collaboration], Equation of state in (2 + 1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07023, pp.1-8; DOI:10.1051/epjconf/201817507023
- 2. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, Energy-momentum tensor correlation function in $N_f = 2+1$ full QCD at finite temperature, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07013, pp.1-8; DOI:10.1051/epjconf/201817507013
- 3. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki,

- Yusuke Taniguchi and Takashi Umeda, Measuring of chiral susceptibility using gradient flow, PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.173, pp.1-6; URL: https://pos.sissa.it/334/
- 4. Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Study of energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD for QGP viscosities, PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.166, pp.1-6; URL: https://pos.sissa.it/334/
- 5. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow, PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.164, pp.1-6; URL: https://pos.sissa.it/334/
- 6. Y.Ito, P.Schury, M.Wada, F.Arai, H.Haba, Y.Hirayama, S.Ishizawa, D.Kaji, S.Kimura, H.Koura, M.MacCormick, H.Miyatake, J.Y.Moon, K.Morimoto, K.Morita, M.Mukai, I.Murray, T.Niwase, K.Okada, A.Ozawa, M.Rosenbusch, A.Takamine, T.Tanaka, Y.X.Watanabe, H.Wollnik, S.Yamaki, First Direct Mass Measurements of Nuclides around Z=100 with a Multireflection Time-of-Flight Mass Spectrograph, Phys. Rev. Lett. 120, 152501 (2018).
- C.Y.Fu, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, M.Wang, Yu.A.Litvinov, K.Blaum, H.S.Xu, X.Xu, P.Shuai, Y.H.Lam, R.J.Chen, X.L.Yan, T.Bao, X.C.Chen, H.Chen, J.J.He, S.Kubono, D.W.Liu, R.S.Mao, X.W.Ma, M.Z.Sun, X.L.Tu, Y.M.Xing, P.Zhang, Q.Zeng, X.Zhou, W.L.Zhan, S.Litvinov, G.Audi, T.Uesaka, Y.Yamaguchi, T.Yamaguchi, A.Ozawa, B.H.Sun, Y.Sun, and F.R.Xu, Masses of the Tz=-3/2 nuclei ²⁷P and ²⁹S, Phys. Rev. C 98, 014315 (2018).
- Y.H.Zhang, P.Zhang, X.H.Zhou, M.Wang, Yu.A.Litvinov, H.S.Xu, X.Xu, P.Shuai, Y.H.Lam, R.J.Chen, X.L.Yan, T.Bao, X.C.Chen, H.Chen, C.Y.Fu, J.J.He, S.Kubono, D.W.Liu, R.S.Mao, X.W.Ma, M.Z.Sun, X.L.Tu, Y.M.Xing, Q.Zeng, X.Zhou, W.L.Zhan, S.Litvinov, K.Blaum, G.Audi, T.Uesaka, Y.Yamaguchi, T.Yamaguchi, A.Ozawa, B.H.Sun, Y.Sun, F.R.Xu, Isochronous mass measurements of Tz = -1 fp-shell nuclei from projectile fragmentation of ⁵⁸Ni, Phys. Rev. C 98, 014319 (2018).
- 9. Y.M.Xing, K.A.Li, Y.H.Zhang, X.H.Zhou, M.Wang, Yu.A.Litvinov, K.Blaum, S.Wanajo, S.Kubono, G.Martinez-Pinedo, A.Sieverding, R.J.Chen, P.Shuai, C.Y.Fu, X.L.Yan, W.J.Huang, X.Xu, X.D.Tang, H.S.Xu, T.Bao, X.C.Chen, B.S.Gao, J.J.He, Y.H.Lam, H.F.Li, J.H.Liu, X.W.Ma, R.S.Mao, M.Si, M.Z.Sun, X.L.Tu, Q.Wang, J.C.Yang, Y.J.Yuan, Q.Zeng, P.Zhang, X.Zhou, W.L.Zhan, S.Litvinov, G.Audi, T.Uesaka, Y.Yamaguchi, T.Yamaguchi, A.Ozawa, C.Frohlich, T.Rauscher, F.-K.Thielemann, B.H.Sun, Y.Sun, A.C.Dai, F.R.Xu, Mass measurements of neutron-deficient Y, Zr, and Nb isotopes and their impact on rp and ν p nucleosynthesis processes, Phys. Lett. B 781, 358 (2018).
- M.Rosenbusch, Y.Ito, P.Schury, M.Wada, D.Kaji, K.Morimoto, H.Haba, S.Kimura, H.Koura, M.MacCormick, H.Miyatake, J.Y.Moon, K.Morita, I.Murray, T.Niwase, A.Ozawa, M.Reponen, A.Takamine, T.Tanaka, H.Wollnik, New mass anchor points for neutron-deficient heavy nuclei from direct mass measurements of radium and actinium isotopes, Phys. Rev. C 97, 064306 (2018).
- 11. PHENIX collaboration, "Measurement of identified particle azimuthal anisotropy in p+Au and 3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 97, 064904 (2018)
- PHENIX collaboration, "Measurements of two-pion Bose-Einstein correlations and their Levy parameters in 200 GeV Au+Au collisions", Phys. Rev. C 97, 064911 (2018)
- 13. PHENIX collaboration, "Measurement of emission angle anisotropy of high pT hadrons via long-range angular correlation in d+Au and p+p collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =200 GeV", Phys. Rev. C 98, 014912 (2018)
- 14. PHENIX collaboration, "Transverse Single-SpinAsymmetry in J/ψ Production in Polarized p+p, p+Al, and p+Au Collisions at $\sqrt{s}=200 \, \text{GeV}$ in PHENIX", Phys. Rev. D 98, 012006 (2018)
- 15. PHENIX collaboration, "Cross section and Single spin asymmetry of forward W $\rightarrow \mu\nu$ measured in polarized p + p collisions at \sqrt{s} =510GeV", Phys. Rev. D 98, 032007 (2018)
- 16. PHENIX collaboration, "Phi meson production at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV and its energy dependence from RHIC to LHC", Phys. Rev. D 98, 092006 (2018)
- 17. PHENIX collaboration, "Low momentum direct photons in Cu+Cu at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV", Phys. Rev. C 98, 054902 (2018)
- 18. PHENIX collaboration, "Production of pi⁰ and eta mesons in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 98, 054903 (2018)
- 19. PHENIX collaboration, "Pseudorapidity dependence of particle production and elliptic flow in small nuclear collisions of p+Al, p+Au, d+Au, and 3He+Au at 200 GeV", Phys. Rev. Lett. 121, 222301 (2018)
- PHENIX collaboration, "Creation of quark gluon plasma droplets with three distinct geometries", Nature Physics
 15, 214 220 (2019)
- 21. PHENIX collaboration, "Multiparticle azimuthal correlations for extracting event-by-event elliptic and triangular flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 99, 024903 (2018)
- 22. STAR collaboration, "Centrality and transverse momentum dependence of D0-meson production at mid-rapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 99 (2019) 34908
- 23. STAR collaboration, "Measurement of the longitudinal spin asymmetries for weak boson production in proton-

- proton collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV", Phys. Rev. D 99 (2019) 51102
- 24. STAR collaboration, "Erratum: Observation of D0 meson nuclear modifications in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 229901
- 25. STAR collaboration, "Transverse spin transfer to Lambda and anti-Lambda hyperons in polarized proton-proton collisions at \sqrt{s} =200 GeV", Phys. Rev. D 98 (2018) 91103
- 26. STAR collaboration, "Improved measurement of the longitudinal spin transfer to Lambda and Anti-Lambda hyperons in polarized proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Rev. D 98 (2018) 112009
- 27. STAR collaboration, "The Proton-Omega correlation function in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV", Phys. Lett. B 790 (2019) 490
- 28. STAR collaboration, "Low pT e+e- Pair Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV at STAR", Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 132301
- 29. STAR collaboration, "Longitudinal Double-Spin Asymmetries for Dijet Production at Intermediate Pseudorapidity in Polarized pp Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Rev. D 98 (2018) 32011
- STAR collaboration, "Longitudinal double-spin asymmetries for pi0s in the forward direction for 510 GeV polarized pp collisions", Phys. Rev. D 98 (2018) 32013
- 31. STAR collaboration, "J/psi production cross section and its dependence on charged-particle multiplicity in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Lett. B 786 (2018) 87
- 32. STAR collaboration, "Global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =200 GeV", Phys. Rev. C 98 (2018) 14910
- STAR collaboration, "Beam energy dependence of rapidity-even dipolar flow in Au+Au collisions", Phys. Lett. B 784 (2018) 26
- STAR collaboration, "Correlation Measurements Between Flow Harmonics in Au+Au Collisions at RHIC", Phys. Lett. B 783 (2018) 459
- 35. STAR collaboration, "Azimuthal anisotropy in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV", Phys. Rev. C 98 (2018) 14915
- 36. STAR collaboration, "Transverse spin-dependent azimuthal correlations of charged pion pairs measured in p[†]+p collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV", Phys. Lett. B 780 (2018) 332
- 37. STAR collaboration, "Measurement of hyper triton lifetime in Au+Au collisions at the Relativistic Heavy-Ion Collider", Phys. Rev. C 97 (2018) 54909
- STAR collaboration, "Collision Energy Dependence of Moments of Net-Kaon Multiplicity Distributions at RHIC", Phys. Lett. B 785 (2018) 551
- 39. STAR collaboration, "Beam Energy Dependence of Jet-Quenching Effects in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$, 11.5, 14.5, 19.6, 27, 39, and 62.4 GeV", Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 32301
- 40. STAR collaboration, "Harmonic decomposition of three-particle azimuthal correlations at RHIC", Phys. Rev. C 98 (2018) 34918
- 41. ALICE collaboration, "Centrality and pseudorapidity dependence of the charged-particle multiplicity density in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ TeV", Phys. Lett. B 790 (2019) 35-48
- 42. ALICE collaboration, "Azimuthal anisotropy of heavy-flavour decay electrons in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV", Phys. Rev. Lett. 122, 072301 (2019)
- 43. ALICE collaboration, "Measurement of dielectron production in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. C 99, 024002 (2019)
- 44. ALICE collaboration, "Multiplicity dependence of light-flavor hadron production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Rev. C 99, 024906 (2019)
- 45. ALICE collaboration, "Dielectron and heavy-quark production in inelastic and high-multiplicity proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV", Phys. Lett. B 788 (2019) 505
- 46. ALICE collaboration, "Direct photon production at low transverse momentum in proton-proton collisions at \sqrt{s} =2.76 and 8 TeV", Phys. Rev. C 99, 024912 (2019)
- 47. ALICE collaboration, "Charged jet cross section and fragmentation in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Rev. D 99, 012016 (2019)
- 48. ALICE collaboration, "Direct photon elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", Phys. Lett. B 789 (2019) 308
- 49. ALICE collaboration, " Υ suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV", Phys. Lett. B 790 (2019) 89
- 50. ALICE collaboration, "Measuring $K_S^0K^{\pm}$ interactions using pp collisions at \sqrt{s} =7 TeV", Phys. Lett. B 790 (2019)
- 51. ALICE collaboration, "Transverse momentum spectra and nuclear modification factors of charged particles in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV", Phys. Lett. B 788 (2019) 166-179

- 52. ALICE collaboration, "Transverse momentum spectra and nuclear modification factors of charged particles in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions at the LHC", JHEP 1811 (2018) 013
- 53. ALICE collaboration, "Medium modification of the shape of small-radius jets in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76TeV", JHEP 10 (2018) 139
- 54. ALICE collaboration, "Neutral pion and η meson production at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", Phys. Rev. C 98, 044901 (2018)
- 55. ALICE collaboration, "Dielectron production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", JHEP 1809 (2018) 064
- 56. ALICE collaboration, "Azimuthally-differential pion femtoscopy relative to the third harmonic event plane in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 TeV", Phys. Lett. B 785 (2018) 320
- 57. ALICE collaboration, "Anisotropic flow of identified particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV", JHEP09 (2018) 006
- 58. ALICE collaboration, "Inclusive J/ ψ production in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ TeV", Phys. Lett. B 785 (2018) 419-428
- 59. ALICE collaboration, "Neutral pion and η meson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV", Eur. Phys .J. C78 (2018) 624
- 60. ALICE collaboration, "Anisotropic flow in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.44 TeV", Phys. Lett. B784 (2018) 82
- 61. ALICE collaboration, "Inclusive J/ ψ production at forward and backward rapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 8.16 TeV", JHEP 07 (2018) 160
- 62. ALICE collaboration, "Energy dependence and fluctuations of anisotropic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 and 2.76 TeV", JHEP 07 (2018) 103
- 63. ALICE collaboration, " ϕ meson production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =2.76 TeV", Eur. Phys. J. C 78 (2018) 559
- 64. ALICE collaboration, "Measurement of the inclusive J/ ψ polarization at forward rapidity in pp collisions at \sqrt{s} =8 TeV", Eur. Phys. J. C 78 (2018) 562
- 65. ALICE collaboration, "Constraints on jet quenching in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured by the event-activity dependence of semi-inclusive hadron-jet distributions", Phys. Lett. B 783 (2018) 95-113
- 66. ALICE collaboration, "Prompt and non-prompt J/ ψ production and nuclear modification at mid-rapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV", Eur. Phys. J. C 78 (2018) 466
- 67. ALICE collaboration, " Λ_c^+ production in pp collisions at \sqrt{s} =7 TeV and in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV", JHEP 04 (2018) 108
- 68. ALICE collaboration, "First measurement of Ξ_c^0 production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV", Phys. Lett. B 781 (2018) 8-19
- 69. ALICE collaboration, "Longitudinal asymmetry and its effect on pseudorapidity distributions in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Lett. B 781 (2018) 20-32
- Seyoung Han, ShinIchi Esumi, Kazuki Sato, Itaru Nakagawa, Takahito Todoroki, "A New Baseline Subtraction Method for Di-hadron Correlations in High-multiplicity Small System Collisions", J. Korean Phys. Soc. 73 (2018) no.5, 677-683
- Toshihiro Nonaka, Masakiyo Kitazawa, ShinIchi Esumi, "A general procedure for detector response correction of higher order cumulants", Nucl. Instrum. Meth. A906 (2018) 10-17
- 72. ShinIchi Esumi for the PHENIX collaboration, "Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX", PoS CPOD2017 (2018) 018

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Thermodynamics near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory」,
 - YITP long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018)
- 2. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda \lceil Thermodynamic quantity near first phase transition point using Gradient flow method \rfloor ,
 - YITP long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018) ($\#X \mathcal{I}$)
- 3. <u>Mizuki Shirogane</u>, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda 「Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory

- using gradient flow ...
- The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
- 4. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Asobu Suzuki, Atsushi Baba 「Study of energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD for QGP viscosities」,
 - The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
- Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Yusuke Taniguchi, Asobu Suzuki 「Measuring of chiral susceptibility using gradient flow」,
 The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
- 7. <u>A. Ozawa, Mass measurements in Rare-RI Ring in RIBF</u>, Workshop on "Physics at HIAF High-Energy Beam Lines", 2018, 12/13-15, Beihang University, Peking, P.R. China
- 8. <u>D. Kamioka, Developments of time-of-flight detector for mass measurements with the Rare-RI Ring, 2018 10/23-27, Hilton Waikoloa, Hawaii, US</u>
- T. Nonaka, Recent Results and Methods on Higher Order and Off-diagonal Cumulants of Identified Net-particle Multiplicity Distributions in Au+Au Collisions at STAR, Quark Matter 2018, Venezia, Italy, May 14-19, 2018
- 10. R. Aoyama, Event Plane Dependence of Di-hadron Correlations with Event Shape Engineering at the STAR Experiment, Quark Matter 2018, Venezia, Italy, May 14-19, 2018
- 11. R. Hosokawa, Exploring jet profiles in pp and Pb-Pb collisions at 2.76 and 5.02 TeV with the ALICE detector, Quark Matter 2018, Venezia, Italy, May 14-19, 2018
- 12. N. Novitzky, Electroweak probes in nuclear collisions, Quark Matter 2018, Venezia, Italy, May 14-19, 2018 (基調講演)
- 13. <u>T. Chujo</u>, Frontiers of Quark-Gluon Plasma Physics, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018 (基調講演)
- 14. R. Aoyama, Di-hadron correlations with event shape engineering in Au+Au collisions at STAR, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 15. T. Sugiura, Measurement of the sixth-order cumulant of net-charge distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV by the STAR experiment, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 16. Y. Kawamura, Azimuthal angle dependence of pion femtoscopy in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Cu+Au collisions at STAR, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 17. <u>H. Kato</u>, Measurement of azimuthal anisotropy of proton and pion in Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=4.5$ GeV Fixed Target, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 18. K, Nakagawa, Multiplicity-dependent di-hadron correlations with identified leading hadrons in $\sqrt{s_{NN}}$ =200 GeV d+Au collisions at STAR, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 19. <u>D. Kawana, High-pT electrons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV with ALICE, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018</u>
- 20. T. Suzuki, Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ALICE, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 21. <u>K. Tadokoro</u>, Evaluation of front-end readout system with APV25 for Si-PAD and Tungsten based electromagnetic calorimeter FoCal at LHC ALICE, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 22. M. Takamura, A new design of MRPC detector by placing a ground layer and pad shape modification, Joint APS-DNP/JPS meeting, Hawaii, USA, October 23-27, 2018
- 23. <u>S. Esumi</u>, What we have learned at RHIC and plan towards Beam Energy Scan 2 program, Korean Physics Society meeting, Changwon, Korea, October 24-26, 2018 (基調講演)
- 24. <u>S. Esumi</u>, Experimental results from STAR, Asian Triangle Heavy-Ion Conference 2018, USTC, China, November 3-6, 2018 (基調講演)
- 25. <u>S. Esumi</u>, Experiments on high-energy heavy-ion physics, Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018 (基調講演)
- T. Nonaka, Cumulants of net-particle distributions from the STAR experiment, Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018
- 27. R. Aoyama, Di-hadron correlations with event shape engineering in Au+Au collisions at the STAR experiment, Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018

- R. Hosokawa, Measurement of jet modification through jet-hadron correlation in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV,
 Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018
- 29. T. Sugiura, Importance of the volume fluctuation correction on higher order cumulants, Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018
- 30. <u>D. Kawana</u>, Measurement of electrons from charm and beauty hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV with ALICE, Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018
- 31. N. Novitzky, Recent low-pT direct photons results from PHENIX, Quarks and Nuclear Physics 2018, Tsukuba, Japan, November 13-17, 2018
- 32. <u>H. Kato</u>, Measurement of Directed Flow of Identified Particles in Au+Au 4.5 GeV Fixed-target collisions at STAR, Winter Workshop on Nuclear Dynamics 2019, Colorado, USA, January 6-12, 2019
- 33. Y. Kawamura, Azimuthal-angle dependence of pion femtoscopy relative to the first-order event plane in $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV Au+Au and Cu+Au collisions at STAR, Winter Workshop on Nuclear Dynamics 2019, Colorado, USA, January 6-12, 2019
- 34. <u>S. Esumi</u>, Beam Energy Scan (BES) program at RHIC-BNL, Reimei Workshop, Tokai, Japan, Januaru, 9-11, 2019 (招待講演)
- 35. <u>S. Esumi</u>, Fluctuation analysis for the STAR experiment; multi-dimensional unfolding of net-number and temperature including volume fluctuation, EMMI Workshop Probing the Phase Structure of Strong Interacting Matter: Theory and Experiment, GSI, Germany, March 25-29, 2019 (招待講演)

[国内学会・研究会]

- 1. <u>鈴木</u>博, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北澤正清, 下条 昂礼, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「グラディエント・フローによる量子色力学 の状態方程式」,
 - 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第 10 回シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区, 7/12-13, 2018) (ポスター)
- 2. <u>谷口 裕介</u>, 馬場 惇, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士 「QGP 粘性係数導出に向けた $\overline{\rm Nf}=2+1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究」,
 - 熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018) (ポスター)
- 3. 金谷 和至, 江尻 信司, 石見 涼, 北澤正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「グラジエントフローによる 2+1 フレーバー QCD の状態方程式 格子間隔依存性の検証」,
 - 熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018) (ポスター)
- 4. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹 「再重み付け法による SU(3) ゲージ理論の重い クォーク領域における一次相転移終点でのハドロン質量の計算」,
 - 熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018) (ポスター)
- 5. <u>馬場</u> 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北澤正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 谷口 裕介, 鈴木 遊 「Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」.
 - 熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018) (ポスター)
- 6. <u>谷口 裕介</u>, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 遊, 鈴木 博, 馬場 惇 「QGP 粘性係数導出に向けた Nf=2+1 QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究」,
 - 日本物理学会 (信州大学, 長野県, 松本市, 9.14-17, 2018)
- 7. <u>鈴木 博</u>, 石見 涼,梅田 貴土,江尻 信司,金谷 和至,北沢 正清,下条 昂礼,白銀 瑞樹,鈴木 遊,谷口 裕介,馬場 惇「Thermodynamic quantities in the $N_f=2+1$ QCD; the case of somewhat heavy ud quarks」,日本物理学会(信州大学,長野県,松本市,9.14-17,2018)
- 8. <u>馬場</u> 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Gradient flow を用いたカイラル感受率 の測定」,
 - 日本物理学会 (信州大学, 長野県, 松本市, 9.14-17, 2018)
- 9. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹 「重いクォーク領域における格子 QCD の臨界質量 の決定に関するホッピングパラメータ展開の収束性」,
 - 日本物理学会 (信州大学, 長野県, 松本市, 9.14-17, 2018)
- 10. 清原 淳史, 板垣 翔太, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 谷口 裕介, 白銀 瑞樹 「ポリヤコフループを含む作用に基づくモンテカルロ計算による重クォーク QCD の相転移の解析」, 日本物理学会(信州大学, 長野県, 松本市, 9.14-17, 2018)
- 11. 鈴木 遊, 谷口 祐介「Gradient flow を用いた $\Delta S=1$ の 4-fermion 演算子の繰り込み因子の計算」, 日本物理学会 (信州大学, 長野県, 松本市, 9.14-17. 2018)
- 12. 江尻 信司, 金谷 和至, 梅田 貴士, <u>谷口 裕介</u>, 北澤 正清, 鈴木 博, 若林 直輝, 下条 昂礼, 鈴木 遊, 馬場 惇, 板垣 翔太, 白銀 瑞樹 「ウイルソン型フェルミオンを用いた 2+1 フレーバー QCD の熱力学量」,
 - 第 5 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区, 11/2, 2018) (ポスター)
- 13. 金谷 和至, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 馬場 惇 「グラジエン

トフローによる格子 2+1 フレーバー QCD の熱力学研究」,

日本物理学会第74回年次大会 (九州大学, 福岡県, 福岡市, 3.14-17, 2019)

- 14. $\frac{2 \Box}{N f}$ 梅田 貴土, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 遊, 鈴木 博, 馬場 惇 「QGP 粘性係数導出に向けた Nf=2+1 QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究 (II)」,
 - 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学, 福岡県, 福岡市, 3.14-17, 2019)
- 15. 清原 淳史, 板垣 翔太, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 谷口 裕 介 「改良したクエンチ QCD による重クォーク QCD の臨界点の精密解析」,
 - 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学, 福岡県, 福岡市, 3.14-17, 2019)
- 16. <u>馬場 惇</u>, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での gradient flow を用いた PCAC 関係式の検証」,
- 日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡県, 福岡市, 3.14-17, 2019) 17. 鈴木 遊, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 博, 谷口 裕介, 馬場 惇 「Gradient
 - 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学, 福岡県, 福岡市, 3.14-17, 2019)

flow を用いた K 中間子の Bag パラメータの数値的研究」,

18. 向井もも「稀少 RI リングにおける中性子過剰 Ni 領域の質量測定」, 核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会 (北海道大学, 北海道, 3.6-8, 2019)

[博士論文]

- 1. A. Suzuki, "Study of Kaon Bag Parameter with Wilson Fermion using Gradient Flow"
- 2. Murad Ahmed, " β - γ spectroscopy of neutron-rich nucleus ¹⁹⁵Os"
- 3. Tetsuro Sugiura, "Exploring the QCD phase diagram measured by cumulants of net-charge distributions in Au+Au collisions at the STAR experiment"
- 4. Ryo Aoyama, "Collision geometry and event plane dependence of two particle correlations in $\sqrt{s_{NN}}=200~{\rm GeV}$ Au+Au collisions at RHIC-STAR"
- 5. Ritsuya Hosokawa, "Measurement of jet properties in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ALICE experiment at the LHC"

12 光量子計測器開発部門 (Division of Photon and Particle Detectors)

部門長

原 和彦(数理物質系物理学域准教授):

構成教員

江角 晋一(数理物質系物理学域准教授)

武内 勇司(数理物質系物理学域准教授):

金 信弘 (数理物質系物理学域 特任教授)

連携教員

西堀 英治 (数理物質系物理学域 教授)

冨田 成夫(数理物質系物理工学域 准教授)

近藤 剛弘 (数理物質系物質工学域 准教授)

光量子計測器開発部門は、宇宙史国際研究センターの4名の構成教員とセンター外の3名の連携教員が協力して、光量子計測器に関するセンター共有の光量子計測器開発情報を共有し、つくば地区の連携研究 TIA の 筑波大学拠点として活動する (HP を参照)。TIA (Tsukuba Innovation Arena) は筑波大およびつくばの研究機関における理工学分野が密接に連携し、計測器開発に関する情報共有、計測器開発の融合共同研究、新しい計測器のアイデアの創出、計測器技術の産業・社会への応用を推進することを主な目的としている。具体的な活動としては、KEK・産総研等の研究機関と連携して、つくば光・量子計測共通基盤を形成して、先端基礎科学と最新産業応用のための光量子計測器開発を推進している。

現在 TIA-ACCELERATE(光量子産業応用イニシアチブ)の光量子センシングスクエア(光量子計測技術開発)において、つくば連携で超伝導検出器、SOI 技術、LGAD 検出器の3つを主軸として光量子計測器開発を推進している。光量子計測器開発部門は、この開発研究の筑波大学の活動拠点としても機能する。以下、TIA での活動および部門全体にかかわる活動を報告する。

TIA 5機関による連携プログラム探索推進事業「TIA かけはし」が 2016 年度から開始され、2018 年度に は本部門では以下のプロジェクトが採択され、定期的な情報交換と年に一度の企業側も加わった研究会を開催 した。

表 8 TIA かけはし 2018 年度採択テーマと代表者

| テーマ | 代表 | 参加機関 | |
|-------------------------|-----------|---------------|--|
| 3 次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究 | 倉知郁生(KEK) | AIST、 筑波大(原)、 | |
| (2016-2018) | | 東大 | |

2018 年 12 月 8 日には、「Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices」を筑波大学東京キャンパスで開催した。これは LGAD 検出器開発に関する国際ワークショップで、日米科学技術協力事業および宇宙史研究センターの後援により実施し、海外からの 4 名を含む 17 名の参加者により高速半導体 LGAD 検出器の将来の高エネルギー実験への応用や PET など医療応用などについて活発に議論した。

2019 年 1 月 28 日には 前述した TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」で推進している第 3 回 3 次元積層半導体量子イメージセンサー研究会をつくば市国際会議場で開催した。

2019年2月8日には、第4回TIA光・量子計測シンポジウムをつくば市国際会議場で開催した。本部門からは、「高時間分解能・位置分解能を達成できる4次元半導体検出器の開発」、「SOI技術を用いた高位置・時間分解能を有するモノリシック型ピクセル」、「高放射線照射されたシリコン半導体量子検出器の性能評価」、「COBAND実験に向けたSTJ遠赤外領域単一光子分光検出器の開発」の4件を発表した。これ以外にもTIAで共同研究を行う多数の研究者から最新の研究成果が発表された。

2019 年 2 月 4~5 日の 宇宙史研究センターワークショップにおいて、各研究部門を横断する共有の開発基盤の形成のために、光量子計測器開発部門が主催して以下の 7 件の検出器開発についての報告・検討会をプレナリーで開催した。素粒子研究部門からは、ATLAS ピクセル検出器、ATLAS ストリップ検出器、LGAD、SOI の 4 件の半導体検出器と COBAND 用 STJ 検出器の開発、クォーク・核物質研究部門からは、ALICE-FOCAL Si/W カロリメータ、J-PARC 実験用 MRPC の検出器開発、南極天文学研究部門からはMKID 検出器の開発が報告された。

筑波大学では国連が推進する SDGs(Sustainable Development Goals)の活動に基づき、持続可能な「産業と技術革新の基盤をつくろう」活動を開始し、現在、関連 WEB ページを作成中である。本部門からは「半導体センサーが拓く持続的なイノベーション」をプロジェクト名とし、シリコン半導体を主軸において、加速器実験のために開発する光量子センサー、VLSIの設計教育、医療・健康への貢献などを包括する活動を推進する。プロジェクトの全体イメージを図 66 に示す。

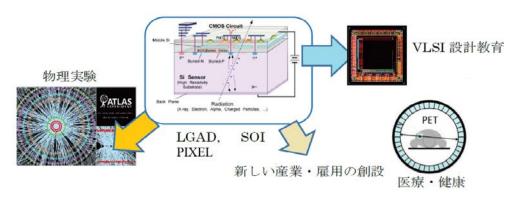


図 66 光量子計測器開発部門がめざす「半導体センサーが拓く持続的なイノベーション」プロジェクト

以下には、構成教員・連携教員が推進するプロジェクトごとに活動状況を報告する。ここに記載されていない活動については、各部門での記述を参照されたい。

HL-LHC ATLAS 実験用半導体センサーの開発 (原)

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2026 年から当初設計値を超え 4000 fb $^{-1}$ の データ量をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大する。ATLAS は 2016-2017 年に内部飛跡検出器の技術設計書をまとめ、衝突点に近い 内側 5 層には電極サイズが $50\times 50~\mu\mathrm{m}$ のピクセル型、その外側 4 層には $74~\mu\mathrm{m}\times (2.4~\mathrm{s})$ cm の ストリップ型のシリコン半導体検出器を配置する。

(1) HL-LHC 用 ATLAS ストリップ型センサー

2018 年度には ATLAS に使用できるセンサーを製造できる製造業者の技術選定がされた。その際、バレル

部とエンドキャップ部を想定したセンサーが各 1 種類ずつ試作され、放射線耐性を含んだ様々な性能評価を行った。最終的な設計の外部レビュー (FDR=Final Design Review) は年度をまたいで 4 月 12 日に行われたが、バルク部の放射線耐性については本部門の原が総括した。主な結果である電荷収集量の放射線による劣化を図 67 にまとめる。

日本グループは筑波大が中心となってバレル部センサーの半数の製造およびそれらの品質管理を分担する。センサーたわみの測定及びセンサー表面状態の撮影について、これらはセンサー製造工場で実施するために、人手に頼らないフルオートメーション化は不可欠であり、オートフォーカス顕微鏡に基づく全自動計測システムの設計を行い部品調達を開始した。

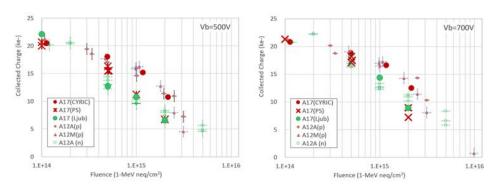


図 67 バレル部センサーの電荷収集量の測定結果。陽子および中性子によるいくつかの機関による測定結果をまとめた。図はバイアス電圧 500~V および 700~V での評価。

(2) HL-LHC 用 ATLAS ピクセル型センサー (原)

ATLAS ではバレル部に 5 層のピクセルセンサーを設置するが、放射線量の違いから、最内層は 3D 技術によるもの、それ以外は通常のプラナー型ピクセルセンサーを用いる。日本グループは $3\sim5$ 層目に使用できるバイアス構造のある n^+ -on-p 型プラナーピクセルセンサーの設計を進めてきた。

ピクセルセンサーおよび読み出し ASIC とのボンディング (フリップチップ化)、読み出しフレックスケーブル基板を取り付けたモジュール化までが日本グループの分担であるが、筑波大学ではセンサーおよびフリップチップ化までを KEK と共同開発している。2018 年度はプロトタイプ ASIC である RD53A を用いて、 $50 \times 50 \ \mu m$ および $25 \times 100 \ \mu m$ のピクセルサイズのセンサーを試作しビーム試験評価をした。

日本グループが提案しているセンサー構造の特徴は、各ピクセルがポリシリコンを用いた抵抗を介して共通電極(バイアスレール)につながったバイアス構造を有していることである(図 68 左)。フリップチップ化をすればセンサーのバイアス構造は不要となるが、プロセスコストの高いバンプボンドの前に不良センサーを判別するための手法としてバイアス構造は有効となる。ただし、バイアス抵抗のためにノイズがやや増える傾向にあり、バイアス抵抗値を高くするプロセスの採用や電極サイズの検討を行い、図 68 に示すように実際にノイズ分布を評価した。放射線損傷前後でのノイズ特性も比較した。バイアス構造により有意な差異があるが、製造プロセスの効率なども総合的に評価して今後仕様が決定される。

ピクセルモジュール製造については、従来は ASIC へのバンプ形成は海外で行うことが想定されていたが、国内企業を新たに検討に加え、フリップチップ化までを一貫して進められる体制を形成することをすすめた。フリップチップ化までの製造業者の技術選定を経て、FDR は 2019 年度に計画されている。

(3) 10^{17} cm⁻²s⁻¹ 照射後のシリコン検出器

HL-LHC 用に開発している 3 層目のピクセルセンサーは 3×10^{15} cm $^{-2}$ s $^{-1}$ の放射線耐性が要求される

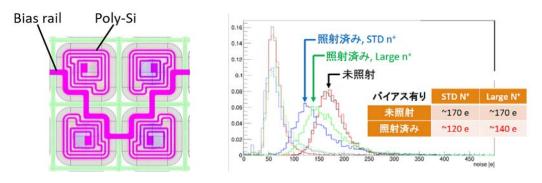


図 68 (左)50 μ m × 50 μ m のピクセルの設計。各ピクセル電極はバイアスレールへポリシリコンで形成されるバイアス抵抗を介してつながる。(右)50×50 μ m ピクセルセンサーと試作 ASIC である RD53A で読み出す検出器ノイズを 3×10^{15} n/cm² の照射損傷の前後で比較。センサー設計ではバイアス抵抗の有無に加えバイアス抵抗値の違いの効果などを評価している。

が、さらに内層では 10^{16} 、もしくは将来の高輝度ハドロン衝突器 FCC (Future Circular Collider) では 10^{17} cm $^{-2}$ s $^{-1}$ に達する。そのような高線量を受けたセンサー性能がどのようになるか、ATLAS のストリップ型 センサーを 10^{17} cm $^{-2}$ s $^{-1}$ まで照射し実際に評価した。評価内容はストリップセンサーに対して従来行っている項目をもとに選定した。

電荷収集量はすでに図 67 に示したように 10^{15} で約半分に減少する。キャリアの移動中の捕獲が主原因であり、収集距離を短くすることが本質的に重要であることが従来より指摘されている。図 69 左は、インプラント電極のパンチスルー特性を評価したもので、 10^{17} でも 90 V 以下で作動することが分かった。照射量とともに作動電圧は高くなるが、パンチスルー機能が保持されることは新たに判明した。図 69 右はインプラント電極の抵抗値の変化である。未照射および 10^{16} までは一定値であったものが 10^{17} では 50% 程度ほど抵抗値が大きくなる。これはセンサー設計へのフィードバックが必要となる。

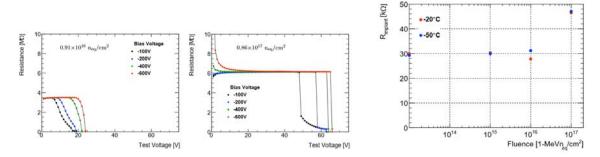


図 69 (左、中)インプラント電極の共通電位への実効的抵抗値とインプラント電極に加えるテスト電圧との依存性。 約 10^{16} および $10^{17}~{\rm cm^{-2}s^{-1}}$ 照射後の結果。テスト電圧が低い領域ではバイアス抵抗値(未照射室温で $1.5{\rm M}\Omega$ であるが、照射とともにポリシリコン抵抗値は大きくなる)に相当するが、パンチスルーが起こることで実効的な抵抗が減り、センサー酸化膜層および読み出しアンプを保護できる。(右)約 $16{\rm mm}$ 長のインプラント電極抵抗値の照射量依存性。

高時間分解能 LGAD 半導体センサー(原)

LGAD (low-gain avalanche diode) は、読み出しの n^+ 電極の直下に高濃度の p^+ 層を形成することで、アバランシェ増幅を起こさせる増幅機能を持たせたシリコン検出器である。信号量が増えることに加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が、薄い pn 接合部で局所的に起きるため時間分解能が

飛躍的に向上する。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 20~30 ps 程度の時間分解能が可能とある。半導体検出器の優れた位置分解に加え時間情報も得ることができれば、HL-LHC やさらに高輝度の加速器実験で要請される、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成に大きな役割を果たすことが期待できる。PET 等の医療機器への応用も視野にある。

2017 年度には試作したセンサーの時間分解能評価を FNAL の 120 GeV 陽子ビームを用いて行い、30 ps を切る優れた時間分解能を達成した。電極細分化としてストリップ形状を試作したが、 p^+ 層の存在しない領域では当然増幅機能がなく、集光したレーザーによる測定で図 70 左のような非一様性を示すことが分かった。この不感領域の振舞を定量的に評価するために TCAD (Technology CAD) を用いた。非一様性を含む様々な測定データを再現するように TCAD のパラメータを決めて評価した非一様性の分布を測定結果と比較している。また、300 V をかけるとストリップ型はブレークダウンするが、その原因が n^+ 電極の端にあることをTCAD から同定した。一様なゲインを保つ電極細分化の候補として、電極をトレンチで物理的に分離する方法を評価した。図 71 左は、トレンチにより電極全領域において一様なゲインが得られることを示す。また図

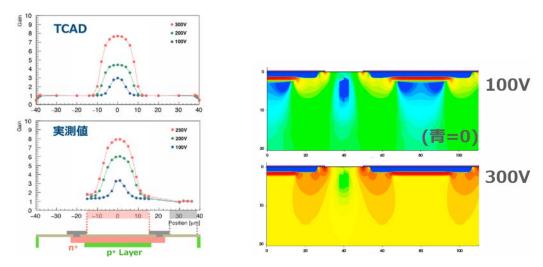


図 70 (左) 赤外レーザーを用いたストリップ型 LGAD の場所によるゲインの変化の測定結果と TCAD による再現。 (右) TCAD によりアバランシェ増幅頻度分布をバイアス電圧 100~V~e300 V~e比較(青は頻度 =0~e示す)。 これにより 300~V~eは n^+ 電極のエッジ部が高くセンサーブレークダウンの原因が特定できた。

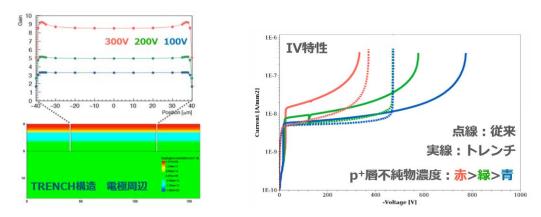


図 71 (左) トレンチによる電極分離構造で期待できるゲインの場所依存性。(右) センサーブレークダウンの様子をトレンチ (実線) およびストリップ (破線) で比較。 p^+ 濃度は三段階で比較した。

71 右は、ブレークダウンの様子を示すもので、ストリップは低いゲインで急峻にブレークするが、トレンチ分離ではなめらかな上昇であるため、高いゲインを安定して得られる可能性がある結果が得られた。これらの研究結果を受けて、新たなセンサー試作を計画している。

国内でのLGADの開発研究は筑波大/KEK グループが主導している。2018 年 12 月には、既述のように海外の研究者を交えて筑波大東京キャンパスでワークショップを開催し、ATLAS 実験への開発、医療用 PETへの応用などを視野に意見が交わされた。

SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発(原)

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製した素子である。BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読み出し回路 一体型ピクセルセンサーを実現する全く新しいタイプの検出器である。我々は Lapis セミコンダクター社の 0.20 μ m SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で、将来の加速器実験に用いることのできるピクセル検出器の開発研究を行っている。

筑波大学グループは開発当初より放射線損傷の研究を主導して進め、昨年度までに、最低 1 MGy までの放射線耐性があることを示すことに成功した。また、ピクセルサイズ 8 μ m 角の検出器(FPIX2)で、世界で初めて半導体検出器で 1 μ m を切る 0.65 μ m の空間分解能を 2017 年度に得ている。2018 年度は、国際リニア衝突器 ILC(International Linear Collider)実験用に開発中の SOFIST を FNAL でテストビーム評価し、また、放射線耐性に関する基礎研究を継続した。

(1) 放射線損傷自動補正機能の基礎研究

SOI は回路層の活性層が 50 nm と薄く FET は個別に酸化膜で絶縁されているために SEE(single event effect) に強い。しかし、周囲を酸化膜に囲われているので、移動度が低く、酸化膜に蓄積しやすい正電荷の影響を受けやすい。この TID 損傷に対しては、SOI2 層を設けて負電位を加えることで TID 損傷を補償する機構を従来より研究し、その有効性は確立した。しかし実用上は、TID に応じて補償電圧を調整する必要があるため、それに対処する方法として、電荷蓄積の効果を FET の特性変化から直接評価し自動で調節できる機構の基礎研究に着手した

(2)SOFIST のビーム試験

位置分解能に優れ、衝突時間も記録できるピクセル検出器を、ILC への適用を目指して開発している。2016 年度は FPIX2 とともに位置測定評価のための SOFISTv1 を試験し、2017 年度は時間分解能を SOFISTv2 (センサー厚 70 μ m)、ビーム飛跡再構成用大面積 INTPIX4 を用いて評価した。2018 年度は、SOFISTv3 と INTPIX7 による試験を行った。図 72 左は、INTPIX4 の位置分解能を評価したものである。INTPIX4 はピクセルサイズが 17 μ m であり、電荷重心法でビーム位置を求めるため、位置分解能は信号ノイズ比(S/N)に 依存することが分かっている。図には同程度のピクセルサイズの他のデバイスとの比較が示されている。ピクセルサイズ 8 μ m の FPIX には及ばないが、20 μ m の SOFIST2 と同等かやや良いという予想通りの分解能であることが示された。(1 サンプルだけ悪いが、全体の位置調整(アライメント)が十分でないことがデータから理解できている。)

SOFIST3 は時間と位置測定を同一ピクセルでできる最初のセンサーであり、ピクセルサイズは 30μm 角とやや大きい。図 72 右にはあるフレーム(収集時間 1 ms)に通過した粒子の電荷と時間を色分けで示したピクセルマップである。2 つの情報が対応して得られていることがわかる。図 73 左には 2 枚の SOFIST3 センサーにヒットしたピクセルコラム番号の相関をヒット数を色で示している。センサーどうしの中心はややずれ

ているが、通過するビームによる相関が明白に見える。また、図 73 中は、同じく 2 つの時間測定の相関でありこれもビームによる相関が見える。例えば、位置相関がある領域内のヒットを選択すると図 73 右に示すように、ランダムな組み合わせによるヒット点は排除される様子がわかる。現在は SOFIST3 の時間分解能や位置分解能の評価を進めている。

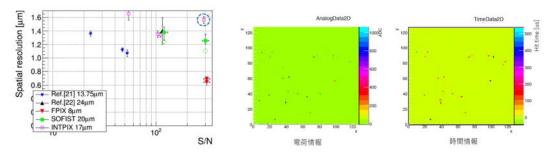


図 72 (左) INTPIX4 の位置分解能を S/N の関数として示す。図には他の同程度のピクセルサイズのセンサーによる評価結果を示す。(右) ビームテストにおける SOFIST3 で記録された 1 フレーム分のデータ。ヒットピクセルは電荷量情報と時間情報の両方を与えていることが分かる。

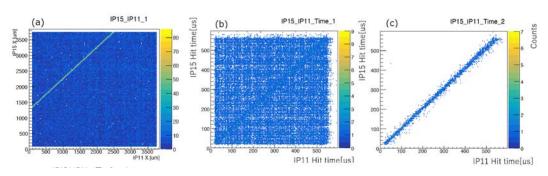


図 73 ビームテストにおける 2 枚の SOFIST3 チップの(左)ピクセルヒット X 座標の相関、(中)ピクセルヒット 時間の相関、(右) X 座標相関の良い領域のデータのみに対する時間相関。

福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミューオンによる観測(原・金)

ミュー粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュー粒子の飛来数分布を大規模構造物の背後で測定することで、構造物内部の様子を透視することが可能である(ミューオンラジオグラフィー法)。福島第一原子炉事故で溶け落ちた燃料デブリの位置を測定することを最終目標にして、2011 年夏から KEK のグループと共同で検出器の技術設計を開始した。2017 年度までに 1~3 号機のすべての測定を完了したので、TIA の光計測の枠組みを用いて行ってきた研究は 2018 年度が最後となる。

2018 年は予備実験として東海村の原電原子炉で 2011~2014 年にかけて行った計測結果の論文をまとめた。 すでに 1 方向からの測定結果は PTEP に投稿・掲載済みであるが、3 方向から測定し核燃料物質の分布を 3 次元的に求めた結果を PTEP に投稿し掲載が受理された(図 74)。

多重 MYTHEN 検出器による SPring-8 BL02B2 におけるハイスループット粉末回折測定の実現(西堀)

SPring-8 において、単結晶 X 線回折ビームライン BL02B1 でパートナーユーザーに指定され活動を筑 波大学教育研究ユニット招致の Bo Iversen 教授を代表として、2018 年より単結晶構造解析ビームラインに納入された CdTe 半導体を用いた PILATUS 検出器の立ち上げ研究を行った。幾つかの問題点が判明し、また、

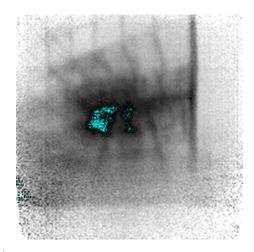




図 74 予備実験で行った(左)ある方向から観測したミュー粒子数分布。構造により分布が変わり、特に吸収の多い箇所は青色で示す。(右)3方向から同様の測定をし、燃料保管プール内空間を1m立法で区切り、2方向以上の測定で強い吸収があった箇所を緑で示す。

新しい測定法も開発できるめどが立ったため、2019 年度からのマシンタイム獲得のために筑波大学が代表で SPring-8 の長期課題申請をし採択された。来年以降も CdTe 検出器の利用研究を進めていく。

FC-HSTS の開発(近藤)

新規精密分光測定法の開発状況

テラヘルツ (THz) 波や熱ノイズレベルの極微弱信号を原子レベルの空間分解能で検出し、さらに精密に調べる技術の開発は難しく、未だに成し遂げられていない課題であった。我々は 2014 年に、筑波大学の技術専門職員の松山英治氏(研究協力者)のアイディアと研究蓄積を基軸に、このような極微弱信号を高感度に検出して精密に分光解析する原理として走査型トンネル顕微鏡(STM)にヘテロダイン検出という方法を導入した新しい計測手法(ヘテロダイン走査トンネル分光、HSTS)を開発した(Sci. Rep. 4 (2014) 6711.)。HSTSでは 2 つの入力交流信号 f_1 と f_2 のヘテロダインミキシングを STM の探針と試料の間の接合部分で生じさせ、 f_1 と f_2 の周波数の差を持つ信号 f_3 を生起する。 f_3 は幅広いエネルギー・周波数領域(f_3 と共鳴吸収やヘテロダインミキシングさせ、高感度に信号検出することができる。この f_3 信号を測定対象と共鳴吸収やヘテロダインミキシングさせ、高感度に信号検出することで精密分光を行う。例えば、従来は低感度のために困難であった固体表面上のスピンのラーモア歳差運動や分子の回転や振動モードを、非破壊かつ無擾乱で高感度に計測し、その生成消滅過程のダイナミクスを含めた詳細な解析が実現できる。しかし HSTS 法を実際に用いる場合には、いくつかの課題があった。そこで本研究では、この課題を克服し peV のエネルギー分解能と原子レベルの空間分解能で錯体分子の電子スピン共鳴 (ESR) の詳細な分光解析に挑む、HSTS の実現を目的とした研究を立案する着想に至った。

我々はまず、HSTS 法で実際に計測を行う際に信号検出限界を定める要因して避けられなかった次の3つの課題の克服を行った:(1)装置環境ノイズの徹底除去、(2)極低温高感度観測環境の構築、(3)ショットノイズの削減。それぞれの要因には深い原理的起源がいくつもあることをすでに我々は掴んでいたので、これらを1つ1つ基礎科学的に明らかにして原理原則に沿って解決を試みた。図75にこの詳細を示す。以下でそれぞれについて述べる。

(1) 装置環境ノイズの徹底除去:極めて静かな観測環境の構築

HSTS 法では 1 つの計測手法として、STM の探針と試料との間の接合部において極めて微弱で検出困難な THz 領域の分子振動シグナルなどの信号 (f_1) を、微弱な外部参照シグナル (局部発振信号、 f_2) を使って低い周波数領域にヘテロダイン変換したシグナル (f_3) としてトンネル電流を介して検出する(図 76)。不必要な熱ノイズを発生させないために微弱でヘテロダインビートダウンに適切な入力信号を使用するわけだが、この際に外部からの侵入ノイズが極めて大きな影響を与えてしまう。特にラーモア周波数帯である GHz 帯域はインフラ電波等の侵入が無視できない難しい領域である。そこで、これらの電磁波の遮蔽を EMI (電磁干渉) シールド材料によって行った。また、浮遊磁場については熱処理を施したミューメタル等の高透磁率素材によって探針と試料との間の接合部を覆い(試料ホルダ部全てを覆う構成で)厳重に遮断した。STM コントローラから入る PC 等のデジタルノイズは多段フィルタ素子をチェンバ導入端子回路に挿入して削減した。さらに STM 探針の Z 方向の安定度も重要であるため、高精度のサーボ・コントローラーを新たに導入した(この処置により、探針の Z 方向の振動までも信号として拾ってしまう恐れが無くなった)。

(2) 極低温高感度観測環境の構築

通常の STM では前置増幅器を脱着可能な外部に設置するが、本研究ではこれを冷却部に設置した。我々の STM 装置(ユニソク社製 USM1400)では、既存の液体ヘリウム (4.2 K) シュラウドからのジュールトムソン効果による冷却により 3.0 K 程度まで STM 探針と試料との間の接合部の冷却が可能となっているが、本研究では熱ノイズを限りなく抑えるために、この接合部の直下(すぐ後段)に同じ温度で機能する前置増幅器を設置できるようにした。

(3) ショットノイズの削減

新しい精密分光手法(FC-HSTS)の開発とその原理実証

本研究ではSTMシステムの周りに電磁干渉シールドを設置し、電磁波の遮断を実現させるとともに熱処理を施したミューメタルによる浮遊磁場遮断を実現し、室温におけるトンネル電流のスペクトルアナライザ上でのノイズレベルの信号強度がこれまでよりも2ケタ程度低い条件を確立することに成功した。またこの環境下でSTMによる画像取得、ヘテロダイン検出の取得にも成功し、新たに多信号のヘテロダインを実現させ、その特性を精密に調べて明らかにする実験を行うことができた。

このように当初目標としていた極めて静かな観測環境が比較的順調に実現できたため、この環境下で新たに 光周波数コム(Comb)信号と呼ばれる信号のヘテロダインビートダウン検出を STM を用いた計測で行った。 これにより本研究で狙っている単一スピン検出が実質的に実現可能となった。この内容について概略を以下で 述べる。

光周波数コム信号とは、強度、中心周波数、間隔(密度)、およびスパン(全体の幅)を正確に制御することができる等間隔の周波数軸での信号配列のことである。気相中のガスの精密分光で用いられる特異な光信号になる。本研究では、STM の心臓部として使用されている非線形の探針-真空-試料接合に光周波数コムを導入し原子スケールの超微細コムレーダとして使用する「周波数コムへテロダイン走査型トンネル分光法(FC-HSTS)」の原理を確立させた。これは原子空間分解能で固体表面上の電子スピン、核スピン、および分

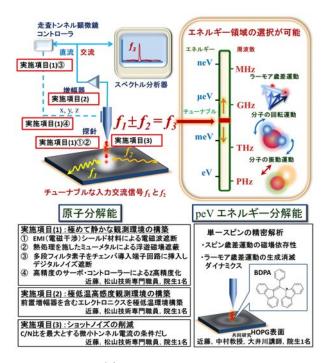


図 75 研究方法の概略図。

子の振動および回転分子モードの微細構造を解析することができる画期的な分光手法である。

具体的には STM 装置の探針-真空-試料接合部にマイクロ波コム信号とコム信号よりも高い周波数の基準信号を導入し、ダウンコンバートされたコム信号をトンネル電流として高感度検出した。この際、微細構造に対応する周波数スパンを持つコム信号、高速フーリエ変換(FFT)、および FFT を備えたマイクロ波アナライザーを用いることにより、トンネル条件および外部磁場によって引き起こされる通常は避けられない変動の影響を完全に排除することに成功した。さらに、コム信号の中心周波数、強度、密度(スパン)をそれぞれ独立して正確に制御する方法が確立され、実際に kHz、(fA-pA) / $\sqrt{\text{Hz}}$ 、およびサブ kHz の間隔範囲で制御できることができた。これらの全ての実験結果はトンネル電流を介したコムと試料の微細構造との間の相互作用に基づく分光イメージングが実現可能であることを示しており、新しい超精密分光の原理が確立したことを意味している。これらの基礎データを裏付けデータや解析データと共にまとめあげ、論文を投稿するところまでに達した。

近年のナノテクノロジーの進歩により、高機能性の半導体量子ドットや金属超格子、有機分子などが様々な形で創製され、その構造や物性などが調べられてきている。しかし、極限計測という意味で、原子スケールの単一構造体の物性は未開拓の領域である。また、STMで単一スピンの ESR 信号を検出する試みは既に複数の研究者によってなされているが、検出感度が低いことが大きな問題となっており、検出感度向上の必要性が指摘されていた。本研究では、FC-HSTS 法を確立させ、単一構造体の微細構造を高感度に精密分光することを可能にした。FC-HSTS 法の確立は、マイクロ波帯の不対電子のスピン情報や THz 帯の分子振動スペクトルを原子レベルの空間分解能で手中に収めたことを意味し、自然科学的にも環境生命科学的にも極めて重要な内容となる。すなわち、電子スピンが関与する全ての現象を有意義に把握することが可能となることを意味しており、高度情報化社会に不可欠な高密度磁性記録素子の開発のみならず、バイオ分野における生物ラジカルの構造や反応の特異性観察にも応用が広がることが予想される。

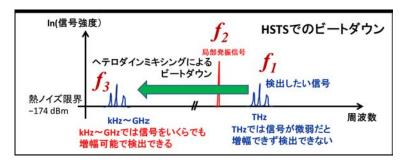


図 76 HSTS でのビートダウンによる THz 検出の概念図。

〈査読付き論文〉

- 原和彦、中村浩二、LGAD ワークショップ: Fast-timing 半導体検出器の開発と応用"、高エネルギーニュース 37-4 (192) 2019.
- K. Hara et al., Recent Development of SOI Pixel Devices, Proceedings of Science, Vol. 307, (VERTEX2017) 0.35 2018.
- 3. D. Sekigawa, <u>K. Hara</u> et al., Fine-Pixel Detector FPIX Realizing Sub-micron Spatial Resolution Developed Based on FD-SOI Technology. In: Liu ZA. (eds) Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017. TIPP 2017. Springer Proceedings in Physics, vol 213. Springer, Singapore.
- 4. S. Ono, K. Hara et al., A Monolithic Pixel Sensor with Fine Space-Time Resolution Based on Silicon-on-Insulator Technology for the ILC Vertex Detector. In: Liu ZA. (eds) Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017. TIPP 2017. Springer Proceedings in Physics, vol 213. Springer, Singapore.
- Mitsunori Kurahashi, and Takahiro Kondo, Alignment-resolved O2 scattering from HOPG and LiF(001) surfaces, Phys. Rev. B, 99 (2019) 045439 (6 pages).
- 6. Takahiro Kondo*, Amjad Al Taleb, Gloria Anemone, Daniel Farias, (*corresponding author), Low-energy methane scattering from Pt(111), J. Chem. Phys., 149 (2018) 084703 (8 pages). (国際共同研究)
- Takahiro Kondo*, Helium Atom Scattering, Compendium of Surface and Interface Analysis, 239-245, (Editors: The Surface Science Society of Japan, Springer, Singapore, Print ISBN 978-981-10-6155-4, Online ISBN 978-981-10-6156-1.) 2018. (*corresponding author)

〈研究成果発表〉

成果発表の一部は、重複を避けるために関連各部門の研究成果に示してあります.

[国際会議]

- K. Hara, "Development of SOI monolithic pixel detector for fine measurement of space and time SOFIST", Vertex International Workshop 2018, Oct. 22–28, 2018, Chennai, India. (招待講演)
- 2. <u>K. Hara</u>, "An overview of charge collection efficiency for ATLAS17LS", ATLAS Upgrade Week, Nov. 12–15, CERN, Switzerland. (一般講演)
- 3. <u>K. Hara</u>, "Development of SOI monolithic pixel detector for fine measurement of space and time SOFIST", Workshop for US-Japan Science Collaboration, Feb. 20 Mar. 3, 2019, Fermilab, USA. (一般講演)
- 4. K. Hara, "Welcome and Introduction",
 - Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (基調講演)
- 5. $\underline{\text{Sayaka Wada}},$ " Timing results of HPK LGAD PD",
 - Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)
- 6. <u>Kyoji Onaru</u>, "Performance Evaluation of HPK Pad and Segmented LGAD Sensors",
 Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)
- 7. Sayaka Wada, "TCAD simulation of LGAD",
 Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)

[国内学会]

1. 原和彦: Development and operation of pixel detectors at the LHC ATLAS experiment,

SOI ピクセル研究会 (2018 年 11 月 19 日), つくば市国際会議場. (招待講演)

- 2. 和田 冴, 原和彦, 他:高時間分解能・位置分解能を達成できる 4 次元半導体検出器の開発, 第 3 回 TIA 光量子シンポジウム(2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場。 (ポスター発表)
- 3. 山内 大輝, 原和彦, 他: SOI 技術を用いた高位置・時間分解能を有するモノリシック型ピクセル検出器 SOFIST の開発研究, 第 3 回 TIA 光量子シンポジウム (2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
- 4. 佐藤 勝哉, 原和彦, 他:高放射線照射されたシリコン半導体量子検出器の性能評価, 第3回 TIA 光量子シンポジウム (2019年2月8日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
- 5. 高橋光太郎, 武内勇司, 金信弘, 他: COBAND 実験に向けた STJ 遠赤外領域単一光子分光検出器の開発, 第 3 回 TIA 光量子シンポジウム (2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
- 6. 山内 大輝, 原和彦, 他: Study of tracking performance of large-area INTPIX4 SOI pixel sensor, 第 1 回量子線イメージング研究会(2018 年 9 月 25 日-26 日), 京都大学. (ポスター発表)
- 7. 岩波四季恵, 安部竜平, 原和彦, 他: SOI 技術を用いた高精細ピクセル検出器の特性評価, 第1回量子線イメージング研究会 (2018年9月25日–26日), 京都大学. (ポスター発表)
- 8. 村山仁志, 渡辺圭敏, 原和彦, 他:Study of basic charactersitics of SOFIST sensors, 第 1 回量子線イメージング研究会 (2018 年 9 月 25 日–26 日), 京都大学. (ポスター発表)
- 9. <u>Hiroki Yamauchi</u>, "Development of Silicon-on-Insulator Monolithic Pixel Detector", Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019, Tsukuba, Japan.
- 10. Kazuki Uchiyama, "ATLAS Pixel Detector for the HL-LHC",
- Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5-6, 2019, Tsukuba, Japan. 11. Sayaka Wada, "Low-Gain Avalanche Detector for 4D Tracking",
- Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 6, 2019, Tsukuba, Japan.
- Kazuhiko Hara, "ATLAS Strip Detector for the HL-LHC",
 Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 6, 2019, Tsukuba, Japan.
- 13. Yuji Takeuchi, "R&D of FIR quantum photo-sensors based on STJs for COBAND", Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019, Tsukuba, Japan.
- 14. 内山和貴:RD53A モジュールの基礎特性評価,
 - AJ シリコンワークショップ (2018年12月21日-22日), 九州大学.
- 15. 原田大豪:RD53A の閾値実測と照射後センサーの全空乏化電圧の評価, AJ シリコンワークショップ(2018 年 12 月 21 日–22 日), 九州大学.
- 16. 大鳴匡至:Survey of strip sensor,
 - AJ シリコンワークショップ(2018 年 12 月 21 日–22 日),九州大学.
- 17. 原和彦: Preparation of strip sensor production,
 - AJ シリコンワークショップ (2018 年 12 月 21 日-22 日), 九州大学.
- 18. 山内大輝: 大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX4 を用いたビーム飛跡再構成性能の評価, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14 日-17 日), 信州大学 松本キャンパス.
- 19. 大鳴匡至:HL-LHC に向けた初期量産型 ATLAS ストリップ型検出器の放射線耐性の評価,
 - 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14 日-17 日), 信州大学 松本キャンパス.
- 20. 村山仁志: 精密な位置・時間計測が可能な SOI ピクセルセンサー SOFIST3 のテストビームを用いた性能評価, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14 日-17 日), 九州大学 伊都キャンパス.
- 21. 山内大輝: 大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX4 における飛跡再構成性能評価, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14 日-17 日), 九州大学 伊都キャンパス.
- 22. 岩波四季恵: 大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器を用いたビーム飛跡検出のための開発研究, 日本物理学会 第74 回年次大会 (2019 年 3 月 14 日-17 日), 九州大学 伊都キャンパス.
- 23. 近藤剛弘, 分子線で観る化学プロセス, 化学科セミナー ~物理化学研究の新潮流, 東京工業大学 大岡山キャンパス 本館 3 階第 2 会議室, 2018.9.21. (招待講演)
- 24. 近藤剛弘, ホウ素を含む新規二次元物質群の創出と機能評価,
 - 量子物理学・ナノサイエンス第 57 回特別セミナー, 東京工業大学 大岡山キャンパス 本館 2 階 284A 物理学系輪講室, 2018.11.7. (招待講演)

〈その他特記事項〉

- 1. 宮内雅浩, 河村玲哉, 近藤剛弘, 水素貯蔵ならびに放出材料, 出願人:国立大学法人東京工業大学,国立大学法人筑波大学,特願2018-118560, 出願日:2018.6.22.
- 2. 近藤剛弘, 藤野朝日, 石引涼太, 後藤大河, 伊藤伸一, 二酸化炭素貯蔵ならびに放出材料, 出願人: 国立大学法人筑波大学, 国立大学法人東京工業大学, 特願 2018-204785, 出願日 2018.10.31.
- 3. 近藤剛弘, 藤野朝日, 石引涼太, 後藤大河, 宮内雅浩, 河村玲哉, 平林透, 伊藤伸一, 還元材料, 複合体, 還元方法, 出願人: 国立大学法人筑波大学, 国立大学法人東京工業大学, 特願 2019-42011, 出願日 2019.3.7.

第Ⅲ部

資料

13 センター細則

○国立大学法人筑波大学宇宙史研究センター細則

平成29年10月13日 数理物質系部局細則第4号

改正 平成30年数理物質系部局細則第1号

国立大学法人筑波大学宇宙史研究センター細則

(趣旨)

第1条 この部局細則は、国立大学法人筑波大学の組織及び運営の基本に関する規則(平成16年法人規則第1号。以下「基本規則」という。)第50条第5項の規定に基づき、宇宙史研究センター(以下「センター」という。)の組織及び運営に関し、必要な事項を定めるものとする。

(目的)

第2条 センターは、素粒子物理学、原子核物理学及び宇宙物理学分野における実験、観測的な研究とこれらの研究を融合する世界的研究拠点を形成し、人類の持つ根源的な問いに答えるべく宇宙史の解明を図ることを目的とする。

(組織)

- 第3条 前条の目的達成のため、センターに研究組織及び研究支援組織を置く。
- 2 研究組織に次の部門を置く。
- (1) 南極天文学研究部門
- (2)素粒子構造研究部門
- (3) クォーク・核物質研究部門
- (4) 光量子計測器開発部門
- 3 前項の部門間における連携並びに学内外連携に関し調整を図るため、融合研究企画調整室を置く。
- 4 第2項の部門に、当該部門における事業について総括整理させるため、部門長を置く。
- 5 第3項の融合研究企画調整室に、室を主宰する室長を置く。
- 6 部門長及び室長の任期は、2年とし、再任を妨げない。
- 7 研究組織及び研究支援組織に関し必要な事項は、センター長が別に定める。

(構成員)

第4条 前条の各組織にそれぞれ必要な職員を置き、必要な事項はセンター長が別に定める。

(副センター長)

- 第5条 センターに副センター長を置くことができる。
- 2 副センター長は、センター長の職務を助け、センター長に事故あるときは、その職務を代理する。
- 3 副センター長の任期は、2年とし、再任を妨げない。ただし、任期の途中で欠員となった場合の後任の任期は、前任者の残任期間とする。
- 4 副センター長は、センター構成員からセンター長が指名する者とする。

(運営協議会)

- 第6条 センターに基本規則第52条に定める運営協議会として、センター運営協議会(以下「協議会」という。)を置き、センターの運営の大綱に関し、次に掲げる事項を協議するものとする。
- (1) 運営の方針に関すること。
- (2) 研究活動等の評価に関すること。
- (3) その他協議会委員長が必要と認める事項
- 第7条 協議会は、次に掲げる委員で組織する。
- (1) センター長
- (2) 副センター長
- (3) 各部門長
- (4) 数理物質系長
- (5) 国立大学法人筑波大学の職員以外の学識経験者 若干人
- (6) その他センター長が推薦する本学の大学教員 若干人
- 2 センター長は、前項第6号の委員の選出に当たっては、当該大学教員の所属長の了承を得るものとする。
- 3 協議会に委員長を置き、委員の互選により選出する。

(運営委員会)

- 第8条 センターに、基本規則第53条に定める運営委員会として、センター運営委員会 (以下「委員会」という。)を置き、センターの運営に関し、次に掲げる事項を審議する ものとする。
- (1) 事業計画に関すること。
- (2) 予算に関すること。
- (3) 施設の管理に関すること。
- (4) その他センター長が必要と認める事項
- 第9条 委員会は、次に掲げる委員で組織する。
- (1) センター長
- (2) 副センター長
- (3) 各部門長
- (4) その他センター長が指名する者
- 2 センター長は、前項第4号の委員の選出に当たっては、当該大学教員の所属長の了承を得るものとする。
- 3 委員会に委員長を置き、センター長をもって充てる。
- 4 委員長は、委員会を主宰する。
- 5 委員長に事故があるときは、あらかじめ委員長の指名する委員がその職務を代行する。
- 6 委員会は、過半数の委員が出席しなければ、議事を開き、議決することができない。
- 7 委員会の議事は、出席した委員の過半数をもって決し、可否同数のときは、委員長の 決するところによる。

(任期)

- 第10条 第7条第1項第5号及び第6号並びに前条第1項第4号の委員の任期は、2年とする。ただし、任期の終期は、委員となる日の属する年度の翌年度の末日とする。
- 2 補欠の委員の任期は、前任者の残任期間とする。
- 3 前2項の委員は、再任されることができる。

(事務)

第11条 センターに関する事務は、数理物質エリア支援室が行う。

(雑則)

第12条 この部局細則に定めるもののほか、センターの運営に関し必要な事項は、別に 定める。

附則

この部局細則は、平成29年10月13日から施行し、平成29年10月1日から適用する。

国立大学法人筑波大学数理物質融合科学センター細則(平成26年数理物質系部局細則 第8号)は廃止する。

附 則

この部局細則は、平成30年4月1日から施行する。

14 ロゴ

宇宙史研究センター(朝永センター)のロゴを図 77 に示す。宇宙を内包した勾玉の首飾りをイメージしている(金谷和至 2017/10)。

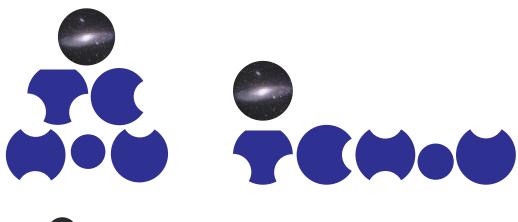




図 77 宇宙史研究センター (朝永センター) のロゴとロゴタイプ

15 競争的資金獲得状況

| 職名 | 構成員名 | 研究代表者名 | 区分 | 種目 | 研究題目・寄附の目的等 | 金額(分担金) |
|-----|-------|--------|--------------------|------------------------------------|---|-------------|
| 教授 | 中井 直正 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究A | 大規模電波カメラによる「あかり」北極 域の掃天観測 | ¥1,000,000 |
| 助教 | 渡邉 祥正 | | 受託事業 | 研究成果の社会還元・普及事業 (ひらめき・ときめきサイエンス) | 自作の望遠鏡で宇宙を見よう | ¥389,000 |
| 教授 | 久野 成夫 | | その他 | | 南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討 | ¥158,000 |
| 教授 | 受川史彦 | 花垣 和則 | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 新学術領域研究計画研究 | ヒッグス粒子で探る真空と世代構造 | ¥3,900,000 |
| 教授 | 石橋延幸 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(C) | 超弦の場の理論を用いた超弦理論のダ イナミクスの研究 | ¥780,000 |
| 助教 | 佐藤勇二 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(C) | ゲージ理論-重力理論双対性と可積分性を用いた強結合ゲージ理論の研究 | ¥780,000 |
| 助教 | 伊敷吾郎 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 若手研究(B) | 超弦理論の非摂動的定式化について の研究 | ¥780,000 |
| 助教 | 飯田崇史 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(B) | 高発光量無機シンチレータで目指す宇 宙史研究 | ¥7,280,000 |
| 助教 | 飯田崇史 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 挑戦的萌芽研究 | ハフニウム超伝導体を用いた究極の感 度を持つ超伝導検出器への挑戦 | ¥3,120,000 |
| 准教授 | 武内 勇司 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 挑戦的萌芽研究 | 半導体SOI回路と超伝導検出器STJの 融合による革新的高感度検出器の開発 | ¥1,300,000 |
| 准教授 | 武内 勇司 | 中家 剛 | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 新学術領域研究(研究領域提案型) | ニュートリノフロンティアの融合と進化 | ¥53,000 |
| 教授 | 三明 康郎 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(B) | Di-Jet識別装置を用いたグルオン衝撃 波の探索 | ¥4,160,000 |
| 教授 | 小澤顕 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(A) | 蓄積リングでの質量測定によるハロー 原子核の探索 | ¥36,140,000 |
| 講師 | 中條達也 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(A) | ALICE 実験 ジェットと前方光子で探る 高温クォーク物質生成の起源 | ¥20,930,000 |
| 講師 | 中條達也 | 志垣賢太 | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 新学術領域研究(研究領域提案 型) | クォーク階層とハドロン階層を繋ぐ動的 機構 | ¥61,620,000 |
| 准教授 | 江角晋一 | | 奨学寄附金 | 伊藤科学振興会 | 原子核衝突ビームエネルギー走査によ る高密度クォーク核物質の研究 | ¥1,000,000 |
| 教授 | 金谷和至 | | 科研費補助金· 学術研究助成金 | 基盤研究(C) | 有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造 | ¥1,040,000 |
| 准教授 | 原和彦 | | その他 | | 3次元積層半導体量子イメージセン サーの調査研究 | ¥100,000 |
| | | | | | Innovative design concepts in p bulk planar pixel sensors for ATLAS | |
| 准教授 | 原和彦 | | その他 | | tracker construction | ¥300,000 |

16 共同研究・受託研究

| 職名 | 構成員名 | 相手先機関 | 金額 | 期間 | 内容 |
|-----|-------|----------------------|------------|-----------|--|
| 教授 | 久野 成夫 | 国立天文台 | ¥4,888,000 | | 大学間連携VLBI観測事業に係る研究―高精度VLBI 観測による銀河系の構造及び進化の解明 |
| 教授 | 三明康郎 | CERN-LHCにおけるALICE実験 | | 2007年~ | QGP研究、ジェット・エネルギー損失の研究 |
| 准教授 | 江角晋一 | BNL-RHICにおけるPHENIX実験 | | 2000年~ | QGP研究、クォーク流体・融合の研究 |
| 准教授 | 江角晋一 | BNL-RHICにおけるSTAR実験 | | 2016年~ | QGP研究、QCD相構造、臨界点の探索研究 |
| 准教授 | 原和彦 | LAL(フランス) | ¥1,000,000 | 2016-2018 | Innovative design concepts in p bulk planar pixel sensors for ATLAS tracker construction |
| 准教授 | 原和彦 | KEKーFNAL(アメリカ) | ¥980,000 | 2018 | 検討会等開催支援 |
| 准教授 | 原和彦 | KEK,東大、産総研 | ¥2,000,000 | 2018 | 3次元積層半導体量子イメージセンサーの調査研究 |

17 各種受賞等

| 職名 | 構成員名 | 共同受賞者名 | 賞名 | 受賞課題·受賞論文名 | 受賞年・月・日 | 団体名 |
|-----|------------------|----------------|------------------------|--|-----------|------------------|
| | 原和彦, 金信弘, | | the 2019 European | | | |
| | Soo-Bong KIM, 佐藤 | | Physical Society "High | | | |
| | 構二, 武内勇司, 受 | CDF and D0 | Energy and Particle | for the discovery of the top quark and the | | European |
| その他 | 川史彦, 吉田拓生 | Collaborations | Physics Prize" | detailed measurement of its properties | 2019/7/15 | Physical Society |
| | | | | 2TeV陽子反陽子衝突実験CDFによるトッ | | |
| | | | | プクォークの発見、Bc中間子の発見、およ | | |
| | | | 2018年度(第42回)金萬 | びBs中間子の粒子反粒子振動の初観測 | | |
| 教授 | 金信弘 | | 有学術賞 | をはじめとする素粒子物理の研究 | 2019/5/11 | 成和記念財団 |
| | | | 2018年度筑波大学数理 | | | |
| | | | 物質科学研究科物理学 | ゲージ/重力対応におけるsmall | | 筑波大学数理物 |
| その他 | 渡辺展正 | | 専攻長賞 | Schwarzschild black holeの新しい記述法 | 2018/3/1 | 質科学研究科 |
| | | | | Search for the Higgs Boson Produced in | | |
| | | | 理学会若手奨励賞 素粒 | Association with Top Quarks and | | |
| その他 | 本多俊介 | | 子実験領域 | Decaying into Bottom Quarks with the | 2018/10/1 | 日本物理学会 |
| | | | 2018年度筑波大学数理 | | | |
| | | | | 4次元飛跡検出のための内部増幅機能付 | | 筑波大学数理物 |
| その他 | 和田 冴 | | 長表彰 | き半導体検出器LGADの基礎研究 | 2018/3/1 | 質科学研究科 |

18 新聞等報道・特記事項

| 職名 | 構成員名 | 共同発表者名 | 新聞·雑誌名 | 報道内容 | 年·月·日 |
|-----|--------------|------------|-----------|------------------------------|----------|
| | 原和彦, 池上陽一, 金 | | | もっとも重い素粒子であるトップクォークの質量起源も | |
| | 信弘, 大川英希, 佐藤 | | | ヒッグス機構と判明~LHCのATLAS実験などの成果を | |
| その他 | 構二, 受川史彦 | ATLAS グループ | 朝日新聞 | CERNが発表~ | 2018/6/6 |
| | 原和彦, 池上陽一, 金 | | | ヒッグス粒子とボトムクォークの結合、ついに初観測物 | |
| | 信弘, 大川英希, 佐藤 | | ナショナル ジオグ | 質の質量起源の解明 - LHCのATLAS実験などの成果 | |
| その他 | 構二, 受川史彦 | ATLASグループ | ラフィック日本版 | をCERNがプレスリリース - | 2018/9/3 |

19 学会活動・各種委員等

| 職名 | 構成員名 | 役職名など | 組織名 | 任期 |
|---------|---------|-------------------------|-----------------------------|------------------|
| | | | | |
| 教授 | 石橋延幸 | 日本物理学会誌副編集委員長 | 日本物理学会 | 2017.4 - (2年) |
| 教授 | 石橋 延幸 | 若手奨励賞選考委員 若手奨励賞選考委員 | 日本物理学会 | 2017.4 - (2年) |
| | | 京都大学基礎物理学研究所運 | | |
| 教授 | 石橋延幸 | 営協議会委員 | 京都大学基礎物理学研究所 | 2017.4 - (2年) |
| +/L 1±0 | T+577 + | 湯川記念財団・木村利栄理論物 | | |
| 教授 | 石橋延幸 | 理学賞選考委員 | 湯川記念財団 | |
| 教授 | 石橋延幸 | PTEP編集委員 | 日本物理学会·理論物理学刊行会 | 2014.4 - |
| | | 日本物理学会素粒子実験領域 | | |
| 教授 | 受川史彦 | 副代表 | 日本物理学会 | 2018.4-(1年) |
| | | | 素粒子論グループ・素粒子論サブ | |
| 助教 | 伊敷 吾郎 | 素粒子論委員 会計 | グループ | 2017.4 - 2019.3 |
| | | | | 2014年4月~ |
| 教授 | 久野成夫 | プロジェクト評価委員会委員 | 国立天文台 | 2018年6月 |
| | | | | 2009年4月~ |
| 教授 | 久野成夫 | 欧文研究報告編集委員 | 日本天文学会 | 2018年6月 |
| | | | | 2016年7月~ |
| 教授 | 久野成夫 | 電波専門委員会委員 | 国立天文台 | 2018年6月 |
| | | | | 2017年6月~ |
| 教授 | 久野成夫 | 研究奨励賞選考委員会委員 | 国立天文台 | 2019年5月 |
| | | | | |
| 教授 | 金谷和至 | 日本物理学会代議員 | 日本物理学会 | 2017.4 - 2019.3 |
| 教授 | 金谷和至 | 加速器共通基盤施設運営会議委員 | 高エネルギー加速器研究機構 | 2015.6 - 2019. 3 |
| | | 加速器共通基盤施設人事委員 | | |
| 教授 | 金谷和至 | 会委員 | 高エネルギー加速器研究機構 | 2015.6 - 2019. 3 |
| | | | | |
| 教授 | 金谷和至 | 教育研究評議会評議員 | 高エネルギー加速器研究機構 | 2015.6 - 2021.3 |
| | | 人材育成マネジメントグループ/ | | 2015/8 - |
| 教授 | 金谷 和至 | 委員 | つくばイノベーションアリーナ | 2019/3 |
| | | | | |
| 准教授 | 原和彦 | 国際プログラム委員 | Vertex国際会議 | 2014- |
| 准教授 | 原和彦 | TIA光量子計測MG委員 | TIA-Accelerate | 2017— |
| 作为及 | WYTHIS | 14 70年 1 印 / 阿四女民 | EDSU2018 Exploring the Dark | 2017 |
| 准教授 | 原和彦 | EDSU2018 実行委員 | Side of the Universe | 2017-2018 |
| 作为及 | W.412 | 上5002010 大门女员 | Side of the offiverse | 2017 2010 |
| 准教授 | 原和彦 | IEEE2019 Topic Convener | IEEE NSS | 2019 |



筑波大学 数理物質系 宇宙史研究センター Tomonaga Center for the History of the Universe (TCHoU)

〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

URL: http://www.pas.tsukuba.ac.jp/ \sim TCHoU/email: TCHoU@pas.tsukuba.ac.jp phone: 029-853-3724 fax: 029-853-6305