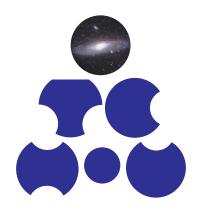
筑波大学 数理物質系宇宙史研究センター

2019 年度 活動報告書



宇宙史研究センター 2020 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)では、宇宙の創生から物質・生命の起源まで、138 億年にわたる宇宙史を統一的に理解することを目標に、素粒子構造研究部門、クォーク・核物質研究部門、南極天文学研究部門、光量子計測器開発部門の4部門が精力的に研究を行っています。

素粒子構造部門では、素粒子とその性質を実験的に解明するために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に基づく研究を行っています。また、重力を含めた素粒子の基礎理論の構築を目指し、超弦理論の研究を行っています。さらに、ニュートリノ質量の絶対値決定を目指して宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索実験を計画しています。クォーク・核物質研究部門では、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、高エネルギーの原子核衝突実験に基づく研究を、また、クォーク物質の相構造や熱力学特性を引き出すために、格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究を行っています。宇宙における物質生成のメカニズムを解明するために、理研 RIBF における元素合成研究も進めています。宇宙における物質生成のメカニズムを解明するために、理研 RIBF における元素合成研究も進めています。南極天文学研究部門では、既存の観測装置を用いて、宇宙における星形成や遠方銀河の研究を進めるとともに、銀河形成・進化の過程を解明するために南極テラヘルツ望遠鏡による暗黒銀河探査計画を推進しています。光量子計測器開発部門では、各部門で進めている先端光量子検出器開発の情報を共有するともに、KEK トリスタン AR への電子テストビーム施設整備を目指しています。当センターでは、各部門でのこれらの研究を推進するとともに、部門間の交流から新たな学問分野を創出し、宇宙史の研究を牽引することを目指しています。

この報告書は、宇宙史研究センターの、2019 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。パンフレットや前身の CiRfSE の報告書などもアーカイブされています。

2020年7月 宇宙史研究センター長 久野 成夫

目次

第Ⅰ部	全体報告	1
1	2019 年度活動概要	3
2 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6	宇宙史研究センターについて 設置の経緯	5 5 6 7 8
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	構成員 国際テニュアトラック教員 海外教育研究ユニット招致 クロス・アポイントメント教員 その他の人事制度の活用 研究員	10 11 11 12 12 13
4.1 4.2	受賞 金信弘特命教授 成和記念財団「金萬有学術賞」 (2019/5)	14 14 14
5.1 5.2 5.3	各種会議 構成員会議	15 15 17 18
6.1 6.2 6.3 6.4 6.5	研究集会・セミナー The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」	20 20 20 21 21 21
7 7.1 7.2	一般向け広報活動 平成 31 年度 (第 60 回) 科学技術週間	26 26

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」	27
8	2019 年度会計報告	28
第Ⅱ部	了。 3 研究部門活動報告	31
9	南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy)	33
10	素粒子構造研究部門 (Division of Elementary Particles)	43
11	クォーク・核物質研究部門 (Division of Quark Nuclear Matters)	66
12	光量子計測器開発部門 (Division of Photon and Particle Detectors)	98
第Ⅲ音	图 資料	111
13	センター細則	113
14	ロゴ	115
15	競争的資金獲得状況	116
16	共同研究・受託研究	117
17	各種受賞等	117
18	新聞等報道・特記事項	117
19	学会活動・各種委員等	118

第1部 全体報告

1 2019 年度活動概要

筑波大学宇宙史研究センター (TCHoU) の 2019 年度活動概要を、以下にまとめる。

> 研究体制構築/拡充

- ・ 南極天文台プロジェクトの推進:
 - ・国立天文台、国立極地研究所、イタリア研究者との連携強化
- COBANDプロジェクトの推進:
 - ・韓国基礎科学研究院(IBS) Center for Underground Physicsの研究者との連携強化及び大学院生の海外拠点実習を実施
 - ・成均館大学からの海外ユニット招致 (KIM, Soo-Bong氏) を準備中
- ・ 卓越研究員による助教の採用
- 戦略的分野拡充(理学基幹分野)による助教2名の採用
- ・ 国際テニュアトラック助教の採用
- 卓越大学院「138億年史学位プログラム」: 不採択、2020年度へ向けて準備

> 人事異動

- 渡邉祥正助教 ⇒2019/3/31 日本大学APに転出
- 大川英希助教 ⇒2019/5/31 中国・復旦大学Pに転出
- 新井田貴文助教: 2019/7/1 着任(国際TT助教)
- 伊敷吾郎助教: 2019/9/1 APに昇任
- 橋本拓也助教: 2019/12/1 着任(卓越研究員)
- Kim Soo-Bong教授 ⇒2020/2/29 退職 (海外ユニット招致PI)
- 野中俊宏助教: 2020/3/1 着任(戦略的分野拡充)
- 廣瀬茂輝助教: 2020/3/16 着任(戦略的分野拡充)

▶ 構成員会議/成果報告会

- 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
- 年2回程度開催
 - 第1回:2019/6/3 (報告+8講演)
 - 第2回:2019/11/21 (報告+10講演)

> 運営委委員会

- 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、小沢教授(センター長が指名する者として)
 - 2019年度 4/8, 5/13, 6/10, 7/8, 9/9, 10/15, 11/11, 12/9, 1/14, 2/10, 3/9

> 運営協議会

- 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:新井康夫特別教授(KEK)、小林秀行教授(NAOJ)、梅村雅之教授(CCS)、桜井鉄也教授(C-AIR センター長)、齋藤一弥教授(PAS系長)、運営委員
 - 第1回 2020/3/24

> 宇宙史セミナー

- 2019/5/31吉岡瑞樹 氏(九州大学)"J-PARCにおける低エネルギー中性子を用いた基礎 物理実験"
- 2019/11/8 藤井恵介 氏 (高エネルギー加速器研究機構) "ILC 計画の物理、加速器、測定器、現状"
- 2019/11/29 小汐由介 氏 (岡山大学)"Supernova neutrino measurement in Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande"
- 2019/12/13 Nicolo Cartiglia 氏(INFN) "Tracking particles in space and time"
- 2019/12/19 横山 広樹 氏(Nikhef National institute for subatomic physics)"High granularity digital calorimeter with MAPS sensor"
- 2020/1/8 Ashutosh Kumar Pandey 氏(TCHoU)"Probing the Quark Gluon Plasma with energetic parton"
- 2020/1/10 Soo-Bong Kim ${\mathbb K}$ (SNU/TCHoU) "Detection of coherent reactor neutrino scattering and search for sterile neutrino"
- 2020/1/20 Nu Xu 氏(Lawrence Berkeley National Laboratory)"BES2 physics and future"

▶ 研究集会

- 2019/8/19-21 チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」@理化学研究所
 - 参加者:81名
- 2019/12/21 研究会「テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像」@国立極地研究所
 - 参加者:28名
- 2020/1/27 第4回「3次元積層半導体量子イメージセンサ | 研究会@つくば国際会議場
 - 参加者:58名

> 一般向け広報活動

- 2019/4/20 科学技術週間展示 来場者数:延135名(内 青少年65名)
- 2019/7/6 天文宇宙の七夕講演会 来場者数:80名
- 2019/11/3-4 筑波大学学園祭「雙峰祭」研究紹介 来場者 延777名

▶ 受賞など

- 2019/5/11 金信弘特命教授 成和記念財団「金萬有学術賞」
- 2019/6/15 CDF実験グループ(関係する当センター研究者は、受川史彦、武内勇司、原和彦、佐藤構二、金信弘、S. B. Kim, 吉田拓生) ヨーロッパ物理学会2019年高エネルギー素粒子物理学賞

2 宇宙史研究センターについて

2.1 設置の経緯

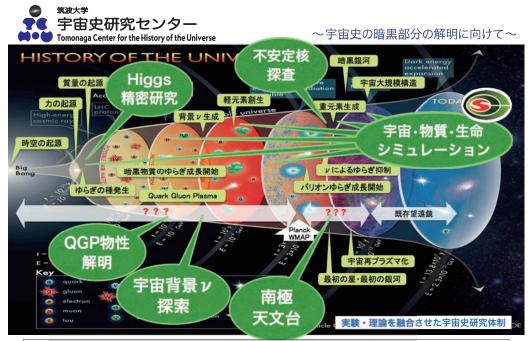
筑波大学宇宙史研究センター(Tomonaga Center for the History of the Universe: 朝永センター)は、2016年の筑波大学第3期中期計画・中期目標にむけた構想に従って 2017年に行われた筑波大学数理物質系に属する二つ研究センター(学際物質科学研究センターと数理物質融合科学センター)の改組再編に基づき、数理物質融合科学センター(Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering: CiRfSE「サーフス」)の宇宙史国際研究拠点と光量子計測器開発推進室を核として、2017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。なお、センターの英語略称は「TCHoU」とし、「チャオ」と読む。

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 研究目的

TCHoU 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し、宇宙史研究の国際共同研究拠点を形成する。

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。



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・素粒子・原子核の最先端理論・実験プロジェクトを融合
- ☑ 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。
- ⇒ 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1 宇宙史研究センターの研究目的

2.3 朝永センターの名称について



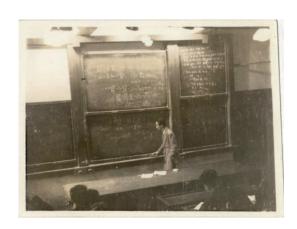


図 2 朝永振一郎博士 (1906-1979)。右は、東京教育大学理学部 (大塚) での量子力学の講義、1960 年頃。(写真:筑 波大学朝永記念室蔵)

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 2)。

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。

2.4 宇宙史研究センターの構成



図3 宇宙史研究センターの研究部門

TCHoU は、2.2 節で述べた目的を達成するために、図 3 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。

2.5 宇宙史研究センターの運営体制

図4に、TCHoU の運営体制を示す。

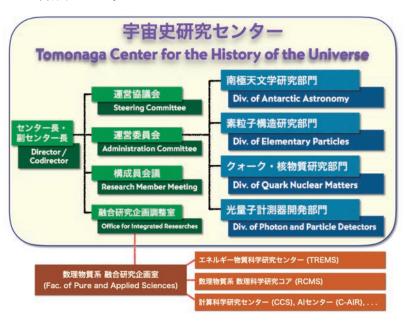


図 4 宇宙史研究センターの運営体制

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。

2.6 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 1 階 10 部屋のまとまったスペース($404\mathrm{m}^2$)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いる。

図5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 5 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。2019 年度当初の構成教員・連携教員を図 6 に、2020年度当初の構成教員・連携教員を図 7 に、それぞれ示す。金谷和至センター長が 2020 年 3 月で定年退官となり、2020年度から久野成夫教授が新センター長に就任することとなった。なお、久野教授は南極天文学研究部門長を兼任する。また、2019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)、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PI)、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: 藏增嘉伸(p)、谷口裕介(ap)、向井もも(a)、杉立徹(p客員:広大)、

家與: 臧相蓋所(p)、台口怡介(ap)、阿开もも(a)、杉立脈(p各員:広人)、 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 6 宇宙史研究センター構成教員・連携教員(2019/4):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。

TCHoU 構成教員・連携教員・研究員

センター長: 久野成夫(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)、橋本拓也(a)、徂徠和夫(apCA:北大)

連携教員: 中井直正(p:関西学院大)、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(ap:芝浦工大)

研究員: 高水裕一(CCS)、齋藤弘雄、Salak Dragan

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)、伊敷吾郎(ap)、原 和彦(ap)、佐藤構二(l)、飯田崇史(a)、

廣瀬茂鐸(a)、金 信弘(p特命)、Soo-Bong Kim(p海外unitPl: 韓国成均館大)、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)、中條達也(l)、Norbert Novitzky(a海外unit副PI)、新井田貴文(a)、野中俊宏(a)、

轟木貴人(a)、金谷和至(p特命)、三明康郎(p特命)、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: 藏增嘉伸(p)、谷口裕介(ap)、笹公和(ap)、森口哲朗(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)、齋藤武彦(p:理研)、山口由高(ap:理研)

坂井真吾、Ashutoh Kumar Pandey

部門長:原和彦(ap) 光量子計測器開発部門

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)a、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

2020/05

図 7 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2020/4)

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(素粒子構造)と Oliver Busch 助教(クォーク・核物質)が採用された。

大川助教と Busch 助教は、2017 年秋のテニュア審査を受けテニュアを獲得した。その後、大川助教は教授 として復旦大学(中国)へ転出した (2019 年 5 月 31 日退職)。Busch 助教は 2018 年 3 月 31 日にインフル エンザで急逝された。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」へ応募し採択された。国際公募を行った結果、新井田貴文助教が採用され た(2019年7月1日着任)。

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た。その後、Kim 教授は 2020 年2月29日にソウル国立大学から成均館大学に異動となったため、当センター海外教育研究ユニット招致 PI を退職したが、引き続き共同研究を推進するため成均館大学ニュートリノ研究センター PI として招致の手続きを開始した。

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 日からクロスアポイントメント教員となっていた中井直正教授が、2019 年度で筑波大学での定年年齢に達したためクロスアポイントメントが終了となった(2020 年 3 月 31 日)。対応して、久野成夫教授の関西学院大学でのクロスアポイントメントも終了となった(2020 年 3 月 31 日)。なお、中井教授には連携教員になっていただき、引き続き南極天文台計画に向けた協力体制を維持している。

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。素粒子構造研究部門の廣瀬茂輝助教(2020年3月16日着任)とクォーク核物質研究部門の野中俊宏助教(2020年3月1日着任)が、物理学域からの提案によって採用された。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。

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。

表 1 2019 年度 宇宙史研究センター研究員

氏名	部門	所属	任期
高水裕一	南極天文学研究部門	計算科学研究センター	2017/11/1-
齋藤弘雄	南極天文学研究部門	物理学域	2019/4/1-
Dragan SALAK	南極天文学研究部門	物理学域	2019/10/1-
Ashutosh Kumar PANDEY	クォーク・核物質研究部門	物理学域	2019/11/19-

4 受賞

4.1 金信弘特命教授 成和記念財団「金萬有学術賞」 (2019/5)

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」によって、在日コリアンの自然科学研究を対象に与えられる成和記念財団「金萬有学術賞」を受賞した(2019 年 5 月 11 日)。



図 8 金信弘特命教授 成和記念財団「金萬有学術賞」受賞(2019年5月11日)

4.2 CDF Collaborations ヨーロッパ物理学会 2019 年高エネルギー素粒子物理学賞 (2019/6)

素粒子構造部門が参加している CDF Collaboration (関係する当センター研究者は、受川史彦、武内勇司、原和彦、佐藤構二、金信弘、S. B. Kim、吉田拓生)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」で、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) を受賞した(2019 年 6 月 15 日)。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。

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 2019 年度第 1 回構成員会議

日時 2019年6月3日(月)10:30-17:25

場所 自然 B114

出席者 金谷、受川、久野、武内、江角、原、ほか(計24名)

宇宙史研究センターとして最初の構成員会議を、2019 年 6 月 3 日に開催した。構成員会議後に打ち上げ及び懇親会として、筑波大学の野性の森でバーベキューを開催した。

- 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 年度全体活動概要(金谷)
- 4. 2018 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

- 2019 年 1 月 15 日に 選考委員による投票を実施し、系の承認のもと、金谷センター長の再任を内申したこと、また、2019 年度末で定年となるため、2020 年 1 月には次期センター長を改めて選出する必要があることが報告された。
- 昨年度、「卓越大学院」へ申請し不採択となった「138 億年史卓越教育プログラム」を修正して「138 億年の進化・相転移に学ぶ、ダ・ヴィンチ型人材育成プログラム」とし、重田育照教授 (CCS, 生命物理) をコーディネータとして提出したことが報告された。
- 2019 年 1 月に、「卓越研究員」の制度を利用した全学戦略ポイントの使用について学内公募があり、宇宙史研究センターからの応募が採択され、2019 年 3 月に筑波大から公募が行われた旨報告された。
- 受川副センター長より、センター予算について報告され、承認された。
- 6. 各プロジェクト成果報告(8講演)
 - LHC ATLAS 実験(佐藤構二)
 - COBAND 実験に向けた STJ+SOI アンプ開発現状と sub-GeV 領域ダークマター粒子探索への応用(武内勇司)

- 宇宙論と原始重力波(高水裕一)
- 南極天文学研究部門活動報告(久野成夫)
- Development of 109-pixel NbTiN/Al Hybrid MKID for 100-GHz band continuum observations (村山洋佑)
- ALICE 実験の現状と Focal アップグレード計画(中條達也)
- RIBF における宇宙元素合成(西村俊二)
- HL-LHC ATLAS 実験の内部飛跡検出器に用いる半導体検出器(中村浩二)









図 9 2019 年度第 1 回構成員会議 (2019 年 6 月 3 日)

5.1.2 2019 年度第 2 回構成員会議

日時 2019年11月21日(月)9:30-17:00

場所 自然 B114

出席者 金谷、受川、久野、武内、江角、原、ほか(計27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. 2019 年度前期全体活動概要(金谷)
- 4. 2019 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

- 人事異動報告と合わせて、卓越研究員の採用手続きが進行中である旨、報告された。
- 2019 年度の卓越大学院への申請(「138 億年の進化・相転移に学ぶ、ダ・ヴィンチ型人材育成プログラム」コーディネータ:重田育照教授 (CCS, 生命物理))が学振で不採択となったこと、2020 年度に改めて申請する為に作業が進められていることが報告された。
- 2019年5月11日に、金信弘特命教授が成和記念財団「金萬有学術賞」を、2019年6月15日に、

CDF グループが、ヨーロッパ物理学会 2019HEP 賞を受賞したことが報告された。

- 受川副センター長よりセンター予算について報告され、承認された。
- 6. 各プロジェクト成果報告(10 講演)
 - Galactic winds driven by star formation in the local Universe (Dragan Salak)
 - FUGIN でみる銀河系における分子雲分布(齋藤弘雄)」
 - Galaxy Formation and AGN Feedback (Alex Wagner)
 - SOFIST, an SOI based pixel sensor for the ILC (原 和彦)
 - SOI-MOSFET での特殊環境下動作への挑戦(倉知郁生)
 - テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用(藏増嘉伸)
 - RIBF における重イオン蓄積リング(山口由高)
 - COBAND 実験 最近の進展: IBS/CUP での Hf-STJ 測定, 他(武内勇司)
 - ATLAS 実験の最近の物理結果から(佐藤構二)
 - 非可換空間上の Diffeomorphism とその近似的不変量 (伊敷吾郎)









図 10 2019 年度第 2 回構成員会議 (2019 年 11 月 21 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。

2019 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特別教授と自然科学研究機構国立天文台の小林秀行教授に委員を務めていただいた。「セン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 2019 年度第1回運営協議会

日時 2020年3月24日12:30-16:00 (非公開)

場所 筑波大学 総合研究棟 B204

- 1. 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

2019 年度の運営協議会を 2020 年 3 月 24 日に開催し、総合研究棟 B204 で運営協議会メンバーによる審議

表 2 2019 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・組織名	氏	名	域	職	名
第7条第1項第1号	センター長	金谷和	至	物理学	教	授
第7条第1項第2号	副センター長	受川史	己彦	物理学	教	授
第7条第1項第3号	 南極天文学研究部門 	久 野 成	支夫	物理学	教	授
第7条第1項第3号	素粒子構造研究部門	武内勇	司	物理学	准教	效授
第7条第1項第3号	クォーク・核物質研究部門	江 角 晋	7 —	物理学	准教	效授
第7条第1項第3号	光量子計測開発部門	原 和	彦	物理学	准教	效授
第7条第1項第4号	数理物質系長	齊 藤 -	- 弥	化学	教	授
第7条第1項第5号	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1項第5号	自然科学研究機構国立天文台	小林秀	· 行		教	授
第7条第1項第6号	計算科学研究センター	梅村雅	走之	物理学	教	授
第7条第1項第6号	筑波大学システム情報系教授 人工知能科学センター長	櫻井翁	- 也		教	授
第7条第1項第6号	クォーク・核物質研究部門	小 沢	顕	物理学	教	授

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、 外部委員から R2 への昇格に向けて、いくつかの提言がなされた。

新型コロナウイルス流行の状況を鑑み、例年行っている公開での活動実績報告および懇親会は中止となった。また、運営協議会に合わせて行われる予定であった TCHoU ワークショップも中止となった。

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。2019 年度の運営委員会委員名簿を表 3 に示す。センター長の指名より、2019 年度から小沢教授が運営委員に加わった。

運営室会議は、月に1回のペースで、毎回2時間程度開催された。 2019年度の開催実績は、以下のとおり:

2019 年度 4/8, 5/13, 6/10, 7/8, 9/9, 10/15, 11/11, 12/9, 1/14, 2/10, 3/9

表 3 2019 年度 宇宙史研究センター運営委員会委員

選出根拠	役職名・組織名	氏 名	域	職名
第9条第1項第1号	センター長	金谷和至	物理学	教 授
第9条第1項第2号	副センター長	受川史彦	物理学	教 授
第9条第1項第3号	南極天文学研究部門長	久野成夫	物理学	教 授
第9条第1項第3号	素粒子構造研究部門長	武内勇司	物理学	准教授
第9条第1項第3号	クォーク・核物質研究部門長	江 角 晋 一	物理学	准教授
第9条第1項第3号	光量子計測開発部門長	原 和彦	物理学	准教授
第9条第1項第4号	クォーク・核物質研究部門	小 沢 顕	物理学	教 授

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 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019)

日時 2019年6月24日(月)~26日(水)

場所 筑波大学 東京キャンパス

参加者 89 名





図 11 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (2019 年 6 月 24-26 日)

超高温・高密度下におけるクォーク物質の物性を理論的・現象論的に探求する国際会議 XQCD 2019 を筑波大学で開催した。

6.2 チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」

日時 2019年8月19日(月)~21日(水)

場所 理化学研究所 (和光地区)・大河内記念ホール

参加者 81 名

本チュートリアル研究会では、主に重イオン衝突実験になじみの薄い学生・研究者を念頭に、この実験の基礎的概念を学び全体像を把握する場とすることを目指した。特に、「よく見かけるあのグラフの縦軸・横軸はどういう物理量なのか」「その量を測定することで何が分かるのか」といった基本的な疑問から出発する講演が企画された。またそれと同時に、分野の動向を整理・議論する場を設けることで多くの研究者が現状を共有し今後の研究につなげる機会が作られた。

ハドロン・QCD 物理分野のみならず、様々な分野の学生・研究者が参加し、計 25 名の講師(筑波大からの、江角、中條、新井田、坂井、野中 OB を含む)が、3日間に渡って、高エネルギー重イオン衝突の物理に



図 12 チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」(2019 年 8 月 19-21 日)

関して、概観・基礎から、応用・最先端に渡るチュートリアル講義を行った。

本チュートリアル研究会は、高温・高密度 QCD 物質オープンフォーラムによって運営され、筑波大学宇宙 史研究センターからも旅費の補助を行った。

6.3 研究会「テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像」

日時 2020年1月8日(水) 10:00-17:00

場所 国立極地研究所

参加者 28 名

南極天文学研究部門の主催により、標記ワークショップを極地研究所で開催した。南極テラヘルツ望遠鏡の 実現に向け、地上大型望遠鏡が唯一手を出せていない波長領域であるテラヘルツ帯を利用して、どのような新 しいサイエンスを展開できるか議論された。

本研究会は、国立極地研究所から旅費の補助を受けて国立極地研究所研究集会として開催された。

6.4 第4回「3次元積層半導体量子イメージセンサ」研究会

日時 2020年1月27日(月)

場所 つくば国際会議場

参加者 58名

筑波大学、KEK、産総研、東大による「TIA かけはし"3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究"」グループ(グループリーダーはセンター連携教員でもある KEK 倉知教授)の主催で、つくば国際会議場において、第4回「3次元積層半導体量子イメージセンサ研究会」が開催された。最新の半導体積層技術に関して3件の招待講演と3件の一般講演が企画され、本センターからは光量子部門の原准教授が最新の研究成果を発表した。当日は企業からの参加者を多く集め、研究会後には会場近くで情報交換の場として懇親会がもたれた。

6.5 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





図 13 第4回「3次元積層半導体量子イメージセンサ」研究会(2020年1月27日)

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。

第1回

日時 2019年5月31日(金) 13:45-15:00

場所 自然系学系棟 B118

講演 吉岡瑞樹 氏(九州大学 先端素粒子物理研究センター)

"J-PARC における低エネルギー中性子を用いた基礎物理実験"

概要:低エネルギー中性子を用いた精密測定実験は、エネルギーフロンティア加速器を用いたコライダー実験と相補的な情報を与え、時にコライダー実験が及ばない高エネルギー領域における新しい物理に対しても感度を持つ。低エネルギー中性子の光学的制御が近年飛躍的に発展しており、大強度の高品質中性子ビームを実験装置まで供給することが可能になった。茨城県東海村の大強度陽子加速器施設J-PARC の物質生命科学実験施設 MLF に、低エネルギー中性子を用いた基礎物理研究を目的としたビームライン BL05 が建設され、2008 年末に成功裏にファーストビームを受け入れた。本講演では主に J-PARC/MLF/BL05 にて展開されている低エネルギー中性子を用いた基礎物理実験について紹介する。

参加者 15名

第2回

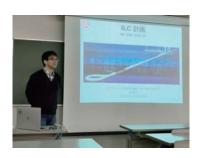
日時 2019年11月8日(金)13:45-15:00

場所 自然系学系棟 B118

講演 藤井恵介 氏 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所)

"ILC 計画の物理、加速器、測定器、現状"

参加者 14名





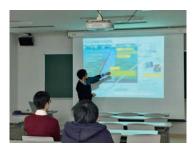


図 14 第 2 回 宇宙史セミナー (2019年 11月8日)

第3回

日時 2019年11月29日(金)13:45-15:00

場所 自然系学系棟 B114

講演 小汐由介 氏 (岡山大学大学院自然科学研究科)

"Supernova neutrino measurement in Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande"

概要:素粒子ニュートリノは 1930 年にパウリにより存在仮説が提唱されて以来、その理解は大きく深まった。しかし現在でもその性質は完全には解明されておらず、理論・実験両面で様々な研究が進められている。さらにニュートリノの極めて高い透過性を用いた宇宙や地球の研究も盛んに行われている。集中講義で、始めにニュートリノ研究の歴史を紐解き、現時点で明らかになっている性質について解説し、続いて現在の素粒子物理および宇宙物理的観点からの研究課題について講義する。本セミナーでは、超新星ニュートリノについて述べる。

参加者 21名





図 15 第 3 回 宇宙史セミナー (2019年 11月 29日)

第4回

日時 2019年12月13日(金)13:45-15:15

場所 自然系学系棟 B118

講演 Prof. Nicolo Cartiglia (INFN, Italy)

"Tracking particles in space and time"

概要: The possibility of tracking particles in space and time has attracted a lot of attention in the last few years: it is now part of the CMS and ATLAS upgrades for HL-LHC and it is considered the baseline tracking system at FCC and at the next muon collider. In this talk, Professor Nicolo Cartiglia will review the progress towards the development of silicon sensors able to track particles

in 4D with a precision of $10 \mu m$ and 10 ps. He will show why thin silicon sensors with moderate internal gain are a very promising technology to achieve this goal, and how we can make this technology radiation-tolerant so that sensors can work after being exposed to fluences well above 10^{15} n/cm^2 .

参加者 13名



図 16 第 4 回 宇宙史セミナー (2019 年 12 月 13 日)

第5回

日時 2019年12月19日(木)11:30-

場所 第1エリア 1F201

講演 横山 広樹 氏 (Nikhef National institute for subatomic physics)

"High granularity digital calorimeter with MAPS sensor"

参加者 20名

第6回

日時 2020年1月8日(水) 16:45-

場所 第1エリア 1F201

講演 Dr. Ashutosh Kumar Pandey (TCHoU)

"Probing the Quark Gluon Plasma with energetic parton"

講演 Thomas Peitzmann (Utrecht Univ. / Nikhef, Univ. of Tsukuba)

"Non-identical particle femtoscopy in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV with ALICE detector at the LHC"

概要: Femtoscopic correlations between charged pions and kaons for different charge combinations are measured in Pb–Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}}=2.76$ TeV with ALICE at the LHC. The three-dimensional pion-kaon (π –K) correlation functions and double ratios in the out-side-long pair rest frame are studied in different centrality bins. The π –K femtoscopic source size parameter (R_out) and emission asymmetry (μ out) are extracted. It is observed that the average source size of the system and the emission asymmetry between pions and kaons increase from peripheral to central events.

参加者 20名

第7回

日時 2020年1月10日(金) 13:45-

場所 自然系学系棟 B 棟 B118

講演 Prof. Soo-Bong Kim (SNU/TCHoU)

"Detection of coherent reactor neutrino scattering and search for sterile neutrino"

概要:Low-energy reactor neutrinos below 1/8 MeV are not measured yet because of the inverse beta decay reaction threshold. A recent observation of the coherent elastic neutrino-nucleon scattering (CEvNS) at ORNL sheds light on detecting the unobserved low-energy reactor antineutrinos using an improved dark-matter detection technology. However, it is extremely difficult to measure tiny nuclear recoil energy of tens of keV or less. We introduce a noble bolometric detector, named as LOCOND, consisting of a ~ 20 kg CsI(Na) or PPC HPGe crystals with cryogenic sensors as photon and phonon detectors in coincidence. Successful detection of reactor antineutrinos via CEvNS would open a new field of detecting extremely low-energy neutrinos in the unexplored energy region, and bring breakthrough to dark-matter detection. It will also make significant academic impact on efficient searches for neutrino magnetic moment and sterile neutrino. In the second part of this talk, I will present the status of JSNS2 experiment under the final phase of construction. The experiment utilizes an antineutrino beam from muon decay-at-rest using the 1 MW spallation neutron source at J-PARC MLF to explore sterile neutrino oscillations with 17 ton gadolinium-loaded liquid scintillator.

参加者 15 名



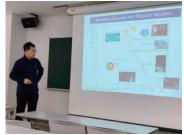


図 17 第6回 宇宙史セミナー (2020年1月10日)

第8回

日時 2020年1月20日(月)10:00-11:00

場所 第1エリア 1F201

講演 Prof. Nu Xu (Lawrence Berkeley National Laboratory)

"BES2 physics and future"

概要:2020 年 1 月 20-21 日に筑波大学(第 1 エリア 1F201 室)において STAR 実験の物理解析会議を行いますが、それに先立って、来日中の NuXu 氏に、宇宙史セミナーとして、BNL-RHIC における第 2 期ビームエネルギー走査実験とさらにその将来展望に関する講演をして頂きました。

参加者 15 名





図 18 第7回 宇宙史セミナー (2020年1月20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 31 年度 (第 60 回) 科学技術週間

日時 2019年4月20日(土) 10:00-16:00

場所 総合研究棟 B 棟 1 階

参来場者数 延 135 名、(内 青少年 65 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。

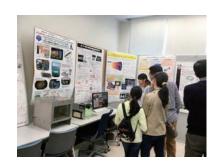






図 19 平成 31 年度 (第 60 回) 科学技術週間(2019 年 4 月 20 日)

7.2 第11回天文宇宙の七夕講演会

日時 2019年7月6日13:30-16:30

場所 つくば国際会議場

プログラム

「我々はどこからきたのか? 銀河への誘い」高水裕一(筑波大学) 「天の川で野良ブラックホールを探す」岡 朋治(慶応義塾大学)

参来場者数 80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 2019年11月3日~4日10:00-16:00

場所 第3エリア 3A207

参来場者数 11/3: 306 名、11/4: 471 名、 合計 777 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、宇宙史研究センターの研究活動紹介(ブース展示)を行った。





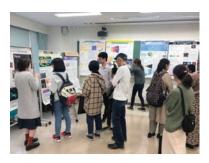


図 20 筑波大学学園祭「雙峰祭」企画展示「宇宙の歴史の暗黒部分を解明する」 (2019 年 11 月 3 日-4 日)

8 2019 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 2019 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 400 万円が配分された。この他に、2018 年度からの繰越し金や科学技術週間参加補助などが収入となる。

支出は、主に海外研究ユニット招致、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、センターの整備などにあてた。支出の詳細は、表 4-6 を参照。機能強化経費の収入と支出の差額は 2020 年度への繰越金とした。

表 4 2019 年度予算執行報告 - 機能強化経費分 -

ー機能強化経費・プロジェクトー

	及16五16		
収	入	支出	
項目	金額	項目	金額
		【人件費】クロスアポイント	
運営費交付金	24,800,000	メント教員 佐甲、吉田、山	5,482,827
		口、徂徠、小沢、池上、中井	
44.社会	10.005.500	【旅費】クロスアポイントメ	1 440 740
繰越金	10,865,528	ント教員	1,449,740
		【人件費】研究員 齋藤、	12 402 006
		高水、SALAK、PANDEY	12,403,996
		消耗品・短期雇用・その他	929,306
		部門活動費	
		南極天文学研究部門	697,422
		素粒子構造研究部門	251,618
		クォーク・核物質研究部門	535,252
		光量子計測機器開発部門	674,882
合計	35,665,528	合計	22,425,043

一機能強化経費・組織整備一

収	入	支出	
項目	金額	項目	金額
運営費交付金	10,000,000	【人件費】海外研究ユニット	3,645,265
建占其文的金	10,000,000	招致PI Kim Soo-Bong	3,045,205
		【旅費】海外研究ユニット招	367,318
		致PI Kim Soo-Bong	307,318
		【人件費】事務補佐員	2,138,978
		【人件費】金特命教授	532,684
		消耗品	132,260
		運営協議会(旅費、謝金)	50,169
		報告書(印刷費、郵送費)	312,390
合計	10,000,000	合計	7,179,064

表 5 2019 年度予算執行報告 – 戦略イニシアティブ分 –

収入		支出	
項目	金額	項目	金額
運営費交付金	4,000,000	【旅費(海外)】 韓国CUP: 金、武内、浅野	385,128
		【旅費(海外)】XQCD他	47,830
		【旅費(国内)】クォーク核 物質 理研チュートリアル研 究会	100,000
		【旅費(国内)】XQCD 他	60,670
		【旅費(国内)】クロスアポ イントメント	81,090
		【人件費】事務補佐員(一部)	549,530
		【人件費】クロスアポイント メントの一部佐甲、吉田、山	1,172,658
		XQCD 会議 パネル代	116,640
		人文棟 スペースチャージ	81,600
		電話代	7,758
		消耗品(インクタンク)	21,112
合計	4,000,000	合計	2,624,016

表 6 2019 年度予算執行報告 - 科学技術週間予算分 -

収	入	支出	
項目	金額(円)	項目	金額(円)
	95,000	短期雇用	30,774
		消耗品(ネオジウム磁石、プリンター光沢紙、コート紙)	64,226
合計	95,000	合計	95,000

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)

橋本 拓也(数理物質系物理学域助教)

中井 直正 (関西学院大学理工学部 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

渡邉 祥正 (日本大学 助教)

研究員

高水 裕一(計算科学研究センター)

齋藤 弘雄

Salak Dragan

宇宙観測グループでは、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)などの電波望遠鏡と、すばる、VLT などの光赤外望遠鏡を駆使して、遠方銀河、近傍銀河、銀河系、星形成領域などの観測的研究を進めている。また、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。

クロスアポイントメント教員の徂徠准教授は、南極 30cm 望遠鏡での On-The-Fly 法による観測を実現するために、デジタル分光計のソフトウェアの改修に取り組んだ。また、30cm 望遠鏡用のデータ解析ソフトの開発を開始した。中井教授は、活動銀河核などについて南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討を進めた。また、新ドームふじ基地での将来計画に向けて国立極地研究所との連携の強化を進めた。

2019 年 4 月 1 日から研究員として齋藤弘雄さんが、10 月 1 日から SALAK Dragan さんが加わった。また、卓越研究員として 12 月 1 日から橋本拓也助教が採用された。

(1) 野辺山45m電波望遠鏡による銀河・銀河系の研究

CO 銀河面サーベイ FUGIN プロジェクト

野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡による CO 銀河面サーベイのデータを用いて、銀河系における C¹⁸O で観測される 10^4 cm⁻³ を超えるような高密度ガスの割合を測定し、銀河系の構造との関係を調べた。その結果、高密度ガスの割合は、渦状腕で高く棒状構造や腕間で低くなっており、その割合は高いところでも数%であることが明らかとなった。銀河系における星形成効率が数%程度しかないことは

大きな謎であるが、星形成の材料となる高密度ガスの割合の低さが星形成効率を下げていることが示唆された。(図 21)

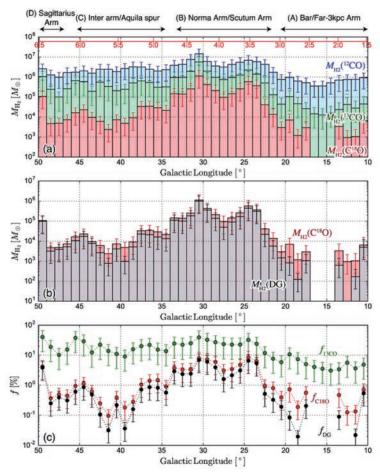


図 21 (a)CO 各輝線から求めた分子ガス質量、(b) $\mathrm{C}^{18}\mathrm{O}$ から求めた質量と高密度ガスの質量、(c) $^{12}\mathrm{CO}$ から求めた質量との比。(論文 19)

近傍渦巻銀河における分子ガスのフーリエ解析

近傍渦巻銀河における分子ガスの分布や運動を調べるために野辺山宇宙電波観測所の CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING) レガシープロジェクトを実施した。COMING プロジェクトでは、45m 電波望遠鏡を用いて近傍銀河の CO(J=1-0) 輝線のマッピング観測を行った。その成果の一つとして、観測で得られた 20 銀河の CO ガスの速度場(図 22)をフーリエ解析し、分子ガスの円運動と非円運動の速度成分を求めた。加えて、棒渦巻銀河の進化に重要である棒構造のパターン速度について新たな測定方法を考案した。図 22に示すように 7 天体で測定した棒構造のパターン速度は、棒構造の半径が大きければ大きいほど遅くなることがわかった。

(2) ALMA、すばる、VLT 等を用いた遠方銀河の観測研究

128 億光年彼方にあるクェーサーからの電離酸素輝線の検出

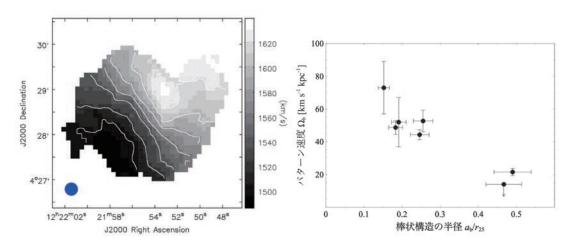


図 22 (左) 近傍銀河 NGC 4303 の CO ガスの速度場の例。(右) 棒渦巻銀河のパターン速度と半径関係。(論文 14)

クェーサーは全波長で極めて高光度で輝く天体であり、そのエネルギー源は中心にある超巨大ブラックホールだと考えられている。我々は ALMA を用いて赤方偏移 z=6 にある極めて明るいクェーサー2個から [OIII] 88 μ m 輝線の検出に成功した。遠方クェーサーでこの輝線を検出したのは本研究が2例目である。過去に別グループが取得した [CII] 158 μ m 輝線の観測を組み合わせることで、クェーサーは光度比 [OIII]/[CII] \sim 0.5-2 を持つことが分かった。これは当時に存在した普通の星形成銀河に比べて低い。現在はこの原因を理論研究者の協力を得つつ明らかにしようとしている。

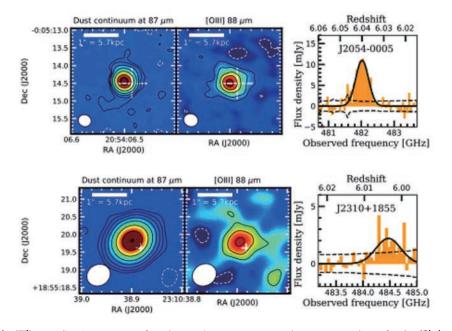


図 23 上 (下) のパネルは z = 6 にあるクェーサー J2054-0005 (J2310+1855) のデータ (論文 4)。 遠 方クェーサーからは 2 例目となる酸素輝線の検出に成功した。

最遠の老けた銀河候補の発見と宇宙初期の星形成率密度への知見

成熟した銀河を観測することは、その銀河の過去を遡ることで宇宙初期の銀河進化史への知見が得られるため重要である。我々は COSMOS 天域の一部分 (0.24 平方度) にある ALMA、すばる等を含む多

波長データの解析を行い、赤方偏移 z ~ 6 にある成熟した銀河 (バルマーブレイク銀河) の候補を 3 個発見した。これはバルマーブレイク銀河候補としては最遠である。3 個の過去の星形成を遡ることで、z > 14 (宇宙年齢 3 億年未満) の星形成率密度は 2.4-12 x 10^{-5} $\rm M_o~yr^{-1}~Mpc^{-3}$ (99.7 パーセンタイル) だと分かった。星形成率密度は z = 8 から 14 にかけて滑らかに減少していくことが明らかになった。

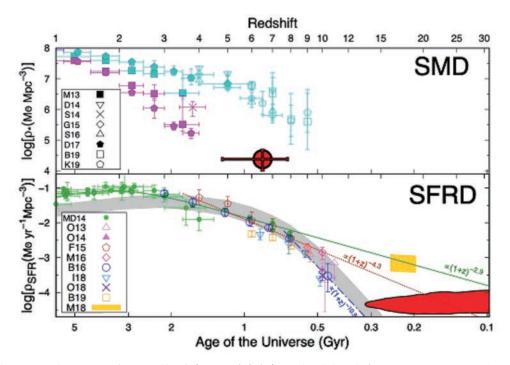


図 24 上 (下) パネルは宇宙の星質量密度 (星形成率密度) の時間進化。本成果によるデータ点は赤色で示され、赤方偏移 14 以上の星形成率密度へ知見を得た (論文 9)

(3) 野辺山 45m 鏡用超伝導電波カメラの開発

野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載する 100-GHz 帯 MKID カメラの開発を進めている。今年度は、MKID カメラの高感度化を目的に(1)焦点面 109 素子 MKID アレイのハイブリッド化、(2)冷却光学系の透過率向上に関する開発を進めた。焦点面アレイのハイブリッド化については、コプレーナ線路のグラウンド面を膜厚 200 nm の窒化ニオブチタン(NbTiN)に、共振器部分を膜厚 50 nm のアルミニウム (Al) にした Al-NbTiN ハイブリッド MKID を製作した。109 素子は 3 インチ Si ウェハ全面に配置されているが、製作条件を工夫することにより 109 素子中 104 素子で光学応答を確認した。また、フーリエ分光器を用いた受信帯域の測定、常温と液体窒素温度(77 K)の黒体源を用いたナイフエッジ法によるビームパターン測定も行い、それぞれ設計値と概ね一致する結果を得ることができた。冷却光学系の改良については、光学素子(真空窓と冷却シリコンレンズ)の反射防止対策を行った。光学素子の表面に周期 1 mm 前後の反射防止用サブ波長構造を製作することで、80-110 GHz における透過率が向上したことを確認した。これらの改良により、カメラの光学効率は約 7 倍となり良好な結果を得ることができた。これらの開発に加えて、望遠鏡搭載時に使用する多素子同時読み出しシステムを用いた感度評価も進めた。

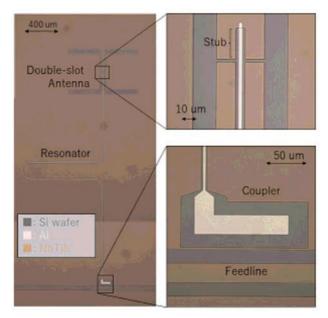


図 25 製作した Al-NbTiN ハイブリッド MKID の顕微鏡写真

(4) 南極天文学の推進

南極 10m 望遠鏡の実現へ向け、鏡面測定法(点格子干渉計とファイズ・リトリーバル・ホログラフィー法)の検討、霜対策のためのアンテナの加熱に要する消費電力の評価等を進めた。10m 望遠鏡に先立ち、南極での経験と実績を積むため、すでに南米チリでのサブミリ波観測の実績もある 30cm 望遠鏡を南極に移設し、 $\mathrm{CI}(J=1\text{-}0)$ と $\mathrm{CO}(J=4\text{-}3)$ 輝線による銀河面サーベイを計画している。イタリア・フランスの運用するコンコルディア基地での運用を目指し、イタリア研究者との共同研究を開始した。また、南極では日中の光学ポインティングが必要となるため、ポインティングシステムの改修を開始した。 $\mathrm{CI}(J=1\text{-}0)$ と $\mathrm{CO}(J=4\text{-}3)$ 輝線の同時観測を実現するための受信機の広帯域化についても進行中である。

(5) 大学連携 VLBI

大学 VLBI 連携に参加したが、鹿島宇宙技術センターの 34m アンテナが台風の被害により駆動できなくなってしまったため、予定していた性能測定や観測への参加ができなくなってしまった。

〈査読付き論文〉

- 1. Coude, S. et al (100th Saito, H.) "The JCMT BISTRO Survey: The Magnetic Field of the Bernard 1 Star-froming Region", ApJ, vol. 877 p. 88 (2019)
- 2. Tamaki Fujinawa, Tomohiro O. Sato, Takayoshi Yamada, Seidai Nara, Yuki Uchiyama, Kodai Takahashi, Naohiro Yoshida, and Yasuko Kasai.: "Validation of acetonitrile (CH3CN) measurements in the stratosphere and lower mesosphere from the SMILES instrument on the International Space Station" Atmospheric Measurement Techniques,
- 3. Hasebe, T., Hayashi, T., Takakura, H., Sekimoto, Y., Ishikawa, K., Shohmitsu, Y., Noda, K., Saeki, S., Ezoe, Y., Nitta, T., "Development of Multi-Layer Anti-Reflection Structures for Millimeter-Wave Silicon Optics Using Deep Reactive Ion Etching Process", Journal of Low Temperature Physics, Volume 199, pp.339347(2020)
- 4. Hashimoto, T., Inoue, A. K., Tamura, Y., Matsuo, H., Mawatari, K., and Yamaguchi, Y., "Detections of [OIII] 88 μ m in Two Quasars in the Reionization Epoch", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 6, id. 109 (2019)

- Jiao, Q., Zhao, Y., Lu, N., Gao, Y., Salak, D., Zhu, M., Zhang, Z., Jiang, X., & Tan, Q. "Resolved Neutral Carbon Emission in Nearby Galaxies: [CI] Lines as Total Molecular Gas Tracers", The Astrophysical Journal, 880, 133 (2019)
- 6. Koda, Jin; Sawada, Tsuyoshi; Sakamoto, Kazushi; Hirota, Akihiko; Egusa, Fumi; Boissier, Samuel; Calzetti, Daniela; Meyer, Jennifer Donovan; Elmegreen, Bruce G.; de Paz, Armando Gil; Harada, Nanase; Ho, Luis C.; Kobayashi, Masato I. N.; Kuno, Nario; Martn, Sergio; Muraoka, Kazuyuki; Nakanishi, Kouichiro; Scoville, Nick; Seibert, Mark; Vlahakis, Catherine Watanabe, Yoshimasa, "Systematic Variations of CO J = 2-1/1-0 Ratio and Their Implications in The Nearby Barred Spiral Galaxy M83", The Astrophysical Journal Letters, Volume 890, Issue 1, id.L10 (2019)
- 7. Leclercq, F., Bacon, R., Verhamme, A., Garel, T., Blaizot, J., et al. (Hashimoto, T. 11 番目), "The MUSE Hubble Ultra Deep Field Survery. XIII. Spatially resolved spectral properties of Lyman- α haloes around star-forming galaxies at z>3", Astronomy & Astrophysics, Volume 635, id.A82, 20 pp (2020)
- 8. Lui, J. et al (117th Saito, H.) "The JCMT BISTRO Survey: The Magnetic Field in the starless Core ρ Ophiuchus C", ApJ, vol. 877, p.43 (2019)
- 9. Mawatari, K., Inoue, A., Hashimoto, T., Silverman, J., Kajisawa, M., et al. "Balmer Break Galaxy Candidates at $z \sim 6$: A Potential View on the Star Formation Activity at z > 14", The Astrophysical Journal, Volume 889, Issue 2, id. 137 (2019)
- 10. Muraoka, K., Sorai, K., Miyamoto, Y., Yoda, M., Morokuma-Matsui, K., Kobayashi, M. I. N., Kuroda, M., Kaneko, H., Kuno, N., Takeuchi, T. T., Nakanishi, H., Watanabe, Y., Tanaka, T., Yasuda, A., Yajima, Y., Shibata, S., Salak, D., Espada, D., Matsumoto, N., Noma, Y., Kita, S., Komatsuzaki, R., Kajikawa, A., Yashima, Y., Pan, H.-A., Oi, N., Seta, M., Nakai, N, "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING): VI. Radial variations in star formation efficiency", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.71, No.SP1, pp.S15:1-18 (2019)
- 11. Murase, T.; Handa, T.; Maebata, M.; Yang, Z.; Hirata, Y.; Ishizaki, K.; Sunada, K.; Nakano, M.; Omodaka, T.; Shihara, S.; Wada, K.; Umemoto, T.; Matsuo, M.; Minamidani, T.; Torii, K.; Kuno, N.; Fujita, S.; Kohno, M.; Kuriki, M.; Nishimura, A. Tsuda, Y., ""KAGONMA" NH3 mapping observations of molecular clouds with Nobeyama 45m telescope", Origins: From the Protosun to the First Steps of Life. Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 345, pp. 353-354 (2020)
- 12. Nagai, M., Murayama, Y., Nitta, T., Kiuchi, H., Sekimoto, Y., Matsuo, H., Shan, W., Naruse, M., Noguchi, T., "Resonance Spectra of Coplanar Waveguide MKIDs Obtained Using Frequency Sweeping Scheme", Journal of Low Temperature Physics, Volume 199, pp.250257 (2020)
- 13. Nagoshi, H., Kubose, Y., Fujisawa, K., Sorai, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Niinuma, K., Motogi, K., Aoki, T., "The Galactic Center Lobe Filled with Thermal Plasma", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.71, No.4, pp.80:1-11 (2019)
- 14. Salak, D., Noma, Y., Sorai, K., Miyamoto, Y., Kuno, N., Pettitt, A. R., Kaneko, H., Tanaka, T., Yasuda, A., Kita, S., Yajima, Y., Shibata, S., Nakai, N., Seta, M., Muraoka, K., Kuroda, M., Nakanishi, H., Takeuchi, T. T., Yoda, M., Morokuma-Matsui, K., Watanabe, Y., Matsumoto, N., Oi, N., Pan, H.-A., Kajikawa, A., Yashima, Y., Komatsuzaki, Ryusei, "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). VII. Fourier decomposition of molecular gas velocity fields and bar pattern speed", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.71, No.SP1, pp.S16:1-26 (2019)
- Salak, D., Nakai, N., Seta, M., & Miyamoto, Y. "ALMA Observations of Atomic Carbon [CI] (3P1-3P0) and Low-J CO Lines in the Starburst Galaxy NGC 1808", The Astrophysical Journal, 887, 143 (2019)
- 16. Sofue, Yoshiaki; Kohno, Mikito; Torii, Kazufumi; Umemoto, Tomofumi; Kuno, Nario; Tachihara, Kengo; Minamidani, Tetsuhiro; Fujita, Shinji; Matsuo, Mitsuhiro; Nishimura, Atsushi; Tsuda, Yuya; Seta, Masumichi, "FOREST Unbiased Galactic Plane Imaging Survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). IV. Galactic shock wave and molecular bow shock in the 4 kpc arm of the Galaxy", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue Supplement, 1, id, S1 (2019)
- 17. Sorai, K., Kuno, N., Muraoka, K., Miyamoto, Y., Kaneko, H., Nakanishi, H., Nakai, N., Yanagitani, K., Tanaka, T., Sato, Y., Salak, D., Umei, M., Morokuma-Matsui, K., Matsumoto, N., Ueno, S., Pan, H.-A., Noma, Y., Takeuchi, T.T., Yoda, M., Kuroda, M., Yasuda, A., Yajima, Y., Oi, N., Shibata, S., Seta, M., Watanabe, Y., Kita, S., Komatsuzaki, R., Kajikawa, A., Yashima, Y., Cooray, S., Baji, H., Segawa, Y., Tashiro, T., Takeda, M., Kishida, N., Hatakeyama, T., Tomiyasu, Y. Saita, C., "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING) IV. Overview of the Project", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.71, No.SP1, pp.S14:1-42 (2019)
- 18. Taniguchi, Akio; Tamura, Yoichi; Kohno, Kotaro; Takahashi, Shigeru; Horigome, Osamu; Maekawa, Jun; Sakai, Takeshi; Kuno, Nario; Minamidani, Tetsuhiro, "A new off-point-less observing method for millimeter and submillimeter spectroscopy with a frequency-modulating local oscillator", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 72, Issue 1, id.2 (2019)
- 19. Torii, Kazufumi; Fujita, Shinji; Nishimura, Atsushi; Tokuda, Kazuki; Kohno, Mikito; Tachihara, Kengo; Inutsuka,

- Shu-ichiro; Matsuo, Mitsuhiro; Kuriki, Mika; Tsuda, Yuya; Minamidani, Tetsuhiro; Umemoto, Tomofumi; Kuno, Nario; Miyamoto, Yusuke, "FOREST Unbiased Galactic Plane Imaging Survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). V. Dense gas mass fraction of molecular gas in the Galactic plane", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue Supplement, 1, id, S2 (2019)
- 20. Wang, J. et al (113th Saito, H.) "The JCMT BISTRO Survey: Magnetic Fields within the Hub-filament Structure in IC 5146", ApJ, vol. 876 p. 42 (2019)
- Watanabe, Y., Nishimura, Y., Sorai, K., Sakai, N., Kuno, N., Yamamoto, S., "A 3 mm Spectral Line Survey toward the Barred Spiral Galaxy NGC 3627", The Astrophysical Journal Supplement Series, Vol.242, No.2, pp.26:1-21 (2019)
- 22. Yajima, Y., Sorai, K., Kuno, N., Muraoka, K., Miyamoto, Y., Kaneko, H., Nakanishi, H., Nakai, N., Tanaka, T., Sato, Y., Salak, D., Morokuma-Matsui, K., Matsumoto, N., Pan, H.-A., Noma, Y., Takeuchi, T. T., Yoda, M., Kuroda, M., Yasuda, A., Oi, N., Shibata, S., Seta, M., Watanabe, Y., Kita, S., Komatsuzaki, R., Kajikawa, A., Yashima, Y., "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). III. Dynamical effect on molecular gas density and star formation in the barred spiral galaxy NGC 4303", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.71, No.SP1, pp.S13:1-15 (2019)
- 23. Yamada, T., Sato, T. O., Adachi, T., Winkler, H., Kuribayashi, K., Larsson, R., Yoshida, N., Takahashi, Y., Sato, M., Chen, A. B., Hsu, R. R., Nakano, Y., Fujinawa, T., Nara, S., Uchiyama, Y., and Kasai, Y.: "HO2 Generation Above Sprite-Producing Thunderstorms Derived from Low-Noise SMILES Observation Spectra", Geophysical Research Letters, 47, e60 090, https://doi.org/10.1029/2019GL085529,
- 24. Yuan, Lixia; Zhu, Ming; Liu, Tie; Yuan, Jinghua; Wu, Yuefang; Kim, Kee-Tae; Wang, Ke; Zhou, Chenlin; Tatematsu, Ken'ichi; Kuno, Nario, "Sequential star formation in the filamentary structures of the Planck Galactic cold clump G181.84+0.31", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 487, Issue 1, p.1315-1334 (2019)

〈その他論文〉

Handa, Toshihiro; Maebata, Miru; Murase, Takeru; Fujita, Shinji; Kohno, Mikito; Kuno, Nario; Kuriki, Mika; Matsuo, Mitsuhiro; Minamidani, Tetsuhiro; Nishimura, Atsushi; Torii, Kazufumi; Tsuda, Yuya; Umemoto, Tomofumi, "Difference of the Gas Density Histograms in and out of spiral arms in Milky Way Galaxy", Origins: From the Protosun to the First Steps of Life. Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 345, pp. 322-323 (2020)

〈学位論文〉

[修士論文]

数理物質科学研究科・物理学専攻

- 1. 石田智大:火星大気観測用テラヘルツセンシングシステムのアンテナ光学系設計及び電磁界解析と性能評価
- 2. 今井裕一郎:大質量星形成領域 G23.44-0.18 における星形成プロセスの研究
- 3. 大塚宏樹: FUGIN データを用いた天の川銀河における分子ガス構造の解析
- 4. 小野雄太:超小型テラヘルツセンシングシステムにおける低熱歪みアンテナ光学系構造の評価
- 5. 小松龍聖:近傍銀河における星間ガス相の変化に関する研究
- 6. 鈴木隆司: 多素子同時読み出しシステムを用いた野辺山 45 m 電波望遠鏡用ミリ波帯 109 素子 MKID カメラの性能評価
- 7.樋川遼太朗:Al-NbTiN ハイブリッド MKID を用いた野辺山 45 m 電波望遠鏡用ミリ波帯カメラの光学特性および感度評価
- 8. 深作悠平:ミリ波補償光学における波面センサ用送信機サブシステムの開発
- 9. YANZ ZI: FUGIN データから抽出された C18O 分子雲の性質に関する統計的研究
- 10. 渡邉 祐也:CfA・FUGIN による CO 観測データと銀河系 3 次元理論計算の比較による銀河系内部構造の研究

教育研究科教育専攻理科教育コース

1. 山崎まどか:活動銀河核の水メーザー観測データを用いた巨大質量ブラックホールとメーザー円盤の研究

「学士論文]

- 1. 小山 徹:南極 30cm 望遠鏡光学ポインティング用 CCD の性能評価
- 2. 權代大河:CO 多輝線観測による大質量星形成領域 W49 の分子ガスに関する観測的研究
- 3. 杉浦乾太:大気透過率の観測データを用いた野辺山 45 m 電波望遠鏡用 100 GHz 帯 MKID カメラの性能評価
- 4. 橋純平:天文観測用 100 GHz 帯集中定数型力学インダクタンス検出器アレイの性能評価
- 5. 中西勇太:渦状銀河 M81 における分子ガスと星形成の関係に関する研究
- 6. 宮澤 啓: Al 薄膜を用いたアンテナ結合型 MKID アレイの経年変化に関する研究

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- Sato, K., Miyamoto, Y., Kuno, N., Salak, D., Wagner, A., Seta, M., Nakai, N., "CO multi-line observations toward the central region of barred spiral galaxy NGC 613", East-Asian ALMA Science Workshop 2019, ASIAA (Taipei, Taiwan, February 19-21, 2020)
- 2. Hashimoto, T., "Properties of galaxies at z = 6 9 revealed by ALMA", International Conference and School on Observing The First Billion Years of the Universe using Next Generation Telescopes, (Indore, India, January 20-24, 2020) (Invited)
- 3. Pranshu Mandal, Nario Kuno, Makoto Nagai, Tom Nitta, Yosuke Murayama, "Beam characteristics of Nobeyama 45m 100GHz band MKID camera", Observing the millimeter Universe with the NIKA2 camera, LPSC (Grenoble, France, June 3-7,2019)
- 4. S. Nara, K. A. Walker, T. Yamada, T. Fujinawa, N. Kuno and Y Kasai.: "The Profile of HCl from the Stratosphere to the Lower Thermosphere Observed by Superconducting Submillimeter wave Limb emission Sounder (SMILES)", ID:AS22-A038, Asia Oceania Geoscience Society 2019 16th Annual Meeting (Singapore, Jul-Aug, 2019)
- S.Nara, T. Yamada, K. A. Walker, N. Kuno and Y Kasai.:" Comparison of HCl Profile in the atmosphere between Superconducting Submillimeter wave Limb Emission Sounder (SMILES) and other satellite observation", ID: JM09p-117 IUGG19-4581, 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (Montreal, Canada, Jul, 2019)
- S.Nara, K. A. Walker, T. Yamada, T. Fujinawa, N. Kuno and Y Kasai.: "The Vertical Profile of HCl from Stratosphere to Lower Thermosphere Observed by SMILES", 10th International Limb Workshop (Greifswald, Germany, Jun, 2019)
- 7. Salak, D., et al. "Evolution of Molecular Clouds in the Nearby Superwind Galaxy NGC 1808", Linking the Milky Way and Nearby Galaxies (University of Helsinki, Finland ,June 3-7, 2019)
- 8. Atsushi Yasuda, CO to H2 conversion factors and Dust-to-Gas ratios in the Milky Way and nearby galaxies, Linking the Milky Way and Nearby Galaxies (University of Helsinki, Finland, June ,2019) .
- 9. Kuno, N., "Antarctic 30-cm submm telescope project", 5th Workshop of the SCAR AAA, (2019)

[国内学会・研究会]

- 1. T. Bakx, Y. Tamura, E. Zackrisson, I. Shimizu, T. Hashimoto, et al., "ALMA uncovers the [CII] emission and warm dust continuum in a z = 8.31 LBG" 日本天文学会 2020 年春季年会(2020 年 3 月 16 日,筑波大学)
- 2. 深作悠平, 久野成夫, 田村陽一, 木村公洋, 谷口暁星, 上田哲太朗, 川邉良平, 川口則幸, 南谷哲宏, 大島泰, 岡田望, 小川英夫, 大西利和, 栗田光樹夫, 河野孝太郎, 竹腰達哉, 「ミリ波補償光学の開発 IV. 波面センサ用送信機サブシステムの開発と評価」日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 17 日, 筑波大学)
- 3. 萩本将都, 田村陽一, T. Bakx, 須永夏帆, 谷口暁星, 井上昭雄, 橋本拓也, 馬渡健, 播金優一, 松尾宏「[OIII]88 μ m, [CII]158 μ m, 遠赤外線の光度を用いた赤方偏移 z=8.312 の銀河に対する星間媒質の" porosity" の推定」, 日本天文学会 2020 年春季年会(2020 年 3 月 16 日、筑波大学)
- 4. 樋川遼太朗, 新田冬夢, 永井誠, 村山洋佑, 鈴木隆司, Pranshu Mandal, 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, 「Al-NbTiN ハイブリッド MKID を用いた野辺山 45 m 電波望遠鏡用 100-GHz 帯カメラの光学特性評価」, 日本天文学会 2020 年春季年会(2020 年 3 月 17 日, 筑波大学)
- 5. Inoue, A. K., Mawatari, K., Hashimoto, T., Yamanaka, S., Fujimoto, S., "Detection of a CO emission line counterpart of a z=3.3 damped Ly α system", 本天文学会 2020 年春季年会, (2020 年 3 月 17 日, 筑波大学)
- 6. 梶川明祐実, 徂徕和夫, 諸隈佳菜, 竹内努, 矢島義之, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 金子紘之, Salak, D., 田中隆広, 保田敦司, 大森清顕, Cooray, S., 北條妙, 施文, 「NRO レガシープロジェクト COMING (28): 空間分解した星質量星形成率関係から見る銀河内部での星形成活動と分子ガスの割合」, 日本天文学会 2020 年春季年 (2020 年 3 月 18 日, 筑波大学)
- 7. 小松崎龍聖, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 中西勇太, 宮本祐介, 徂徠和夫, 他 COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING(29):近傍銀河における星間ガス中の分子ガス率の動径分布」, 日本天文学会 2020 年春季年 (2020 年 3 月 16 日-19 日, 筑波大学)
- 8. 河野樹人, 立原研悟, 藤田真司, 佐野栄俊, 花岡美咲, 大浜晶生, 福井康雄, 鳥居和史, 梅本智文, 松尾光洋, 久野成夫, 栗木美香, 徳田一起, 切通僚介, 西村淳, 大西利和, 津田裕也, 南谷哲宏, 長谷川哲夫, 祖父江義明, 羽部朝男, 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大質量星形成シナリオ III」日本天文学会2020 年春季年会(2020 年 3 月 18 日, 筑波大学)
- 9. 大塚宏樹, 久野成夫, 斎藤弘雄, 梅本智文, 長谷川哲夫, 濤崎智佳, 河野樹人, FUGIN チーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN):BDI を用いた天の川銀河における分子ガス構造の解析」日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 17 日, 筑 波大学)
- 10. 柴田和樹, 渡邉祥正, 久野成夫, 徂徠和夫, 「統計平衡計算による NGC 3627 の bar-end における星形成活動性の起源の探求」, 日本天文学会 2020 年春季年(2020 年 3 月 18 日, 筑波大学)
- 11. 鈴木隆司, 永井誠, 新田冬夢, 村山洋佑, 樋川遼太朗, Pranshu Mandal, 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, 「野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの多素子同時読み出しシステムを用いた感度評価」, 日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 17 日, 筑波大学)

- 12. 田村陽一, 木村公洋, 谷口暁星, 上田哲太朗, 川邉良平, 川口則幸, 南谷哲宏, 大島泰, 深作悠平, 久野成夫, 岡田望, 小川英夫, 大西利和, 栗田光樹夫, 河野孝太郎, 竹腰達哉, 「ミリ波補償光学の開発 III. 開口面干渉型波面センサの概要」日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 17 日, 筑波大学)
- 13. 徳岡剛史, 橋本拓也, 井上昭雄, 田村陽一, 松尾宏, 馬渡健, 山中郷史, 吉田直紀, 森脇可奈, 清水一絋, 「赤方偏移 z=9.11 [OIII] 輝線銀河の ALMA サイクル 6 追観測」, 日本天文学会 2020 年春季年会(2020 年 3 月 16 日, 筑波大学)
- 14. 八嶋裕, 徂徠和夫, 渡邉祥正, 矢島義之, 「棒渦巻銀河 M83 の渦状腕と棒状構造での分子ガスの密度構造の違い」, 日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 16 日-19 日, 筑波大学)
- 15. 矢島義之, Salak, D., 徂徠和夫, 「スターバースト銀河 NGC1808 における分子ガス, 巨大分子雲の性質」, 日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 18 日, 筑波大学)
- 16. 保田敦司, 久野成夫, 宮本祐介, Salak, D., 中井直正, 瀬田益道, 永井誠, 石井峻, 渡邉祥正, 徂徠和夫, 橋本拓也, 田中隆広, 保坂智哉, 「ASTE による近傍棒渦巻銀河 M83 の sub-kpc スケール [CI](3P1-3P0) 輝線観測」, 日本天文学会 2020 年春季年会 (2020 年 3 月 18 日, 筑波大学)
- 17. Shibata Kazuki, Watanabe Yoshimasa, Kuno Nario, Sorai Kazuo「Study of physical states of molecular gas in NGC 3627 by CO multi-line observations with ALMA」, East-Asian ALMA Science Workshop 2019(2020 年 2 月 19-21 日, ACADEMIA SINICA Institute of Astronomy and Astrophysics)
- 18. 橋本拓也「ALMA による z=6-9 銀河の性質と南極テラヘルツ望遠鏡への期待」, 南極望遠鏡ワークショップ「テラヘルツ波が 拓く新しい宇宙像」(2019 年 12 月 21 日, 国立極地研究所)(招待講演)
- 19. Salak, D., Nakai, N., Seta, M., & Miyamoto, Y. "ALMA Observations of [CI] (3P1-3P0) and Low-J CO Lines in the Starburst Galaxy NGC 1808", 2019 ALMA/45m/ASTE Users Meeting (2019 年 12 月 18 日-19 日, 国立天文台三鷹)
- Sato, K., Miyamoto, Y., Kuno, N., Salak, D., Wagner, A., Seta, M., Nakai, N., "CO multi-line observations toward the central region of barred spiral galaxy NGC 613", ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2019 (December 18-19, 2019, NAOJ)
- 21. Shibata Kazuki, Watanabe Yoshimasa, Kuno Nario, Sorai Kazuo「Study of physical states of molecular gas in NGC 3627 by CO multi-line observations with ALMA」, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2019 (2019 年 12 月 18-19 日, 国立天文台三鷹)
- 22. 保田敦司、「系外銀河における中性炭素原子輝線観測」、『テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像』、(2019年12月、国立極地研究所)
- 23. Atsushi Yasuda, Nario Kuno, Yusuke Miyamoto, Dragan Salak, Naomasa Nakai, Masumichi Seta, Yoshimasa Watanabe, Shun Ishii, Makoto Nagai, Kazuo Sorai, Takuya Hashimoto, Takahiro Tanaka, Tomoya Hosaka, CI observations of Nearby Barred Spiral Galaxies Resolving Galactic Structures, ALMA/ASTE/45m Users Meeting 2019 (Mitaka, Japan ,December 2019)
- 24. Shoya Tokita, Hiroyuki Kaneko, Nario Kuno, Distribution and kinematics of molecular gas in the overlap region of interacting galaxies NGC4567/4568, ALMA/ASTE/45m Users Meeting 2019 (Mitaka, Japan, December 2019)
- 25. 橋幸大,山田崇貴, 奈良誠大,中野幸夫,笠井康子:"超小型テラヘルツ火星探査機 (TEREX-1) の観測感度解析",第 24 回大 気化学討論会(2019 年 10 月, 愛知県蒲郡市)
- 26. Cooray, S., Takeuchi, T.T., Yoda, M., Sorai, K., "A Method for Reconstruction of Masked Pixels: Application in CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING)", 日本天文学会 2019 年秋季年会(2019 年 9 月 13 日,熊本大学)
- 27. 半田利弘, 松坂怜, 佐々木恵, 溝口智貴, 伊東拓実, 村瀬建, 平田優志, 藤本裕輔, 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居知史, 久野成夫, 「FUGIN データを用いた天の川銀河のガス密度頻度分布 1:分解能の効果」日本天文学会 2019 年秋季年会 (2019 年 9 月 12 日, 熊本大学)
- 28. 平田優志, 半田利弘, 面高俊宏, 村瀬建, 石崎滉也, 西潤弥, 伊東拓実, 砂田和良, 仲野誠 (大分大 学), 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 久野成夫,「野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた星形成領域 CMa OB1 の NH3 輝線観測」日本天文学会 2019 年秋季年会 (2019 年 9 月 12 日, 熊本大学)
- 29. 金子紘之, 宮本祐介, 徂徕和夫, 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, 諸隈佳菜, 竹内努, 村岡和幸, 中井直正, Salak, D., 瀬田益道, 中西裕之, Pan, H.-A., ほか COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING(27):銀河環境間の分子ガス、星質量 中心集中度の比較」, 日本天文学会 2019 年秋季年会 (2019 年 9 月 11 日-13 日. 熊本大学)
- 30. 村瀬建, 半田利弘, 面高俊宏, 平田優志, 石崎滉也, 西潤弥, 伊東拓実, 砂田和良, 仲野誠, 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 久野成夫, 「NH3 輝線を用いた大質量星形成領域 W33 のマッピングサーベイ」日本天文学会 2019 年秋季年会(2019 年 9 月 12 日, 熊本大学)
- 31. 永井 誠, 新田冬夢, 村山洋佑, 鈴木隆司, 樋川遼太朗, Pranshu Mandal, 久野成夫, 中井直正, 関本裕太郎, 松尾宏, 江崎翔平, 宮地晃平, Shan Wenlei, Matthias Kroug, 都築俊宏, 木内等, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 野口卓, 成瀬雅人, 「野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯 109 素子電波カメラの開発: 焦点面 MKID アレイの Al-NbTiN ハイブリッド化」, 日本天文学会2019 年秋季年会(2019 年 9 月 13 日, 熊本大学)
- 32. 新田冬夢, 永井誠, 村山洋佑, 樋川遼太朗, 鈴木隆司, Pranshu Mandal, 久野 成夫, 中井直正, 関本裕太郎, 高倉隼人, 長谷部孝, 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, 「野辺山 45 m 電波 望遠鏡搭載用 100-GHz 帯 109 素子電波カメラの開発:柱状晶 Si レンズおよび真空窓の反射防止対策」, 日本天文学会 2019 年

- 秋季年会(2019年9月13日,熊本大学)
- 33. 奥村大志,今田大皓, 永井誠, 新田冬夢, 久野成夫, 周斌, 中井直正,「電波点回折干渉計 (IV)」日本天文学会 2019 年秋季年会 (2019 年 9 月 12 日, 熊本大学)
- 34. 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 3」2019 年度 秋季年会 (2019 年 9 月 熊本大学)
- 35. 柴田和樹, 渡邉祥正, 久野成夫, 徂徠和夫, 「統計平衡計算による近傍銀河 NGC 3627 における分子雲の物理状態の推定」, 日本 天文学会 2019 年秋季年会(2019 年 9 月 11 日-13 日, 熊本大学)
- 36. 柴田修吾, 徂徠和夫, 金子紘之, 村岡和幸, COMING チーム, 「高密度分子ガス観測から考察する銀河円盤内の分子ガスと星形成活動」, 日本天文学会 2019 年秋季年会(2019 年 9 月 13 日, 熊本大学)
- 37. 渡邉祥正, 西村優里, 原田ななせ, 徂徠和夫, 坂井南美, 山本智, 「M51 の渦状腕領域における 70 GHz 帯高感度観測」, 日本天文 学会 2019 年秋季年会(2019 年 9 月 13 日, 熊本大学)
- 38. 矢島義之, 徂徠和夫, 宮本祐介, 村岡和幸, 久野成夫, 他 COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING (26): CO(J=2-1)/CO(J=1-0) 輝線強 度比と銀河の星形成活動」, 日本天文学会 2019 年秋季年会 (2019 年 9 月 13 日,熊本大学)
- 39. 久野成夫、「Antarctic Terahertz Telescope Project」、Nobeyama Science Workshop 令和元年(2019 年 9 月 4 日-6 日、野辺山宇宙電波観測所)
- 40. 新田冬夢, 他, 「Optical characteristics and analysis pipeline of the 100-GHz band Nobeyama MKID camera」, Nobeyama Science workshop 令和元年 (2019年9月4-6日, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所)
- 41. 村山洋佑, 他, 「Development of antenna-coupled NbTiN/Al hybrid MKID array for 100-GHz band observations」, Nobeyama Science workshop 令和元年(2019 年 9 月 4-6 日, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所)
- 42. Atsushi Yasuda, Nario Kuno, Yusuke Miyamoto, Takahiro Tanaka, Masumichi Seta, Yoshimasa Watanabe, Dragan Salak, Shun Ishii, Makoto Nagai, Naomasa Nakai, 「[CI] observations of M83 Resolving Galactic Structures」, Nobeyama Science Workshop, (Nobeyama Radio Observatory, Japan, September 2019)
- 43. Bin Zhou, Nario Kuno, Toshiyuki NIshibori, Hiroaki Imada, Taishi Okumura, 「Method of surface accuracy measurement by Near-field phase retrieval holography」, Nobeyama science workshop (Nobeyama observatory, 2019.9)
- 44. Bin Zhou, Nario Kuno, Toshiyuki NIshibori, Hiroaki Imada, Taishi Okumura, 「Study of surface alignment for Tsukuba Antarctic 10-m radio telescope by near field phase retrieval holography」, 2019 Autumn Annual Meeting, Astronomical Society of Japan, (University of Kumamoto, 2019.9)

〈研究会開催実績〉

1. 国立極地研究所研究集会「テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像」(2019年 12月 21日、国立極地研究所)

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)(~R1.5.31)

伊敷 吾郎 (数理物質系物理学域 准教授) (R1.9.1 助教から昇任)

飯田 崇史(数理物質系物理学域 テニュアトラック助教)

廣瀬 茂輝 (数理物質系物理学域 テニュアトラック助教) (R2.3.16~)

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 (~R2.2.29)

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

佐藤 勇二(福井大学准教授)連携教員

【人事異動】

大川 英希助教が退職し、中国・復旦大学教授に転出した (2019年5月31日)。

伊敷 吾郎助教が准教授に昇任 (2019年9月1日)。

KIM, Soo-Bong 教授がソウル国立大を退職し成均館大学へ異動となったため、当センター海外教育研究ユニット招致 PI を退職した (2020 年 2 月 29 日)。

廣瀬 茂輝助教が着任した (2020年3月16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。現

在は,2019年-2020年の間のアップグレードのためのシャットダウン中であり,2021年からのRun-3実験で,さらに多くの陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。

さらに 2020 年代後半には 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、宇宙背景ニュートリノのニュートリノ崩壊の探索によって、ニュートリノ質量の絶対値決定を行い、現在の理解で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不自然さを内包する素粒子質量起源の解明を目標とする。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、2019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 2019 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)

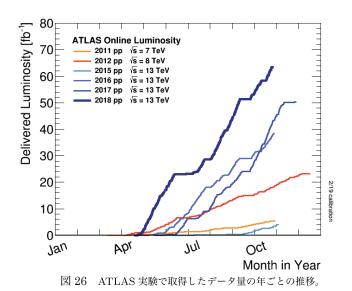
Soo-Bong KIM 教授は、一年間の約一割の期間、筑波大学に滞在し、ニュートリノ崩壊探索のプロジェクトの共同研究者として、ニュートリノ崩壊探索実験の物理・検出器検討に参加している。また、自身が韓国や日本で行っているニュートリノ実験の知識・経験を踏まえて、韓国の素粒子物理実験分野のグループとの共同研究の提案、国内外のニュートリノ物理現状に関するセミナーや本学大学院生の教育にも当たっている。吉田教授も、一ヶ月間に数日の頻度で本部門に来訪し、ニュートリノ崩壊探索のプロジェクトの共同研究者として、福井大が所有する世界に類を見ない遠赤外分子レーザーの強みを活かし、主にニュートリノ崩壊光検出器・分光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,廣瀬,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 $7\sim8$ 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 で衝突実験を行った。2019年ー 2020年は、アップグレードのためのシャットダウン中であり、2021年からの Run-3 実験で、さらに多くの陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。

図 26 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。

現在、2015-2018 年度に取得した Run-2 実験の全データを用いてさまざまな物理解析が行われている。これは $139~{\rm fb}^{-1}$ に相当し、これまで解析してきた 2016~(2017) 年までの $36(80)~{\rm fb}^{-1}$ と比べ、データ量が大幅に増えている *1 。



ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、ATLAS および CMS 実験により、2012 年に発見された。Run-1 のデータ解析により、スピン・パリティの測定結果が標準理論の値 0^+ と整合がよいことが既に確認されている。Run-1 では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-2 の 36 fb⁻¹ のデータを Run-1 の全データに加え、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 $124.97\pm0.24~{\rm GeV}/c^2$ と測定されていた。 2019 年には、139 fb⁻¹ を解

^{*1} 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記録された全データ量より少ないのはこのためである。

析した $H \to ZZ^* \to 4\ell$ 崩壊チャンネル単独の質量測定で、ヒッグス粒子の質量は $124.92^{+0.21}_{-0.20}~{\rm GeV}/c^2$ と測定された。図 27 にこの解析での不変質量分布と、4 つのサブチャンネルでの測定結果を示す。

Run-1のデータの詳細な解析により、 $H\to \tau\tau$ 崩壊が ATLAS と CMS 両実験の合同結果で 5σ を超える有意度で観測されていたので、Run-2 が始まる前に、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。2018年度には、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する事象と、ヒッグス粒子とトップクォーク対が随伴生成される過程がそれぞれ観測された。これらにより、LHC では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ことになる。

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る。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 28 に、2019 年度に公表した解

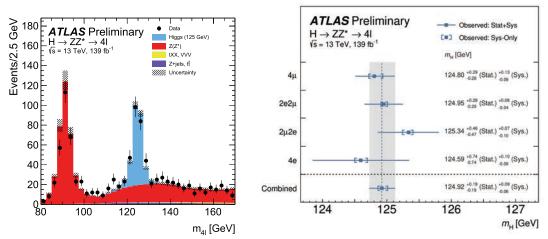


図 27 $H \to ZZ^* \to 4\ell$ 崩壊チャンネルでのヒッグス粒子質量測定。測定に使われた候補事象の不変質量分布 (左) と 4 つのサブチャンネルでの測定結果の比較 (右)。

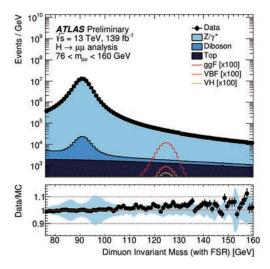


図 28 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析での 2 つの μ 粒子の不変質量分布。

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 1.7 倍より大きい値を 95% の信頼度で棄却した。

ヒッグス粒子は標準模型において質量の起源となる特異な粒子であり、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ルでの測定結果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との結合の強さを測定することができる。2019年度には、 $80~\mathrm{fb}^{-1}$ のデータを用いて様々な生成崩壊モードの測定結果からヒッグス結合の測定をアップデートした。 $H\to\gamma\gamma$ 、 ZZ^* 、 WW^* 、 $\tau\tau$ 、 $b\bar{b}$ 、 $\mu\mu$ および、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊過程の探索、オフシェルでの $H\to ZZ^*\to 4\ell/2\ell 2\nu$ の各チャンネルの解析で得られた結果を同時にフィットすることで、ヒッグス粒子に関する基本物理パラメータを解析した。図 $29~\mathrm{c}$ 、得られたフィットの結果を示す。左の図は、全解析の結果を同時フィットすることで、さまざまなヒッグス粒子の生成過程 i と崩壊過程 f の組み合わせに対して、断面積 σ_i と分岐比 σ_i の積 σ_i を測定した結果である。右の図は、さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合を標準模型の値で規格化した結果である。ヒッグス粒子のさまざまな粒子への結合の測定結果は、いまのところ標準理論とよく一致している。

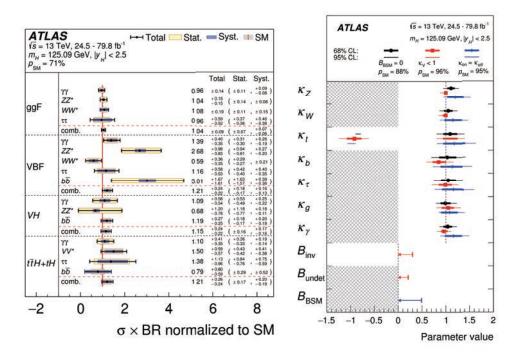


図 29 ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子測定の結果を総合的に解析した結果。(左)さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して、断面積と分岐比の積を測定した結果。結果は標準理論の予言値で規格化して表示している。(右)さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を、標準理論の予言する結合の値で規格化して表示している。 光子とグルーオンの結合も実効的な量として測定する。フィットは、ヒッグス粒子が標準理論通りの崩壊しかしない場合(黒)、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊過の探索結果を考慮した場合(赤)、オフシェルでの $H \to ZZ^* \to 4\ell/2\ell 2\nu$ 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。

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30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結合を測定できる。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。

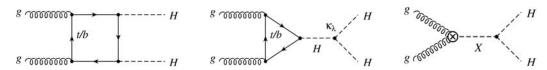


図 30 LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己結合による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

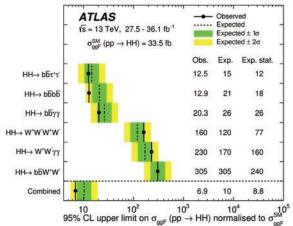


図 31 2ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。標準理論の予言値で規格化して表示している。

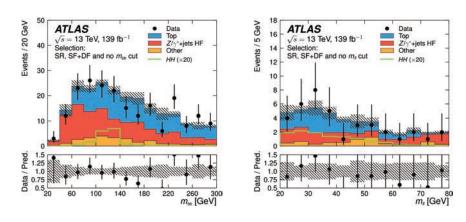


図 32 $HH \to bb\ell\nu\ell\nu$ 崩壊する 2 ヒッグス過程の探索解析。 2 つのレプトンが同じフレーバー(左)と異なるフレーバー(右)でチャンネル分けをして解析した。

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、 $HH \to b\bar{b}\tau\tau$ 、 $HH \to b\bar{b}b\bar{b}$ 、 $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$ 、 $HH \to W^+W^-W^+W^-$ 、 $HH \to W^+W^-\gamma\gamma$ 、 $HH \to b\bar{b}W^+W^-$ の各崩壊モードで

探索した解析結果を 2019 年に公表した。 $36~\rm{fb}^{-1}$ のデータを解析した結果、信号は確認されず、データはバックグラウンドとよく一致した。図 30 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。以上の結果をまとめた後で、ATLAS 実験では 2 つのヒッグス粒子が生成される事象を全 Run-2 データを使って探索している。2019 年度には、 $139~\rm{fb}^{-1}$ のデータを用いて $HH \to bb\ell\nu\ell\nu$ 事象の探索結果をアップデートした。事象中の 2 つのレプトンのフレーバーにより 2 つの解析チャンネルに分けて解析を行ったが、データはバックグラウンドとよく一致し、信号は確認されなかった(図 32)。2 ヒッグス生成断面積に対して $1.2~\rm{pb}$ の上限を得たが、これは標準理論の予言する断面積の $40~\rm{fb}$ 倍に相当する。図 $31~\rm{fb}$ の同じチャンネルでの解析と比べると、解析感度が飛躍的に向上したことが見て取れる。

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を予言する。一方で、有力視されている超対称性理論をはじめ、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。

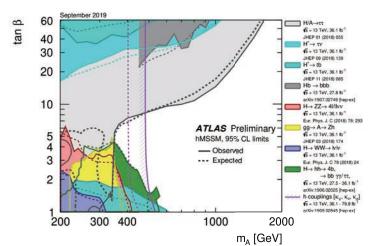
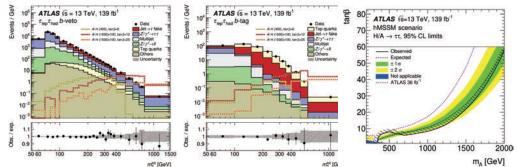


図 33 ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見されている 125 GeV/ c^2 のヒッグス粒子質量に関して得られる間接的な制約。

ATLAS 実験では、既に発見されているのとは別のヒッグス粒子を多くの物理解析で探索している。 $36~{\rm fb}^{-1}$ のデータを使った直接探索解析の結果による ${\rm h_{MSSM}}$ シナリオに対する制約をまとめたのが図 $33~{\rm color}$ である。

2020年2月には、全Run-2データを用いて $\tau\tau$ 終状態に崩壊する重い中性ヒッグス粒子を探索した解析結果が公表された。この解析では、重いヒッグス粒子がボトムクォークを伴わないで生成される場合と伴って生成される場合をチャンネル分けして解析しているが、それぞれのチャンネルのうちで片方の τ がレプトンに、もう片方がハドロンに崩壊する事象の m_T 分布と、この解析で得られた $h_{\rm MSSM}$ シナリオへの制約を図 34 に示す。

2019 年度には、ほかにも多くの物理解析が全 Run-2 データを用いて行われ、2020 年度以降にさら多くの新しい解析結果が公表される予定である。



m_A [GeV] 図 34 ATLAS 実験の 139 fb^{-1} のデータを用いて $\tau\tau$ 終状態に崩壊する重い中性ヒッグス粒子を探索した解析結果。 (左) 重いヒッグス粒子がボトムクォークを伴わないで生成されるチャンネルと(中)伴って生成されるチャンネルでの m_T 分布、および(右)得られた $\mathbf{h}_{\mathrm{MSSM}}$ シナリオに対する制約。

ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

筑波大グループでは、ATLAS シリコンストリップ検出器(SCT)の建設およびその後の検出器運転において、重要な貢献を継続してきた。Rum 2 運転では、高輝度環境下においても安定して運転可能なシステムの確立に既に成功しており、2019 年から 2020 年にかけての LHC シャットダウン期間中では、今後の運転に向けた大きなアップグレードは予定されていない。よって、故障部品の交換などがこの期間の実験現場における主な作業となる。また、これまで 10 年以上にわたってハドロンコライダーの厳しい実験環境下で運転されてきた SCT は、大きな放射線損傷を受けており、例えば漏れ電流は運転開始当初の約 10,000 倍にまで増加している。シャットダウン期間中を利用し、様々なデータを使ってシリコンセンサーの現在の状態を詳細に評価した上で、Rum 3 運転中に起きうる性能低下などの問題を予測し、それらに迅速に対応するための解析ツールを開発しておくことも重要となる。

(i) シリコンセンサーの性能評価

荷電粒子の通過をシリコンセンサーからの信号としてとらえられる確率であるヒット検出効率は、SCT の最も重要な性能指標となる。図 35 は Run 2 運転最終年である 2018 年における、SCT の各領域ごとのヒット検出効率である。ここから、Run 2 の終了直前においてもなお 99% 以上の高いヒット検出効率を維持できていたことがわかる。現在は、放射線損傷を受けたシリコンセンサーの特性に対する理解をさらに深めるため、Run 2 運転期間中にとられた膨大な量のデータを使った詳細な検出効率の評価を行っている。例えば、80 μ m 間隔で並んだストリップ間の荷電粒子の入射位置の関数としてのヒット検出効率測定を行った。2001 年に実施したビームテストによると、シリコンバルクに放射線損傷を受け、電荷収集効率などが変化したシリコンセンサーにおいて、ストリップのちょうど中間に荷電粒子が入射した場合に、わずかなヒット検出効率の低下がみられた。この傾向を、実際の実験において収集されたデータで初めて確認しようと試みている。

SCT のヒット検出効率を保つには、シリコンバルクを完全に空乏化させるのに十分な電圧をかけておく必要がある。しかし、放射線損傷を受けたシリコンセンサーの完全空乏化電圧($V_{\rm FD}$)は、型反転後徐々に上昇している。もし、Run 3 運転期間中に $V_{\rm FD}$ が印加可能な最大電圧を超えてしまうと、ヒット検出効率を維持できなくなってしまう。SCT の信号は、デジタル化されたバイナリー情報としてのみ読み出されるため、 $V_{\rm FD}$ を直接測定するのは困難であるが、印加電圧を変えながら様々な性能指標の依存性を測定することで、推測することができる。図 36 (左) は、その一例で、ノイズの印加電圧依

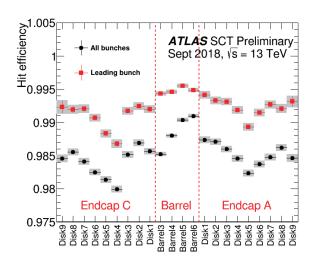


図 35 2018 年 9 月の典型的な陽子陽子衝突ランにおける、各バレル部レイヤーおよびエンドキャップ部ディスクのヒット検出効率。赤点が、陽子ビームを構成する 25 ns 間隔のバンチ列のうち、一番先頭で測定したものであり、SCT 固有のヒット検出効率を示す。黒点はバンチ列に含まれるすべての衝突を使って測定したもので、データ収集においてノイズを抑制するために組み込まれているメカニズムにより多少効率が落ちるが、なお 98% 以上の高いヒット検出効率を維持している。

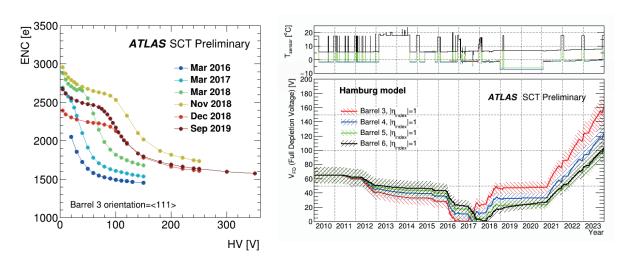


図 36 (左)2016 年から 2019 年にかけて測定された、ノイズ (equivalent noise charge; ENC) と印加電圧 HV と の関係。2017 年以降に、概ね 20 から最大 100 V 付近に "ニー" と呼ぶ凸の変曲点構造が現れている。(右)ハンブルクモデルにもとづいた、2010 年から 2023 年までの全空乏化電圧の変化予想。色の違いは、全 4 層あるバレルレイヤーの 1 層目から 4 層目に対応する。

存性を測定した結果である。数 10 から 100 V 付近に、"ニー"(knee)と呼ぶ特徴的な依存性の変化が見えるが、このあたりでシリコンバルクが完全に空乏化し、静電容量特性の電圧依存性が変わるためノイズが減少する。図 36 (右)には、ハンブルクモデルと呼ばれる、 V_{FD} を被ばく放射線量の関数として計算する経験式にもとづいた予想値を示している。ノイズの印加電圧依存性からは、現在の V_{FD} は100 V 程度であると推測されるが、これは予想値よりも約 50 V 高い。そのほか、ヒット検出効率や漏れ電流の印加電圧依存性も測定しており、現在これらを統合的に解析し、 V_{FD} のさらなる理解を進めている。いずれにしても、Run 3 運転終了時においても V_{FD} 圧は高々 160 V 程度と見積もられており、

SCT の安全運転が保障されている 500 V には十分な余裕がある。従って、Run 3 運転終了まで確実に SCT は運転可能である。

(ii) Run 3 運転に向けた性能解析ツール開発

LHC は Run 2 運転期間の中で順調にビーム輝度を向上し、瞬間ルミノシティーは設計値の 2 倍である $2\times10^{34}~{\rm cm}^{-2}{\rm s}^{-1}$ に到達した。今後の Run 3 運転では、この値が標準的な運転条件になる予定である。これは、物理解析に使用可能な統計量を大幅に増加させられるというメリットがある反面、前節で述べたように、放射線損傷によって徐々にセンサーが劣化してきている SCT にとっては有効な運転環境のモニターが必要となる。図 35 で既に示したように、現在のところ大きな性能低下は見られていないが、Run 3 運転中には 4088 台の SCT モジュールのうちビームに近い一部の性能が顕著に低下してくると予想している。そこで、各モジュールの性能指標をデータベース化し、ウェブブラウザ上でまとめて表示することで、そのようなモジュールを迅速に発見し、印加電圧や冷却温度などの条件を整え、性能を回復するようにする。図 37 は、ヒット検出効率が低いモジュールを、過去数ラン分に渡ってウェブブラウザで表示したものである。このように、SCT 運転エキスパートは問題のあるモジュールを簡単に発見し、さらに該当モジュールの詳細情報を閲覧することで問題を理解し、必要な対処を施せる。現在、ヒット検出効率や、データ処理時のエラーをデータベースに蓄積しており、実際に SCT 運転エキスパートが、Run 2 運転中に発生した問題の解析などに利用し始めている。今後、印加電圧や電流などの情報を追加し、このツールだけで SCT モジュールの状況を一目で把握できるようにすることを目指している。



図 37 SCT 性能解析ツールのウェブブラウザ上での表示例。横方向には、ヒット検出効率がラン(データ収集の区切り)ごとに時系列で比較される。各行はモジュールに対応し、2022 から始まる番号がシリアルナンバーを示す。ヒット検出効率が悪いものから順に並べられ、この表示例では先頭行のモジュールのヒット検出効率が、ラン番号 367364 から 367384 にかけて急激に低下している。これにより、このモジュールへの対処が必要であると視覚的に判断できる。

(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)

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は 10^{12} 年であるが、これ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探索する計画中の実験である。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

 $(\Delta=0.172~{
m meV},\,T_c=1.20~{
m K})$ 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 $(\Delta=20~{
m \mueV},\,T_c=0.165~{
m K})$ 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。

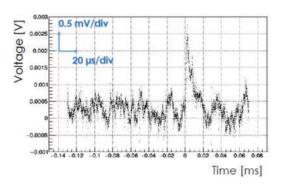


図 38 Nb/Al-STJ に可視光レーザパルス (波長 465nm) を照射して得られた信号電荷を試作電荷積分型増幅器を用いて冷凍機内部で増幅した出力信号波形。増幅器は容量性負帰還を持つ差動増幅回路による低入力インピーダンス電荷積分型で SOI 技術を用いて製作され 350 mK で動作している。

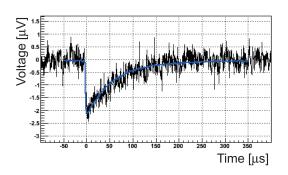


図 39 200 μ m 角の Hf-STJ に冷凍機内で 55 Fe からの X 線を照射し得られた X 線単一光子に対する応答信号の波形。信号波形中の滑らかな曲線波形は、波高を得るために信号波形のフィットに用いられたテンプレート波形。

現在,産総研との共同研究によって,漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発が行われ,要求される低漏 れ電流性能をほぼ達成した Nb/Al-STJ 素子が得られている。しかしながら、STJ からの信号の読出 しは (a) Nb/Al-STJ 素子の動作バイアス電圧は, 0.4 mV 程度と非常に低電圧, (b) 検出目標となる ニュートリノ崩壊光の単一光子 ($E_{\gamma}\sim 25~{
m meV}$ に対する期待される出力電荷は、約 $250e(0.04~{
m fC})$ 、(c) STJ からの信号の時定数は数 μ 秒と比較的速く,対して STJ 自身の静電容量は,数 $10\mathrm{pF}$ \sim nF と大き い,という理由により、冷凍機内の極低温ステージに設置する必要がある STJ からの生の信号をケーブ ルを介して読出すことは、極めてチャレンジングである。そこで、我々のグループでは信号読出し系と して KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究により 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いる。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 素子に直接取り付け極低温環境下で信号増幅をする。これまで、FD-SOI プ ロセスによる MOSFET を用いたコモンソース増幅回路で比較的簡単な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に対し,同じ極低温ステージ上に設置して信号増幅に成功した。 前述のように STJ 素子は比較的大きな静電容量を持つため, 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、新たに、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって低入力イン ピーダンスを実現する電荷積分増幅器を FD-SOI プロセスにより試作した。試作した電荷積分増幅器 は、差動増幅回路部の開ループ利得が十分ではなく、加えて負帰還容量により得られる信号利得(入力 電荷あたりの出力電荷)も足りずに単一光子信号を見るには至らなかった。しかし、STJの大きな光パ ルス応答信号を冷凍機内で電荷積分増幅することに成功した(図38)。室温で動作する回路がほぼその まま極低温でも動作可能であることが実証されたので、今後は、より実用段階に近い増幅器回路の設計

Hf-STJ の開発においては、Hf 層の形成条件等を見直し 150 mK の温度において漏れ電流密度を約 $3 \text{ nA}/\mu\text{m}^2$ までの低減に成功している。このサンプルを用いて、韓国 IBS のグループとの共同研究に

より、⁵⁵Fe 線源からの X 線に対する応答測定を無冷媒断熱消磁冷凍機を用いて 50 mK 以下で行い、 Hf-STJ として世界で初めて X 線域単一光子に対する応答信号を見ることに成功した(図 39)。



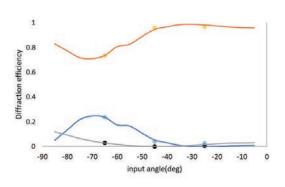


図 40 精密金属加工により製作された 50 μ m 域回折格子の写真 (左)。溝の間隔 365 μ m でアルミニウム板表面を加工し、金の薄膜が蒸着されている。福井大の遠赤外分子レーザ(57.2 μ m, TM 偏光)で回折光(0 次、1 次、2 次光)の相対強度比を実測してシミュレーション予測(曲線)と比較した (右)。

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を達成できないが、単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 1 光子分光が可能となる。ロケット実験に向けて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。回折格子は、予想されるニュートリノ崩壊光の波長域(約 50μ m)では商用的に手に入るものが存在しないため、波動光学シミュレーションに基づいた設計を行い、精密金属工作技術を持つ企業に製作させた。福井大の遠赤外線分子レーザによる評価をおこない、回折効率の実測値がシミュレーションでの予想通りであり、回折格子実機の製作準備が整った(図 40)。また、望遠鏡の光学系の設計も進めており、他にも STJ 素子表面に施す反射防止膜、STJ 素子に光子を集めるウィンストーンコーンの検討も始まっている。

(3) 超弦理論の研究(石橋,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。行列正則化,ゲージ理論の部分的閉じ込め相の研究,非臨界次元の弦の理論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。

行列正則化の研究

超弦理論の非摂動的定式化として提案された行列模型において、超弦理論の弦や D-brane といった物体は、行列の配位によって表される。この間の関係は行列正則化と呼ばれる。与えられた物体に対して、対応する行列の配位を構成する方法(行列正則化の構成方法)は、Berezin-Toeplitz 量子化と呼ばれる数学的手法によって与えられることが知られている。伊敷は松本高興研究員(Dublin Institute for Advanced Studies)と共に、行列正則化における微分同相写像の理解をまとめ、論文 96 に発表した。また、行列正則化は従来電荷を持たない場にしか適用できないものであったが、伊敷と大学院生の足立、齊藤は、松本研究員と共に、この手法を電荷を持つ場に対しても適用できるよう一般化した(論文 97)。これにより、電荷を持つ場が自然に現れる D-brane 上の物理と、行列模型の関係がより明らかになると期待される。

境界を持つ2次元重力理論と行列模型の関係

2次元重力理論は、あるシンプルな行列模型によって記述できることが古くから知られていた。伊敷は、Chaiho Rim 教授 (Sogang 大学)、村木久祥研究員 (Sogang 大学) らと共に、この重力理論の定義される空間が、境界を持つ場合の対応関係を研究した (論文 98)。その結果、重力理論の物理量が、行列模型から導かれる代数方程式を満たすことを発見した。またこの方程式を用いて、境界上に定義された物理量が全て、空間内部に定義された物理量から導かれることを初めて証明した。

行列模型と Little string theory の関係

弦理論には NS5-brane と呼ばれる基本的な物体が存在することが知られている。しかしながら、この物体がどのような原理に従って運動するのかは、まだよくわかっていない。一方、BMN 行列模型と呼ばれる行列模型には、この NS5-brane を記述すると予想されている極限がある。この極限が本当に存在し、その極限で行列模型を解析することができれば、NS5-brane を支配する原理を理解することができる。そのような背景に基づいて、伊敷と大学院生の渡辺は、松本高興研究員(Dublin Institute for Advanced Studies)・浅野侑磨研究員(高エネルギー加速器研究機構)らと共に、BMN 行列模型の予想された極限の存在を、数値的に検証し、極限の存在と矛盾しない結果を得た。

ゲージ理論における部分的閉じ込め相について

伊敷・渡辺は、花田政範研究員(Southanmpton 大学)と共に、前年度にラージ N ゲージ理論における部分的閉じ込め相の存在を提唱した。この現象は、ラージ N ゲージ理論の非閉じ込め相転移の過程でカラーの自由度が非閉じ込め領域と閉じ込め領域へ二相分離する現象である。この現象はゲージ/重力対応を通じて、負の非熱を持つブラックホールが存在する時空を記述できると期待されている。本年度はこの部分的閉じ込め相の提案とその性質をまとめ、研究発表を行った (論文 99)。今年度、渡辺はこの研究をさらに推し進め、前述の花田研究員に加え、Bergner 研究員 (Jena 大学)、Bodendorfer 研究員 (Regensburg 大学)、Rinaldi 研究員 (理研 iTHEMS, Arithmer 社) らとともに gauged-Gaussian 行列模型という解析的に解ける模型を解析的および数値的に調べ、部分的閉じ込め現象の記述方法を議論した。そこで得られた結果をゲージ/重力対応において重要な bosonic BFSS 行列模型に適用することで上記の二相分離現象を確認し、部分的閉じ込め相が存在する強い証拠を得た。

非臨界次元の弦の場の理論

非臨界次元の弦の理論は、行列模型を用いて厳密に解くことができる。最近、非臨界次元の弦の理論のある極限が JT gravity と呼ばれる 2 次元の重力理論で記述できることがわかってきた。この 2 者の AdS/CFT や弦の場の理論との関係から最近非常に活発に議論されている。石橋は、非臨界次元の弦についてこれまで知られている弦の場の理論を用いて、JT gravity に対応する極限がどのように記述されるかを調べた。

(4) 新規高性能シンチレータの開発(飯田)

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金属材料研究所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。

二重ベータ崩壊を起こす可能性がある原子核は多くあるが、バックグラウンドのしみ込みを防ぐため 反応のQ値を考慮すると、実験に適した原子核は 48 Ca、 96 Zr、 136 Xe 等,十数種類の特定の原子核に 絞られる。そのため現在、組成としてこれらの二重ベータ崩壊核を含み、かつ大発光量の無機シンチレータの開発と性能評価を推進している。2019 年度は、① 48 Ca を含むヨウ化カルシウム(CaI₂)と、② 160 Gd を含む (Ce, La, Gd) $_2$ Si $_2$ O $_7$ の二種類のシンチレータに対して、バックグラウンド除去に重要 な波形弁別能に焦点を当てて性能調査を行った。

ョウ化カルシウム(CaI₂)の波形弁別能の研究ョウ化カルシウム(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、最新の装置と技術を駆使して CaI₂ 結晶の育成・加工を行っている。

2017 年度に作成した CaI_2 結晶で,NaI(Tl) の 2.7 倍となる 107,000 ph./MeV を達成しており,2018 年度から,その CaI_2 の波形弁別能力の調査を行っている。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る。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。作製した結晶を湿度 3% 以下のドライルーム内で $5\times5\times1$ mm 程度のサイズに切り出し,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 41 左に示す。波形の最初 200 ns に大きな違いがみられる一方で、波形後半はほとんど変わらないことが分かった。事象ごとの波形の違いを定量化するために、波形前半 200 ns と全体の比を取った Ratio というパラメータを定義した。各事象の Ratio を縦軸に取り、横軸をエネルギーとした 2 次元プロットを図 41 右に示す。赤がアルファ線、青がガンマ線のものである。100 keV 以上の領域で、きれいに分布が分かれていることが見て取れる。また、図 41 右の緑は潮解した結晶にアルファ線を照射した場合のデータで、赤の潮解していないアルファ線と比べると、Ratio の値はほぼ同じであることが分かった。つまり、潮解によって発光量は減っても波形に変化はないということが示され、アルファ線とガンマ線の波形の違いは、純粋に粒子種の違いから来ていることを明らかにした。

<u>Ce:La-GPS の波形弁別能の研究</u>(Ce,:La, Gd) $_2$ Si $_2$ O $_7$ (Ce:La-GPS) は,比較的新しい酸化物結晶のシンチレータである。 $3\sim4$ 万 ph./MeV という高い発光量に加え,発光波長が光電子増倍管の感度波長と一致すること,潮解性が無く扱いやすいこと,高温でも発光量が落ちないこと等の優れた特性を持ち注目を集めている。金属材料研究所において,La-GPS 結晶($10~\mathrm{mm}$ 角)をチョクラルスキー法で作成し,光電子増倍管(Hamamatsu R9869)の光電面に光学グリースで接着し,外から 241 Am と 137 Cs の線源を用いてアルファ線とガンマ線を照射した。波形情報はオシロスコープ(HDO6140 Teledyne LeCroy)を用いて $2.5~\mathrm{GHz}$ のサンプリングレートで,それぞれ約 $1~\mathrm{T}$ 万事象ずつ取得した。

図 42 左はそれぞれのデータから 0.5~0.8 MeV の事象を選んで平均波形を作ったものであり、図の中の式は、アルファ線とガンマ線の平均波形を 2 つの指数関数でフィットした結果である。高速成分と低速成分の時定数は粒子ごとに変化しないが、それらの比率は変化することが示された。次に波形弁別能

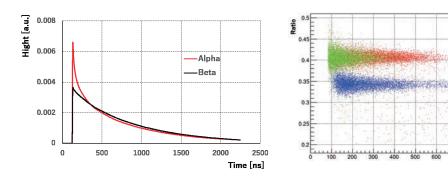


図 41 (左) CaI_2 結晶にアルファ線 (赤) とガンマ線 (黒) を照射した際の平均波形。(右) 横軸エネルギー,縦軸が Ratio の 2 次元プロット。青がガンマ線,赤がアルファ線,黄緑は潮解した結晶にアルファ線を当てたときのもの。

を評価するため、Ratio よりも分離が良い、以下の Shape Indicator(SI) という手法を導入した。

$$SI = \frac{\sum_{i} P(t_i) f(t_i)}{\sum_{i} f(t_i)}, \quad P(t_i) = \frac{f_{\alpha}(t_i) - f_{\gamma}(t_i)}{f_{\alpha}(t_i) + f_{\gamma}(t_i)}$$
(1)

Energy [keV]

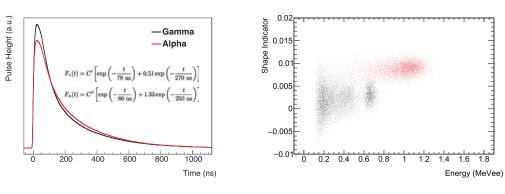


図 42 (左) Ce:La-GPS で得られた平均波形とそのフィット結果。赤がアルファ線, 黒がガンマ線のデータから得られたもの。(右) 横軸エネルギー, 縦軸が SI の二次元プロット。赤がアルファ線, 黒がガンマ線である。

ここで、 $f(t_i)$ は得られた事象の波形データ、 $f_{\alpha}(t_i)$ はアルファ事象の平均波形、 $f_{\gamma}(t_i)$ はガンマ事象の平均波形である。図 42 右は横軸をエネルギー、縦軸を SI の値としてプロットしたもので、赤がアルファ線、黒がガンマ線である。200 keV 以上のエネルギー領域では分離出来ていることが分かる。SI < 0.0057 でカットをかけた場合、ガンマ線が 96.3 % 残るのに対して、アルファ線を 3.7 % まで減らすことが出来る。この結果から、Ce:La-GPS が高い波形弁別特性を持つシンチレータであることが示された。

(5) 陽子・反陽子衝突実験 CDF (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。 $2019–20~\rm{fe}$ には $1~\rm{fi}$ 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, 2019 年 5 月 11 日に受賞式が学士会館(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 において開催された。

〈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. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of top-quark pair differential and double-differential cross-sections in the ℓ +jets channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 79, no.12, 1028 (2019).
- 3. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of angular and momentum distributions of charged particles within and around jets in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. C **100**, no.6, 064901 (2019).
- 4. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for bottom-squark pair production with the ATLAS detector in final states containing Higgs bosons, *b*-jets and missing transverse momentum," JHEP **12**, 060 (2019).
- 5. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the inclusive isolated-photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 36 fb⁻¹ of ATLAS data," JHEP **10**, 203 (2019).
- G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 20152017 LHC proton-proton collision data," JINST 14, no.12, P12006 (2019).
- 7. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of K_S^0 and Λ^0 production in $t\bar{t}$ dileptonic events in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.12, 1017 (2019).
- 8. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of W^{\pm} boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.11, 935 (2019).
- 9. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the inclusive cross-section for the production of jets in association with a Z boson in proton-proton collisions at 8 TeV using the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.10, 847 (2019).
- 10. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement with $t\bar{t}$ events in pp collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$," Eur. Phys. J. C 79, no.11, 970 (2019).
- 11. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of flow harmonics correlations with mean transverse momentum in lead-lead and proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.12, 985 (2019).
- 12. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of W^{\pm} -boson and Z-boson production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s}=2.76$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.11, 901 (2019).
- G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Resolution of the ATLAS muon spectrometer monitored drift tubes in LHC Run 2," JINST 14, no.09, P09011 (2019).
- 14. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Identification of boosted Higgs bosons decaying into b-quark pairs with the ATLAS detector at 13 TeV," Eur. Phys. J. C 79, no.10,

- 836 (2019).
- 15. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Phys. Rev. D **100**, no.5, 052011 (2019).
- 16. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **09**, 091 (2019).
- 17. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for a heavy charged boson in events with a charged lepton and missing transverse momentum from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 100, no.5, 052013 (2019).
- 18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Observation of electroweak production of a same-sign W boson pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. **123**, no.16, 161801 (2019).
- 19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for excited electrons singly produced in protonproton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC," Eur. Phys. J. C **79**, no.9, 803 (2019).
- 20. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for heavy neutral leptons in decays of W bosons produced in 13 TeV pp collisions using prompt and displaced signatures with the ATLAS detector," JHEP 10, 265 (2019).
- 21. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive Z-boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.8, 666 (2019).
- 22. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for the electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **100**, no.3, 032007 (2019).
- 23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of ZZ production in the $\ell\ell\nu\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV," JHEP 10, 127 (2019).
- 24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of fiducial and differential W^+W^- production cross-sections at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.10, 884 (2019).
- 25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Modelling radiation damage to pixel sensors in the ATLAS detector," JINST 14, no.06, P06012 (2019).
- 26. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the top-quark mass in $t\bar{t}+1$ -jet events collected with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV," JHEP 11, 150 (2019).
- 27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for a right-handed gauge boson decaying into a high-momentum heavy neutrino and a charged lepton in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s}=13$ TeV," Phys. Lett. B **798**, 134942 (2019).
- 28. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the cross-section and charge asymmetry of W bosons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.9, 760 (2019).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Combination of searches for invisible Higgs boson decays with the ATLAS experiment," Phys. Rev. Lett. 122, no.23, 231801 (2019).
- G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Observation of light-by-light scattering in ultraperipheral Pb+Pb collisions with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. 123, no.5, 052001 (2019).
- 31. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Evidence for the production of three massive vectorbosons in *pp* collisions with the ATLAS detector," PoS **DIS2019**, 135 (2019).
- 32. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Evidence for the production of three massive vector bosons with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 798, 134913 (2019).
- 33. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the production cross section for a Higgs boson in association with a vector boson in the $H \to WW^* \to \ell\nu\ell\nu$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **798**, 134949 (2019).
- 34. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb⁻¹ of pp collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys.

- Lett. B **796**, 68-87 (2019).
- 35. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of VH, $H \to b\bar{b}$ production as a function of the vector-boson transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector," JHEP **05**, 141 (2019).
- 36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of jet-substructure observables in top quark, W boson and light jet production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **08**, 033 (2019).
- 37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of prompt photon production in $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 8.16 \; \mathrm{TeV} \; p + \mathrm{Pb}$ collisions with ATLAS," Phys. Lett. B **796**, 230-252 (2019).
- 38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Constraints on mediator-based dark matter and scalar dark energy models using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data collected by the ATLAS detector," JHEP 05, 142 (2019).
- 39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for heavy particles decaying into a top-quark pair in the fully hadronic final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 99, no.9, 092004 (2019).
- 40. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Comparison of Fragmentation Functions for Jets Dominated by Light Quarks and Gluons from pp and Pb+Pb Collisions in ATLAS," Phys. Rev. Lett. 123, no.4, 042001 (2019).
- 41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Searches for third-generation scalar leptoquarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector," JHEP **06**, 144 (2019).
- 42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS and CMS], "Combinations of single-top-quark production cross-section measurements and — $f_{LV}V_{tb}$ determinations at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments," JHEP **05**, 088 (2019).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the four-lepton invariant mass spectrum in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector," JHEP 04, 048 (2019).
- 44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of $W^{\pm}Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.6, 535 (2019).
- 45. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Electron reconstruction and identification in the ATLAS experiment using the 2015 and 2016 LHC proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Eur. Phys. J. C **79**, no.8, 639 (2019).
- 46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for long-lived neutral particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS calorimeter," Eur. Phys. J. C **79**, no.6, 481 (2019).
- 47. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for heavy charged long-lived particles in the ATLAS detector in 36.1 fb⁻¹ of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Phys. Rev. D **99**, no.9, 092007 (2019).
- 48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Searches for scalar leptoquarks and differential cross-section measurements in dilepton-dijet events in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment," Eur. Phys. J. C **79**, no.9, 733 (2019).
- 49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for low-mass resonances decaying into two jets and produced in association with a photon using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **795**, 56-75 (2019).
- 50. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Dijet azimuthal correlations and conditional yields in pp and p+Pb collisions at sNN=5.02TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. C 100, no.3, 034903 (2019).
- 51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the ratio of cross sections for inclusive isolated-photon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ and 8 TeV with the ATLAS detector," JHEP **04**, 093 (2019).
- 52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for scalar resonances decaying into $\mu^+\mu^-$ in events with and without b-tagged jets produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **07**, 117 (2019).
- 53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 99, no.7, 072009 (2019).
- 54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for

- top-quark decays $t \to Hq$ with 36 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **05**, 123 (2019).
- 55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Observation of electroweak $W^{\pm}Z$ boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **793**, 469-492 (2019).
- 56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for large missing transverse momentum in association with one top-quark in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **05**, 041 (2019).
- 57. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Properties of $g \to b\bar{b}$ at small opening angles in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Phys. Rev. D **99**, no.5, 052004 (2019).
- 58. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for chargino and neutralino production in final states with a Higgs boson and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **100**, no.1, 012006 (2019).
- 59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **05**, 164 (2019).
- 60. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using 20152016 LHC proton-proton collision data," JINST 14, no.03, P03017 (2019).
- 61. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for heavy long-lived multicharged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Rev. D **99**, no.5, 052003 (2019).
- 62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Study of the rare decays of B_s^0 and B_s^0 mesons into muon pairs using data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector," JHEP **04**, 098 (2019).
- 63. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in leptonic final states at $\sqrt{s}=13$ TeV in ATLAS," Eur. Phys. J. C **79**, no.5, 382 (2019).
- 64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}$ production with additional heavy-flavour jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **04**, 046 (2019).
- 65. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson pair production in the $WW^{(*)}WW^{(*)}$ decay channel using ATLAS data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV," JHEP **05**, 124 (2019).
- 66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Study of the hard double-parton scattering contribution to inclusive four-lepton production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. **790**, 595 (2019).
- 67. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **99**, 072001 (2019).
- 68. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for long-lived particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS muon spectrometer," Phys. Rev. D **99**, no.5, 052005 (2019).
- 69. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}WW^*$ decay mode at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **04**, 092 (2019).
- 70. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for the Production of a Long-Lived Neutral Particle Decaying within the ATLAS Hadronic Calorimeter in Association with a Z Boson from pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV," Phys. Rev. Lett. 122, no.15, 151801 (2019).
- 71. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for four-top-quark production in the single-lepton and opposite-sign dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **99**, no.5, 052009 (2019).
- 72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of W and Z boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 79, no.2, 128 (2019).
- 73. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of

- the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run 2 data collected in 2015 and 2016," Eur. Phys. J. C **79**, no.3, 205 (2019).
- 74. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \to \text{lepton+jets}$ channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data and combination with previous results," Eur. Phys. J. C **79**, no.4, 290 (2019).
- 75. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with two charged leptons and two jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **01**, 016 (2019).
- 76. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of photonjet transverse momentum correlations in 5.02 TeV Pb + Pb and pp collisions with ATLAS," Phys. Lett. B 789, 167-190 (2019).
- 77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for invisible Higgs boson decays in vector boson fusion at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **793**, 499-519 (2019).
- 78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "A search for pairs of highly collimated photon-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 99, no.1, 012008 (2019).
- 79. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-sections in the $H \to WW^* \to e\nu\mu\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **789**, 508-529 (2019).
- 80. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Performance of top-quark and W-boson tagging with ATLAS in Run 2 of the LHC," Eur. Phys. J. C 79, no.5, 375 (2019).
- 81. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for squarks and gluinos in final states with hadronically decaying τ -leptons, jets, and missing transverse momentum using pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **99**, no.1, 012009 (2019).
- 82. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for heavy charged long-lived particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using an ionisation measurement with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 788, 96-116 (2019).
- 83. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for long-lived particles in final states with displaced dimuon vertices in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **99**, no.1, 012001 (2019).
- 84. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for doubly charged scalar bosons decaying into same-sign W boson pairs with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **79**, no.1, 58 (2019).
- 85. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, 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)
- 86. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for vector-boson resonances decaying to a top quark and bottom quark in the lepton plus jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B 788, 347-370 (2019).
- 87. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "In situ calibration of large-radius jet energy and mass in 13TeVprotonproton collisions with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 79, no.2, 135 (2019).
- 88. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "A strategy for a general search for new phenomena using data-derived signal regions and its application within the ATLAS experiment," Eur. Phys. J. C 79, no.2, 120 (2019).
- 89. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Correlated long-range mixed-harmonic fluctuations measured in *pp*, *p*+Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **789**, 444-471 (2019).
- 90. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for Higgs boson decays into a pair of light bosons in the $bb\mu\mu$ final state in pp collision at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **790**, 1-21 (2019).
- 91. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Measurement of the nuclear modification factor for inclusive jets in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}}=5.02$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **790**, 108-128 (2019).
- 92. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS

- detector," JHEP 01, 030 (2019).
- 93. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration], "Search for light resonances decaying to boosted quark pairs and produced in association with a photon or a jet in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **788**, 316-335 (2019).
- 94. S. H. Kim, Y. Takeuchi, T. Iida, C. Asano, R. Wakasa, T. Yoshida, S. B. Kim *et al.*, "Development of Superconducting Tunnel Junction Far-Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND experiment," PoS ICHEP2018 (2019) 427.
- 95. 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 2019 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2019 https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/933690 SA6000142016, II-1 (2019), (Online edition).[査読なし]
- 96. G. Ishiki and T. Matsumoto, "Diffeomorphisms on the fuzzy sphere," PTEP **2020** (2020) no.1, 013B04 [arXiv:1904.00308 [hep-th]].
- 97. H. Adachi, G. Ishiki, T. Matsumoto and K. Saito, "Matrix regularization for Riemann surfaces with magnetic fluxes," Phys. Rev. D **101** (2020) no.10, 106009 [arXiv:2002.02993 [hep-th]].
- 98. G. Ishiki, H. Muraki and C. Rim, "The null identities for boundary operators in the (2, 2p + 1) minimal gravity," PTEP **2020** (2020) no.2, 023B07 [arXiv:1911.01737 [hep-th]].
- 99. M. Hanada, G. Ishiki and H. Watanabe, "Partial deconfinement in gauge theories," (to appear in Pos LATTICE 2019) [arXiv:1911.11465 [hep-lat]].
- 100. K. Tetsuno, T. Iida, et al., "Status of 48Ca double beta decay search and its future prospect in CANDLES," Journal of Physics: Conference Series/1468/p.012132 (2020).
- 101. K. Fushimi, T. Iida, et al., "PICOLON dark matter search Development of highly redio-pure NaI(Tl) scintilltor," Journal of Physics Conference Series/1468/p.012057 (2020).
- 102. S. Umehara, T. Iida, et al., "Neutrino-less double beta decay of 48Ca studied by CaF2(pure) scintillators," Journal of Physics: Conference Series/1342/p.012049 (2020).
- 103. K. Kamada, T. Iida, et al., "Crystal growth and scintillation properties of Eu-doped Ca(BrxI1-x)(2) crystals," Radiation Measurements Vol. 127 106139 (2019).
- 104. K. Mizukoshi, T. Iida, et al., "Pulse-shape discrimination potential of new scintillator material: La-GPS:Ce," Journal of Instrumentation/14 P06037 (2019).
- 105. 飯田崇史 et al., "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," Radiation detectors and their uses: proceedings of the 33rd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, pp.42-50 (2019).
- 106. K. Ueno and T. Iida, "Single Electron Generation and Its Imaging and Counting Using Microchannel plate," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), pp. 1-3, (2019).
- 107. Y. Kibe and T. Iida, "Development of 6Li-loaded water-based liquid scintillator for the detection of secondary neutrons in proton therapy," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), pp. 1-4, (2019).

〈学位論文〉

[修士論文]

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2020 年 2 月

- 1. 笠島誠嘉:「COBAND 実験における単一光子検出を目指した STJ 信号の極低温電荷積分型増幅器の開発研究」
- 2. 足立 宏幸:「The Berezin-Toeplitz quantization for the fuzzy torus with a magnetic flux」
- 3. 齊藤 海秀:「弦理論のドジッター真空について」

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- 1. C. Asano et al., "R&D of Hf-STJ for COBAND experiment", 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18), Jul. 22-26, 2019, Milan, Italy. (ポスター)
- 2. A. Kasajima *et al.*, "Development of superconducting tunnel junction detector with cryogenic amplifier for COBAND experiment" 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18), July. 22-26, 2019, Milan, Italy. (ポスター)
- 3. T. Iida et al., "R&D of new high-performance scintillators including double beta decay nuclei", 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, United Kingdom, Oct. 26 Nov. 2, 2019. (ポスター)
- 4. T. Iida *et al.*, "Development of water scintillator for a future large-scale neutrino experiment", 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, United Kingdom, Oct. 26 Nov. 2, 2019. (ポスター)

- 5. T. Iida et al., "Development of calcium iodide (CaI2) scintillator for the study of double beta decay of ⁴⁸Ca", 15th International Conference on Scintillating Materials and their Applications (SCINT2019), Sendai, Japan, Sep. 30 Oct. 4, 2019. (一般講演)
- 6. Goro Ishiki, 「Black holes and holography」,

CCS InternationalSymposium 2019, "11th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences," Oct 15, 2019. (筑波国際会議場, Oct 15, 2019). (招待講演)

7. Goro Ishiki, 「Partial Deconfinement」,

XQCD 2019 (University of Tsukuba, Jun. 24 - 26, 2019). (招待講演)

8. Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement」,

XQCD 2019 (University of Tsukuba, Jun. 24 - 26, 2019). (一般講演)

9. Masanori Hanada, Goro Ishiki, Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement」,
The 37th international conference on lattice field theory 2019 (Wuhan, China Jun. 16 - 22, 2019). (一般講演)

10. Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement」,

Strings and Fields 2019 (YITP, August 19 - 23, 2019.) (一般講演)

[国内学会・研究会]

1. 佐藤構二: LHC ATLAS 実験,

宇宙史研究センター 2019 年度第1回構成員会議・成果報告会 (2019年6月3日), 筑波大学. (招待講演)

- 2. 武内勇司: COBAND 実験に向けた STJ+SOI アンプ開発現状と sub-GeV 領域ダークマター粒子探索への応用, 宇宙史研究センター 2019 年度第1回構成員会議・成果報告会 (2019 年 6 月 3 日), 筑波大学. (招待講演)
- 3. 武内勇司:COBAND 実験 最近の進展:IBS/CUP での Hf-STJ 測定,

宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学. (招待講演)

4. 佐藤構二:ATLAS 実験の最近の物理結果から,

宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学. (招待講演)

5. 伊敷吾郎: 非可換空間上の Diffeomorphism とその近似的不変量,

宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学. (招待講演)

6. 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 (2019 年 8 月 5-6 日), JAXA/ISAS. (一般講演)

- 7. 武内勇司:ビッグバン数秒後の残照に標準理論の綻びを探る COBAND 計画, 筑波大学数理物質研究科物理学セミナー (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学. (セミナー)
- 8. KIM, Soo-Bong: Detection of coherent reactor neutrino scattering and search for sterile neutrino, 宇宙史研究センターセミナー (2020 年 1 月 10 日), 筑波大学. (セミナー)
- 9. 笠島誠嘉: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 X,

日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17–20 日), 山形大学小白川キャンパス. (一般講演)

- 10. 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 III 〜波形弁別能の研究〜」, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス. (一般講演)
- 11. 前川群:COBAND 実験のための光学系設計開発 III,

日本物理学会第75回年次大会 (2020年3月16-19日), 名古屋大学 (東山キャンパス). (一般講演)

12. 廣瀬茂輝: LHC-Run2 全データでのヒッグス粒子足新結果と Run3 準備状況,

日本物理学会第75回年次大会(2020年3月16–19日),名古屋大学(東山キャンパス)(企画講演).

- 13. 飯田崇史:次世代地下素粒子実験に向けた新規シンチレータ開発の現状,
 - KEK 測定器開発プラットフォーム A 班研究会 (2019 年 12 月 23-24 日), 東京大学本郷キャンパス. (招待講演)
- 14. Georg Bergner, Norbert Bodendorfer, Masanori Hanada, Enrico Rinaldi, Hiromasa Watanabe, 「Partial deconfinement and gauge fixing」,

日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学,2020 年 3 月 16 日-19 日) (一般講演)

- 15. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 齊藤海秀, 松本高興,「磁場のあるトーラスの行列正則化」, 日本物理学会第75回年次大会(名古屋大学, 2020年3月16日-19日)(一般講演)
- 16. 浅野侑磨, 伊敷吾郎, 松本高興, 渡辺展正, 「BMN 行列模型と NS5 ブレーン極限」, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 2019 年 9 月 17 日-20 日) (一般講演)
- 17. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 齊藤海秀, 松本高興,「磁場の入ったファジートーラスの幾何学」, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 2019 年 9 月 17 日–20 日) (一般講演)
- 18. 伊敷吾郎,「Berezin-Toeplitz 量子化と diffeomorphism」,

離散的手法による場と時空のダイナミクス 2019 (島根大学松江キャンパス・マリンパーク多古鼻, 2019 年 9 月 9 日–12 日) (一般講演)

19. 渡辺展正,「部分的非閉じ込め相とその応用」

熱場の量子論とその応用 2019 (YITP, 2019 年 9 月 2 日-4 日) (一般講演)

20. 渡辺展正,「Partial Deconfinement」,

原子核三者若手 夏の学校 2019 (白浜荘, 滋賀県, 2019 年 8 月 5 日-10 日) (一般講演)

21. 渡辺展正,「Partial Deconfinement」,基研研究会 素粒子物理学の進展 2019 (YITP, 2019 年 7 月 29 日-8 月 2 日) (ポスター)

〈その他特記事項〉

1. 朝日新聞 2020 年 3 月 30 日 15 ページ「科学の扉-誕生直後の宇宙を探れ」に COBAND 実験を紹介する記事が掲載

〈受賞〉

- 1. 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」, 2019 年 5 月 11 日
- 2. CDF and D0 Collaborations: the 2019 European Physical Society 「High Energy and Particle Physics Prize」, "for the discovery of the top quark and the detailed measurement of its properties."
- 3. 足立宏幸: 筑波大学数理物質科学研究科研究科長賞 (2019 年度修士論文)

〈国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動〉

- 1. 受川史彦:日本物理学会素粒子実験領域代表(2019年04月~2020年03月)
- 2. 金 信弘:高エネルギー物理学奨励賞選考委員会委員 (2018 年度, 2019 年度)
- 3. 石橋延幸:日本物理学会誌編集委員長
- 4. 石橋延幸:日本物理学会理事
- 5. 石橋延幸:PTEP編集委員

〈競争的資金〉

1. 科学研究費 新学術領域研究 「ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開〜LHC による真空と時空構造の解明〜」2016 – 2021 年度

計画研究 B01:「ヒッグス粒子で探る真空と世代構造」,研究分担者:受川史彦

8,190 千円 (直接経費 5,300 千円, 間接経費 1,890 千円) (2019 年度)

- 2. 科学研究費 基盤研究 (B)「大発光量無機シンチレータで目指す宇宙史研究」, 2018 2020 年度, 研究代表者: 飯田崇史 5,720 千円 (直接経費 4,400 千円, 間接経費 1,320 千円) (2019 年度)
- 3. 科学研究費 挑戦的研究 (萌芽) 「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」, 2018 2019 年度, 研究代表者: 飯田崇史
 - 3,120 千円 (直接経費 2,400 千円, 間接経費 720 千円) (2019 年度)
- 4. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型)「フッ素系界面活性剤による透明な水シンチレータの実現」, 2019 2020 年度, 研究代表者:飯田崇史
 - 2,210 千円 (直接経費: 1,700 千円, 間接経費: 510 千円) (2019 年度)
- 5. 科学研究費 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」, 2018 2022 年度, 研究代表者: 石橋 延幸
 - 650 千円 (直接経費 500 千円, 間接経費 150 千円) (2019 年度)
- 6. 科学研究費 基盤研究(C)「行列模型による超弦理論の非摂動的定式化の研究」, 2019 2022 年度,研究代表者:伊敷吾郎 1,170 千円 (直接経費 900 千円,間接経費 270 千円)(2019 年度)

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)

新井田 貴文(数理物質系物理学域 国際テニュア助教)

野中 俊宏(数理物質系物理学域助教)

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

Ashutosh Kumar Pandey(数理物質系物理学域 研究員)

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 ~ 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 ~

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)

笹 公和(数理物質系物理学域准教授)

森口 哲朗(数理物質系物理学域助教)

杉立 徹(広島大学・学術・社会連携室 特任教授) 客員教授

濱垣 秀樹 (長崎総合科学大学・新技術創成研究所 特命教授) 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・延與放射線研究室 副主任研究員)客員教授

若杉 昌徳 (京都大学・理学研究科 教授) 客員教授

齋藤 武彦 (理化学研究所 主任研究員) 客員教授

山口 由高 (理化学研究所・仁科加速器研究センター 技師) 客員准教授

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)

アメリカ・Wayne 州立大学の新井田貴文氏が国際テニュアトラック助教として 2019 年 7 月に着任し、中国・華中師範大学の野中俊宏氏がテニュアトラック助教として 2020 年 3 月に着任し、また Ashutosh Kumar Pandey 氏が研究員として 2019 年 11 月に着任した。

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。理化学研究所の齋藤武彦氏を客員教授として、同じく山口由高氏を客員准教授として研究協力の強化を進めた。

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 QCD 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 実験高度化に向けた FoCal プロトタイプの開発と検出器評価用テストベンチの構築 QGP 物性を理解するにあたり、未解明な点の一つとして原子核衝突初期状態がある。近年の研究で、衝突初期状態にカラーグラス凝縮 (Color Glass Condensate, CGC) と呼ばれる物質状態の存在が提唱されているが、未だ発見には至っていない。CGC に感度の高い量として、前方方向の直接光子の測定が重要なプローブになると考えられている。そこで、衝突前方方向での直接光子の測定を目的とした、LHC-ALICE 実験のアップグレード計画の 1 つとして、FoCal (Forward Calorimeter) の開発及び性

能評価を行っている。

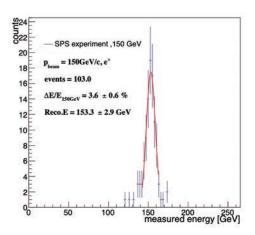


図 43 150 GeV の粒子を入射した際に得られた陽電子選定後の Mini-FoCal 全体での測定エネルギー分布 [3]

2018 年に CERN の PS と SPS の両加速器において、FoCal のプロトタイプである Mini-FoCal の性

能評価実験を行った。まず、ハドロンビームを 1 枚のシリコンパッドセンサーに打ち込む実験を計 15 枚分行い、その平均を求めることにより、最小電離粒子を測定したパッドの ADC 平均値は 117.2 チャンネルであることが測定された。この値より求めた 1ADC あたりのシリコンでのエネルギー損失は 0.76keV であることが計算された。また、シミュレーション結果と照らし合わせることにより、エネルギー分解能が求められ、入射エネルギーの再構成可能性も証明された。 (図 43) その結果、 $\Delta E/E=3.7$ % のエネルギー分解能を得た。

この結果及びアップデートされたシミュレーションの結果を受けて、2019 年には FoCal の要求するダイナミックレンジ及び分解能を満たすために、新たな読み出し用集積チップの候補である SkiROC2 の性能評価も行われた。チップ単体の性能としては、最新のシミュレーション結果により計算されたシャワーマックスにおける 1.5 TeV のエネルギーに対して、1.4 TeV 程度のエネルギーが測定可能であることがわかった。今後はチップ単体ではなく、実際に Si パッドを通した際の性能評価実験を行うことが必要である。実験室における高強度レーザ使用のための環境構築も 2019 年に行われたため、今後は本レーザーシステムを活用して、検出器の評価実験を行う予定である。

J-PARC E16 実験に向けた MRPC の時間分解能評価

J-PARC(大強度陽子加速器施設) では、原子核中のカイラル対称性の自発的破れの回復に伴う ϕ 中間子の質量の変化を観測するための E16 実験が進められている。 ϕ 中間子が電子陽電子対に崩壊する時の ϕ 中間子の質量を真空中と原子核中で比較することを目的としている。我々は、 ϕ 中間子の e^+e^- 崩壊だけでなく K^+K^- 中間子に崩壊するチャンネルも合わせて測定することを提案しており、そのために必要な K 中間子識別のできる飛行時間検出器として高い時間分解能を持ち、かつ、高レート耐性のある MRPC(Multi-gap Resistive Plate Chamber) の導入を検討している。

2019 年に SPring-8 の LEPS で行った逆コンプトン散乱による反跳電子を利用したテストビームにおいて、MRPC の時間分解能はおよそ 70 ps 程度まで達成することが出来た。また、E16 実験では数 MHz 程度の高レートのイベントが予想される為、FPGA を搭載した回路を新たに採用し情報処理の高速化を行った。FPGA を搭載した回路系での時間分解能の評価を宇宙線を利用して行った結果、時間分解能はおよそ 70 ps 程度であった。これは SPring-8 で行った実験とは異なる情報処理回路系を用いて一致する結果を得られたことを示しており、このことから新たに採用した FPGA を搭載した回路系でも MRPC は同等の精度で利用することが可能であり、また MRPC の時間分解能評価の信頼性を高いことが分かった。

ALICE 実験 FoCal プロジェクト

高エネルギー原子核実験グループでは、ALICE 実験の次期アップグレード計画として、前方カロリメータ検出器プロジェクト FoCal (Forward Calorimeter) を推進している。これは、ALICE 検出器の前方方向 $(3.4 < \eta < 5.8)$ に電磁カロリーメータおよびハドロンカロリメータを新たに設置し(図 45)、前方方向に発生する直接光子、崩壊光子などの位置、エネルギーを精度よく測定することにより、未だ実験的証拠が得られていない、高エネルギーハドロンの普遍的な描像「カラーグラス凝縮 (CGC)」の世界初観測、及び小さなx 領域における原子核内グルーオン・分布関数を世界最高精度で測定することを主な目的としている。この検出器の ALICE 実験への導入を 2025-2026 年の長期 LHC 停止期間 (LS3) に、また最初の物理測定を 2027 年 (LHC-Run-4) に行うため、計画を進めている。 2019 年度においては、実験提案書 (Letter of Intent, LoI) [4] の策定と公開、国内外のコラボレーション形

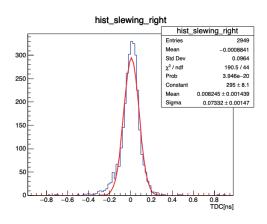


図 44 Spring-8 での MRPC の時間分解能評価

成、ALICE 実験内における外部パネルも含めた FoCal プロジェクトのレビュー (2020 年 1 月) などを行なった。筑波大グループは FoCal 電磁カロリメータ部分の FoCal-E Pad 検出器の主担当である。グルノーブル LPSC 研究所、理化学研究所、および高エネルギー加速器研究機構のシリコン検出器プラットフォームと新たな協力関係を結び、2020 年度からの最終試作機に向けた準備に入った。さらに2018 年度の FoCal プロトタイプの性能評価、過去の試作機の性能評価 [5]、新規読出しテスト、レーザー構成システムの構築を行なった。

本原稿執筆現在 (2020 年 5 月末)、FoCal プロジェクトは ALICE 実験の正式なプロジェクトとして承認され (2020 年 4 月)、さらに LHC 実験計画の最高意識決定機関である LHCC 委員会 (LARGE HADRON COLLIDER COMMITTEE) に LoI を提出し、2020 年 6 月、同意委員会にて審査が予定されている。

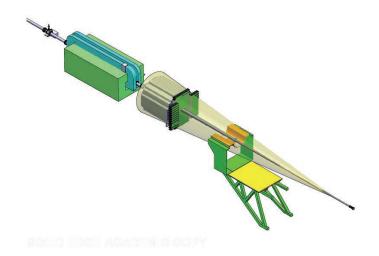


図 45 FoCal 検出器の外観。前方の中央部に見える緑色の板状のものが FoCal-E であり、その後方に FoCal-H (ハドロンカロリメータ) がある。

陽子・陽子 $\sqrt{s}=5.02~{ m TeV}$ における荷電ジェットの横運動量分布

ALICE 実験において、陽子・陽子 $\sqrt{s}=5.02~{\rm TeV}$ での荷電ジェット生成断面積および横運動量 (p_T) 分布を測定を測定した [6]。 p_T 領域は、 $5 < p_T < 100~{\rm GeV/c}$ である。ジェットの再構成には、荷電粒子のみを用い、anti- k_T アルゴリズムというジェット再構成法を用いた。ジェットの半径方向の大きさを表す R(ジェット分解能パラメータ) は、 $0.2,\,0.3,\,0.4,\,$ および 0.6 であり、ジェットを測定する擬ラピディティ領域は $|\eta|<0.9-R$ である。荷電粒子のジェット生成断面積を、LO (leading-order) 及び NLO (next-to-leading-order) での摂動 QCD 計算 (pQCD) と比較した。その結果、NLO 計算の結果の方が、実験値をより再現していることが分かった。また異なる R でのジェット生成断面積比を求めた(図 46)。その結果、これらの比は、低い p_T から高い p_T にかけて増加し、高い p_T 領域では一定になっていることが分かった。これはジェットのコリメーションが、高い p_T の方が、低い p_T と比べてより大きいことを示している。これらの結果は、pQCD 計算とのより詳細な比較を可能とすると同時に、同衝突エネルギーにおける鉛・鉛衝突でのジェット測定に対して、重要なベースラインデータを与え、LHC 重イオン衝突で生成される高温・高エネルギー密度物質中のパートン・エネルギー損失機構解明の重要な基礎データを与える。

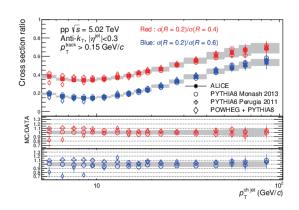


図 46 荷電ジェット生成断面積の異なるジェット分解能での比 [6]。 $\sigma(R=0.2)/\sigma(R=0.4)$ (赤) と $\sigma(R=0.2)/\sigma(R=0.6)$ (青) を、理論計算 LO (PYTHIA) と LO (POWHEG+PYTHIA8) で比較した。

ALICE 実験 鉛・鉛および陽子・陽子衝突 $\sqrt{s_{NN}}=5.02~{\rm TeV}$ におけるハドロン-ジェット相関測定 0 オーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性研究における強力なプローブに 1 つにジェットがある。鉛・鉛 中心衝突事象においては、ジェット起源ではない多数の低横運動量 (p_T) の粒子が生成されるため、一般に低い p_T 領域でのジェット測定は困難である。しかしながら、荷電ハドロンをトリガー粒子とし、その 180° 反対方向に生成される反跳ジェットを測定することにより、バックグランドの効果を抑制しつつ、大きな R (ジェット分解能パラメータ) における低い横運動量領域でのジェット測定が可能となる。今回、LHC Run-2 の 鉛・鉛および陽子・陽子衝突事象データを用いて、ハドロン-ジェット相関測定を行い、鉛・鉛衝突と陽子・陽子衝突の反跳ジェット生成比 ($\Delta^{\rm Pb-Pb}_{\rm recoil}$ $=I_{AA}$) を測定した(図 47)。その結果、鉛・鉛 0-10% 中心衝突事象において、特に低い p_T 領域において、大きな反跳ジェット抑制効果が見られた。また異なる R における I_{AA} の測定したところ、大きな R 依存性はみられなかった。今後、低い横運動量かつ大きな R での反跳ジェット・方位角

分布 (acoplanarity) を測定することにより、ジェット-QGP 媒質相互作用と、それに伴う低横運動量ハドロン生成について、研究の進展が期待される。

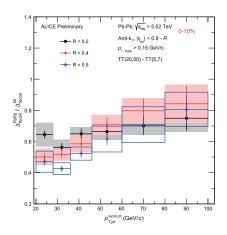


図 47 鉛・鉛および陽子・陽子衝突 $\sqrt{s_{NN}}=5.02~{\rm TeV}$ を用いた I_{AA} 分布。中心衝突度 0-10% $R=0.2,\,0.4$ および 0.5 のデータ。

LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s}=13 { m TeV}$ 陽子陽子衝突におけるジェット内部の中性中間子の測定

高エネルギー原子核衝突実験における hard process による cross section は、pertubative QCD(pQCD) によって構成されて pQCD は三つの物理量、parton distribution function(PDF)、fragmentation function(FF)、QCD matrix によって理解されている。PDF は incoming proton の parton の運動量部分で、FF は、パートンエネルギーと比較したときの、測定されたハドロンの運動量率の関数として、outgoing parton が観測されたハドロンの確率を表す。この二つの関数は non-pertubative 効果によって理論的に計算するのが難しく、様々な衝突エネルギーに対して実験を行なっている。

先行実験として、ALICE 実験 $\sqrt{s}=5.02$ TeV 陽子陽子衝突におけるジェット内部や Inclusive measurement の中性中間子の測定が報告され、それぞれ異なる中性中間子の生産量が報告されている [8]。しかし、 $\sqrt{s}=5.02$ TeV 陽子陽子衝突における実験はデータの統計的不定性が大きい。我々の実験では high p_T での jet fragmenntation function を直接測定する事が期待されている。

中性中間子の再構成は、光子の不変質量を再構成することにより、2 光子崩壊チャネルを介して行われる。すべての光子候補ペアの組み合わせを作成するため、ピークの下に膨大な background が現れる。この background は event mixing method を使用して差し引かれる。中性中間子からの崩壊光子は、最小バイアストリガーを使用して ALICE 検出器の電磁カロリメーター(EMCal)によって測定される。

 p_T スライスの各中性中間子の不変質量分布に統合されている raw yield を計算した後、検出器の geometrical acceptance、reconstructed efficiency、secondary paricle 効果などの correction factors を考慮した invariant yield を再構成し、 π^0 中間子と η 中間子の両方の invariant yield の再構成を行った。今後、ジェット内部の η/π^0 の比を inclusive measurement と比較することで、ジェット内部の中性中間子生成の変化を調べる予定である。

ALICE 実験における Pb-Pb $\sqrt{s}=5.02~{ m TeV}$ におけるフル・ジェットの測定と原子核変調効果

QGP 物質の性質を理解するために真空状態と比較した重イオン衝突実験におけるジェットの変調の研究は有用となる。ジェットとは初期パートンの硬散乱によって生成された粒子が円錐状に拡散する現象である。この生成された粒子が生成直後に QGP 物質中を通過すると、真空状態と比較しジェットがエネルギーを失うことで、ジェットの横運動量 $p_{\rm T}$ 分布が変化すると予想される。

LHC-ALICE 実験では小さい衝突系である陽子-陽子衝突実験でのジェットの生成量は QGP 物質を通過せず得られたと考え、重イオン (Pb-Pb) 衝突実験で得られたジェットの生成量との比 (R_{AA}) を求めることによって、ジェットの変貌効果を測定した [10]。この測定では 2015 年に取得した $\sqrt{s}=5.02$ TeV の衝突データより得られた、荷電粒子だけではなく中性粒子を含むジェットを測定した。その結果、Pb-Pb 衝突 (中心衝突度 0-10%) において、ジェットの生成は強く抑制されていることが確認された (図 48)。またジェット分解能パラメータ R による生成量の違いは見出されなかった。今後さらに 2018年のデータを用いることにより低い p_T 領域とより R に対し解析を行うことができると期待される。

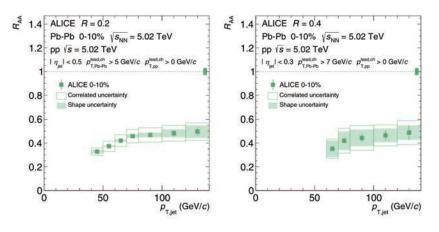


図 48 ジェットの定義半径 0.2, 0.4 における $R_{\rm AA}$ の $p_{\rm T}$ 分布

LHC-ALICE 実験における heavy flavour 生成の測定

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 [11]、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いる。我々のグループでは主に heavy flavour 起源の電子を用い、その解明を目指している。図 49 は LHC-ALICE 実験における Pb-Pb 衝突 5.02 TeV で測定された heavy quark 起源電子の nuclear modification factor (R_{AA}) という抑制効果の度合いを表す量であり、測定より R_{AA} の最小値が \sim 0.3 となり、これは最大で 70% の heavy quark 起源電子が高エネルギー原子核衝突実では抑制されていることを意味する [12]。この大きな抑制効果は heavy quark のエネルギー損失を考慮したモデルでよく再現されている。一方で Pb-Pb 衝突で測定された heavy quark 起源電子は、QGP に由来にするパートンのエネルギー損失以外にも Cold Nuclear Matter effect という QGP 生成前の物理効果により、その生成量が変化

することが予想されている。この検証のため、heavy quark 起源電子の測定を p-Pb 衝突 $5.02~{\rm TeV}$ で行った。図 $50~{\rm ti}$ p-Pb 衝突での nuclear modification factor $(R_{\rm pPb})$ を測定した結果である [13]。この測定より p-Pb 衝突での抑制効果は非常に小さく、Pb-Pb 衝突で測定された抑制は QGP 由来のものであることが確認された。これらの研究結果は ALICE 実験より投稿され、我々のグループは解析及び論文執筆で中心的な役割を果たした。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ると考え、現在 heavy flavour 起源の jet (charm,beauty quark が形成する粒子群) の測定方法の確立及び測定を進めている。図 $51~{\rm ti}$ は陽子-陽子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。この比較より QCD 計算はよく実験結果を再現していることがわかる。さらに同測定を p-Pb でも行い $R_{\rm pPb}$ を計算したところ (図 52)、jet の level でも生成量に変化がないことを確認した。今後は、charm 由来の jet と beauty 由来 jet に分離し、さらに Pb-Pb 衝突での解析を行い、parton level でのエネルギー損失機構の解明を行う。

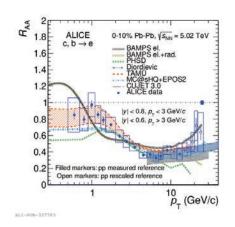


図 49 Pb–Pb 衝突 5.02TeV の heavy quark 起源電子の $R_{\mbox{\scriptsize AA}}$

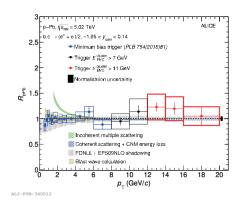
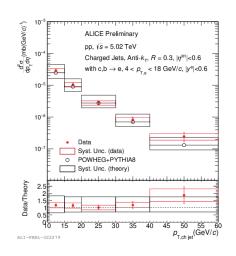


図 50 $\,$ p–Pb 衝突 5.02 TeV σ heavy quark 起源電子 σ $R_{\rm DPb}$

RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=27{ m GeV}$ における Event Plane Detector による Centrality 決定

重イオン衝突実験において Centrality とは衝突した粒子の重なりを表すパラメータである。この重なりによって衝突後の様子は異なるが、これを直接観測する手法はいまだない。そこで得られた観測量、例えば荷電粒子の数から推定されるのが一般的である。STAR 実験では従来 TPC で得られた荷電粒子の数から Centrality を計算していた。しかし、QCD 臨界点探索に敏感な量として観測されている net-charge 分布および net-baryon 分布の高次ゆらぎでは TPC の領域で Centrality を決定すると auto-correlation effect によって抑制されることが提唱された [14]。

そこで本研究では 2015 年に新たに導入された EPD を用いて Centarality を決定するフレームワークを作成することを目的としている。EPD では TPC と測定している領域が異なるため、auto-correlation effect がなくなることが期待されている。重イオン衝突実験によく用いられる Glauber model を仮定し、EPD 特有の効果を取り入れてブートストラップ法を用いることで検出器の反応をシミュレーションし、その結果から Centrality が決定される。データとシミュレーションの乖離が大きい部分があり、



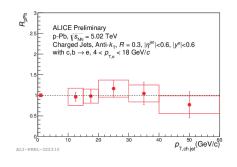


図 52 p–Pb 衝突 5.02TeV σ heavy quark 由来 jet σ $R_{\rm pPb}$

図 51 pp 衝突 5.02TeV の heavy quark 由来 jet の普遍断面積

今後それを近づけていけるように努力が必要となる。先行研究として、TPC の値を教師データに機械 学習法で Centrality を決定しているものが報告されている [15]。今後はより詳細なシミュレーション を作成し Centrality を決定するとともに、先行研究の結果との間にどのような違いなどがあるか検証 することも必要となる。

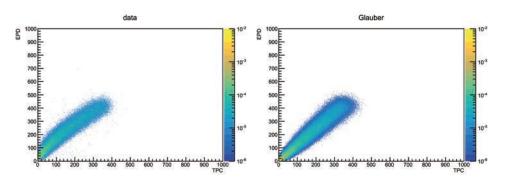


図 53 右:実際のデータ 左:シミュレーション

RHIC-STAR 実験における新しい中心衝突度の定義と保存量揺らぎの測定に与える影響

Net baryon, net charge, net strangeness といった保存量の揺らぎは、QCD 臨界点を探る重要な手がかりになると言われている。近年 net-proton の 4 次揺らぎについて非単調な衝突エネルギー依存性が報告され、臨界点のシグナルの可能性があると考えられている。この結果のさらなる理解のため、2019年からより低い衝突エネルギーに着目し、Beam Energy Scan II が開始された。

従来、STAR では TPC を用いて中心衝突度を決めている。注目する粒子と同じ η 領域で中心衝突度を決めることによって、粒子数揺らぎの測定結果に自己相関の効果が含まれている可能性が指摘されている。BES-II に先立って衝突点前後方に設置された Event Plane Detector は、中心衝突度の決定を担う

新たな検出器として期待されている。

以下の図 54 は、2018 年に測定された Au+Au 27GeV において、EPD の各 ring における MIP と mid-rapidity の粒子数 (従来の中心衝突度に相当) の相関を示したものである。EPD の内側の ring に おける spectator の効果、検出器の原理からくる Landau 揺らぎの効果が示されている。spectator の 効果を補正する手段として機械学習の手法も取り入れ、EPD の中心衝突度分解能の研究を行なった。 今後は新しい中心衝突度定義による揺らぎの結果を比較し、その変化が自己相関の減少によるものか、あるいは検出器の性能の差によるものか議論を続ける必要がある。

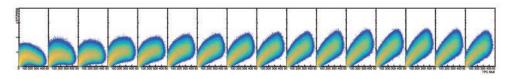


図 54 EPD 領域と TPC 領域の粒子数相関

RHIC-STAR 実験における Event Plane Detector を用いた一次の反応平面の分解能測定

Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) を用いた STAR 実験では、量子色力学(QCD)相図上の臨界点探索を目的とした第二ビームエネルギー走査実験が行われている。衝突で生成される粒子が運動量空間において非一様に分布する現象である方位角異方性の測定において、特に一方向への粒子放出の偏りを示す指向的方位角異方性 v_1 及びその傾き dv_1/dy' は一次相転移付近で特徴的な振る舞いを示す [26]。 v_1 は,粒子の方位角 ϕ と反応平面(衝突パラメータとビーム方向の間の面)の方位角 Ψ_1 から計算される量であり、 v_1 の精度は反応平面の分解能に依存するため、高い精度で反応平面を決定することは重要である。STAR 実験が 2018 年に新しく導入した検出器 Event Plane Detector (EPD) は、以前よりも細かく、広い領域において反応平面の測定を行い、観測領域とは異なる領域で反応平面の決定を行うため、観測量に含まれる自己相関を取り除いた測定を行うことができる。

図 55 は、EPD と Time Projection chamber (TPC) で決定した反応平面の分解能の比較を、衝突中心度 (centrality) ごとに行ったものである。この結果から、centrality=20-30% 付近においては EPD の分解能は TPC の分解能より約 5 倍良いことが明らかになっている。今後は EPD で測定した反応平面を用いた v_1 測定の結果が明らかになり、QCD 相構造解明へのさらなるアプローチが期待される。

RHIC-STAR 実験における Λ 粒子の偏極の測定

原子核衝突実験では、非中心衝突において生成された系は回転していると予想されていた。そこで RHIC-STAR 実験ではこれまでに $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}}=7.7$ –200 GeV にかけて Λ 粒子を用いて偏極が測定された [16, 17, 18]。この測定で有限な偏極のシグナルが観測されたことで系が回転している実験的な証拠となった。また、原子核衝突の初期に発生する磁場も偏極に影響を及ぼすと考えられる。磁場からの寄与を受ける場合、粒子と反粒子は互いに逆方向に偏極させられる。そのため Λ 粒子と $\overline{\Lambda}$ 粒子の偏極の違いを測定すると磁場を直接的に測定することができる。しかしこれまでの測定ではこの差は観測されていなかった。また以前までの測定では $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}}=39~\mathrm{GeV}$ と 200 GeV の間には大きなエネルギーギャップがあった。

そこで本研究では RHIC-STAR 実験で測定された $\sqrt{s_{
m NN}}=54.4~{
m GeV}$ のデータを用いて Λ 粒子の偏極

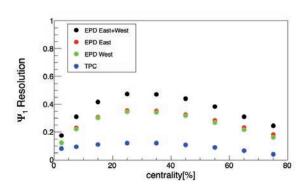


図 55 検出器 EPD と TPC の分解能の比較

を測定した。図 56 は Λ 粒子の偏極の衝突エネルギー依存性である。偏極の有限なシグナルが観測されたことからこのエネルギーでの原子核衝突でも生成された系は回転していることがわかった。また、衝突エネルギーが低くなるほど Λ の偏極は大きくなることがわかった。一方で Λ 粒子と $\overline{\Lambda}$ 粒子の偏極の差は観測されなかったが、系統的に $\overline{\Lambda}$ の方が大きくなっている。これは磁場から寄与を受けた時の予想と一致している。RHIC-STAR 実験では 2019 年から低エネルギー領域で高統計なデータを測定するビーム走査実験 Π が行われている。これを用いることでさらに詳細な測定が行えると期待されている。

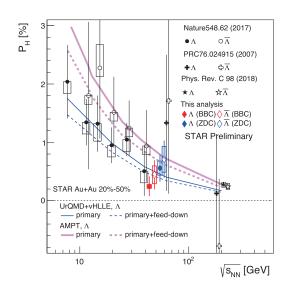
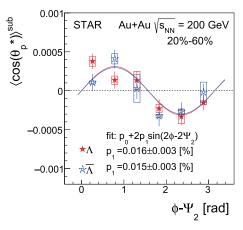


図 56 Λ 粒子の偏極の衝突エネルギー依存性

局所渦による偏極

高エネルギー原子核衝突において生成される物質は観測史上最速で回転($\omega\sim 10^{22}~s^{-1}$)していることが粒子スピン偏極測定から判明した [21, 22]。この系全体の "渦"に加えて、様々な局所渦の生成が予測されている。特に楕円フローと呼ばれる集団膨張に起因するビーム軸を回転軸とした局所渦の観測が期待されている。この局所渦は系全体の渦に比べて時間的に後から発展するために、渦からスピン偏

極への緩和時間を探る上で重要な情報となる。我々のグループは、STAR 実験で取得された $\operatorname{Au+Au}\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV のデータを解析し、ビーム軸方向のスピン偏極 P_z の測定を行った [23]。図 57(左) は Λ ($\bar{\Lambda}$) 粒子の P_z の方位角依存性である。楕円フローから予測通り、偏極が方位角に依存し、かつその符号が反転している。さらに偏極強度は周辺衝突において増大している(図 57(右))。局所熱平衡を仮定した流体モデル [24] や輸送モデル [25] では、符号自体が実験結果と一致していない。Blast-Wave と呼ばれる集団膨張モデルに基づき、楕円フローや粒子収量から決定されたパラメータを用いて偏極を計算したところ、実験結果を再現できることがわかった。理論モデル間で不一致がみられており、業界内で引き続き議論が行われている。これらの結果は Physical Review Letters に出版され、我々のグループは解析および論文執筆において中心的な役割を果たした。今後は、衝突における渦構造やスピン偏極のメカニズムを解明するために、異なる粒子種や衝突エネルギーを調べて行く。



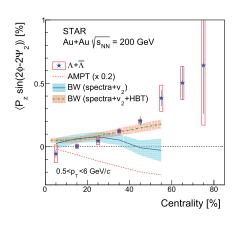


図 57 (左図) $Au+Au\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV におけるビーム軸方向 Λ 粒子偏極($P_z=3\langle\cos\theta_p^*\rangle/\alpha_H$)の方位角依存性、(右図) そのフーリエサイン 2 次成分の中心衝突度依存性。実線および破線は Blast-Wave モデルによる計算、点線は輸送モデル(AMPT)による計算である。

RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200 {\rm GeV}$ におけるバリオンバリオン相互作用による dibaryon 探索 近年の LatticeQCD 理論計算によると、2つのバリオン同士が束縛状態をとった、6つのクォークから構成される原子核、dibaryon の存在が予想されている。特にその中でもストレンジネスを含むバリオンであるハイペロン粒子のうちの一つ、ラムダ粒子、オメガ粒子の束縛状態である、「H-dibaryon」、「di-Omega」の存在が期待されている [19]。バリオン2粒子による散乱パラメータは、相関関数の構造に現れる。よって、実験的には、2粒子相関法を用いて相関関数を測定し、散乱パラメータを算出し、束縛状態の有無や、束縛エネルギーを求める。先行実験として、STAR 実験から、2015 年にラムダ粒子相関関数の初測定結果が報告されている [20]。しかし、その他の実験報告を含め、未だ、データの統計的不確実性が大きく、明確な束縛状態の理解には至っていない。

本研究では、重イオン衝突実験、STAR 実験金+金衝突 $\sqrt{s_{NN}}=200~{\rm GeV}$ における 2011 年、2014 年、2016 年の高統計データを用いて、ラムダ粒子、グザイ粒子、オメガ粒子の相関関数測定を行っている。より統計的不確実性の小さな結果をもとに、束縛状態について明らかにすることを目的としている。またグザイ粒子の相関関数測定は、今回が実験史上初測定となり、その相関関数の構造から、ストレンジネス数に依存する、強い相互作用による効果を測定する。現在、STAR 実験において、ラム

ダ粒子、グザイ粒子ともに、十分な高統計で、再構成可能であることが確認できている。今後、相関関数測定の後、バリオン相互作用を記述する理論モデルによるフィットを行い、散乱パラメータを求め、dibaryon 生成、束縛状態の有無を探索する。

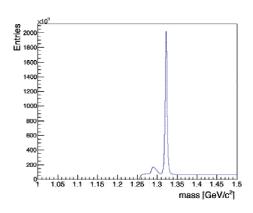


図 58 グザイ粒子不変質量分布

RHIC-STAR 実験における臨界点探索

QCD 相図中に臨界点が存在するかどうかは、高エネルギー物理学における究極的な問いの一つである。 臨界点に敏感な観測量として注目されているのが、保存量分布の高次揺らぎである。臨界点まわりでは 系の相関長が発散するため、高次揺らぎの急激な増大が期待される。

RHIC-STAR 実験では、2010 年から 2017 年にかけて、核子あたりの衝突エネルギー 7.7 GeV から 200 GeV まで、計 8 つのエネルギーにおいて金原子核の衝突実験を行った。図 59 は正味陽子数分布の 3 次揺らぎ(左)、および 4 次揺らぎ(右)の衝突エネルギー依存性である [27]。20 GeV 以下において 4 次揺らぎが一旦減少した後、7.7 GeV において急激な増大していることがわかる。この非単調性が理論モデルの予測 [28] と定性的に非常に良く似ていることから、臨界点のシグナルではないかと言われている。今後より決定的な信号を測定するために、2019 年から 2021 年にかけて 20 GeV 以下に焦点をあてた実験が進行中である。

(2) 稀少 RI リングでの質量測定

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) の質量測定に取り組んでいる。2019年度は、2018年 11 月に行った Ni 領域での質量測定実験のデータ解析を引き続き進めている。2019年 12 月には、Ni 領域での質量と寿命測定に関する実験プロポーザルを理研 RIBF に提出した。

稀少 RI リングでの精密質量測定に用いる飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングでは、リング内におけるイオンの飛行時間からイオンの質量を精密に導出するため、高時間分解能($\sigma < 50~\mathrm{ps}$)の飛行時間検出器が不可欠である。また、飛行時間測定のスタート信号を発生する検出器では、通過粒子のエネルギーストラグリングを可能な限り抑える必要がある。小沢研究室

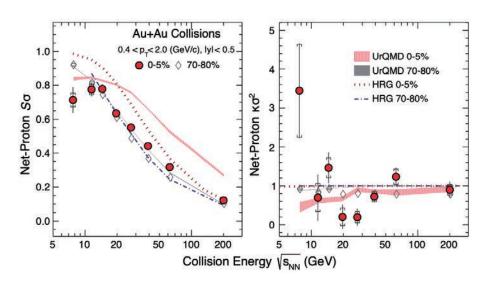


図 59 正味陽子分布の 3 次、 4 次揺らぎの衝突エネルギー依存性。

ではこれらの要求を満たす飛行時間検出器の開発を行っている。検出器は一枚の二次電子発生用薄膜と複数枚の平行に配置した電極、永久磁石からなり、粒子通過に伴って薄膜から発生した二次電子を、交差電磁場でマイクロチャンネルプレート検出器へ誘導し検出する仕組みである。

これまでの開発では、検出器内での放電が原因で安定動作できないことが課題だった。今年度は、電場強度を下げることで安定動作可能な電磁場設定を確立し、本番環境と同等の重イオンビームを使用して性能試験を行った。性能試験では、放射線医学総合研究所 HIMAC で供給される 84 Kr ビーム(200 MeV/u)を検出器に照射し、時間分解能と検出効率を評価した。時間分解能は $\sigma < 21$ ps、検出効率は二次電子発生用薄膜のほぼ全面(ϕ 40 mm)で 90% 以上であり、稀少 RI リングでの実用に必要な性能が得られた。また、 84 Kr ビームまたは 40 Ar ビームを Be 標的に入射して核破砕反応により生成した二次粒子を検出器に照射し、検出効率の原子番号(Z)依存性を調べた。本調査により、本検出器は二次電子発生用薄膜としてアルミ蒸着マイラー膜を使用した場合に、 $Z \ge 18$ のイオンビームであれば約80% 以上の効率で検出可能であることがわかった。

陽子ドリップライン核 ¹⁷F の反応断面積測定

不安定核における興味深い現象の一つにスキン構造(原子核表面に現れる陽子もしくは中性子のみの層)が挙げられる。スキンの厚さ(Δ r)は原子核中の陽子密度分布半径(rp)と中性子密度分布半径(rn)の差として定義されるため、 Δ r を実験的に知るためには、rp と rn の導出が必要となる。天然に存在しない不安定核は人工的に生成する必要があり、また短寿命で崩壊することから、現状、スキン厚の測定手法は必ずしも確立されているわけでない。そこで、本研究では陽子標的を用いた反応断面積(σ R)測定に注目する。 σ R は原子核の大きさに感度を持つことから、 σ R 測定は半径を知る上で有効とされている。特に、反応標的として陽子標的を用いることで、rp と rn の導出、つまり、 Δ r を導出できると期待されている。これは、核子核子全断面積が、"陽子一陽子"と"陽子一中性子"で異なることに基づく。本研究では、陽子ドリップライン核 r に注目し、固体水素標的を用いた r 限測定を実施した。実験は放射線医学総合研究所の r HIMAC で行った。令和元年度は主にデータ解析を進めた。

図 60 は現在得られている σ R の解析結果を示す。核子当たり数 10 から数 100 MeV までの広い領域において、 σ R のエネルギー依存性を取得できた。図中のグラウバーモデルは、中高エネルギー領域における代表的な原子核反応モデルであり、入射核および標的核の密度分布によって σ R を表すことができる。今後は、 17 F のスキン厚の導出に向け、実験データの更なる解析と、グラウバーモデルの検証を進める予定である。

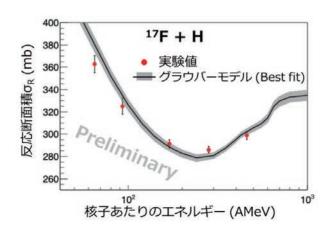


図 60 17 F と陽子標的との反応断面積(σ R)のエネルギー依存性。赤丸は本研究で得た実験値、実線はグラウバーモデルを用いたフィッティング結果を表す。

異なる Si 標的による核偏極の生成

我々のグループは、応用加速器部門において 偏極イオン源からの偏極ビームを利用した不安定核の核モーメントの測定を行なっている。これまでは、偏極陽子ビームの立ち上げ、および不安核の核モーメント測定のためのベータ線を指標とした核磁気共鳴(β -NMR)装置の立ち上げなどを行なってきた。 2019 年度は、12 MeV 偏極陽子ビームを用い、不安定核 29 P ($T_{1/2}=4.2~\mathrm{s}$)をプローブとして、異なる 4 種類の Si 標的(n-type 低-抵抗、n-type 高-抵抗、p-type 低-抵抗、p-type 高-抵抗)に対して、核偏極量の測定を行った。実験では、静磁場を固定(約 $1.6\mathrm{kG}$)し、高周波磁場 (RF)を掃引した。測定結果を図 61 に示す。 $2.95\mathrm{MHz}$ 付近の凹みが、 29 P の核磁気モーメント(1.2349 n.m.)に相当している。 凹みの深さは、核偏極量に相当している。実験結果から、Si 標的の違いにより核偏極量が大きく変わることがわかった。特に、Si (n-type 高-抵抗)および Si (p-type 高-抵抗)で大きな核偏極量が観測された。 Si 標的の違いによる核偏極量の大きな変化は、 Si 標的中での超微細相互作用が異なっていることを示唆している。今後は、緩和時間、共鳴幅などの測定を行い、 Si 標的中での超微細相互作用を解明していく。

構造材料計測用マイクロビーム分析装置による水素イメージング測定

筑波大学 6 MV タンデム加速器において、構造材料の組成解析を目的としたマイクロビーム分析装置の開発を進めている。マイクロビーム分析装置は、ライン長が 8.73 m であり、Oxford Microbeams 社製 OM-2000 を用いて MeV イオンビームの収束をおこなう。これまでに、3 MeV の陽子ビームと 9 MeV の 4 He ビームなどのマイクロビーム形成試験を実施しており、約 1.5 μ m のビーム収束径を達成している。水素の測定では、 4 He ビームによる透過型の弾性反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection

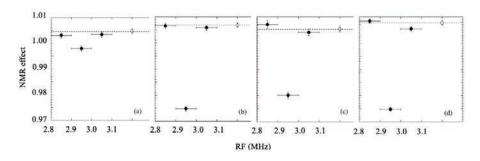


図 61 異なる Si 標的に照射した際の NMR スペクトル。(a) Si (n-type 低-抵抗) の結果。(b) Si (n-type 高-抵抗) の結果。(c) Si (p-type 低-抵抗) の結果。(d) Si (p-type 高-抵抗) の結果。黒丸は高周波磁場 (RF) をかけた結果、白丸は RF なしでの結果を示す。

Analysis:ERDA) を用いている。高エネルギーイオン(>0.75 MeV/核子)を標的軽元素原子核に入射すると、角度やエネルギー選択的な核弾性散乱過程を引き起こす。特に 7 - 10 MeV の 4 He イオン入射による水素原子核の反跳断面積は前方に集中するとともに、クーロン散乱過程よりも 2 桁程度大きな断面積を有する。また、マイクロビーム走査と合わせて、広い立体角全体で反跳水素粒子を検出することにより、水素原子の 2 次元イメージング測定が可能になる。反跳水素のエネルギーは水素がイオンと衝突した位置の深さ(表面からの距離)を反映しているため、材料中の水素の 3 次元分布情報へと変換可能である。水素チャージしたアルミニウム材料中の水素に対して、8 MeV の 4 He ビームを用いた透過型 ERDA 法の概略と表面から 2 μ m ごとの深さ方向の水素分布の断層画像を図に示す [1]。図では明るいところほど水素濃度が高いことを示しており、水素は表面層よりも深部に存在し、直径 10 μ m 程度の集積体を形成して、3 次元的にも不均一に分布していた。水素濃度は 最大で $1.6 \times 10^{20}~{\rm cm}^{-3}$ 程度であった。

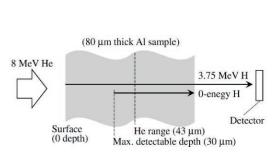


図 62 透過型 ERDA 測定法概略図

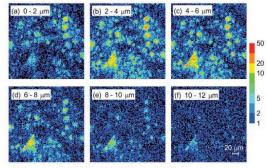


図 63 水素チャージしたアルミニウム材料中の水素分布

加速器質量分析法を用いた塩素 36 測定における低バックグラウンド検出手法の開発

 36 Cl (半減期 $^{30.1}$ 万年) は宇宙線生成核種として知られており、地球科学分野等で幅広く応用されている。 36 Cl の測定は、半減期が長く放射線計数法による測定が困難なため、加速器質量分析法 (AMS) が主に用いられている。しかし、AMS では同重体 36 S が妨害核種となり、 36 Cl の高感度測定の妨げとな

る。そこで、筑波大学 AMS システムでの 36 Cl 測定における 36 S の影響低減を目的として、 36 Cl の最適な検出エネルギーおよび測定スペクトルの解析手法などを考察した。筑波大学 AMS システムでは、加速電圧 6.0 MV により、 36 Cl⁸⁺ を 54.0 MeV に加速して測定をおこなっている。ガス検出器内における 36 Cl と 36 S の損失エネルギー差を大きくして、測定スペクトル上でそれぞれの核種を分離識別することができる。しかしながら、加速器の荷電変換炭素フォイルでの荷電変換効率(36 Cl- \rightarrow 36 Cl⁸⁺)が 8% と悪く、得られるカウント数の少なさが問題となっていた。そこで、加速電圧 6.0 MV においてより荷電変換効率が高い 36.0 MeV(36 Cl⁵⁺; 15%, Ar ガス)や 48.0 MeV(36 Cl⁷⁺; 12%, 炭素フォイル)のエネルギーについて測定した(図 64)。特に 36 Cl⁷⁺ の 48.0 MeV の場合は、測定スペクトル上での分離度 M' [2] が 1.4 ch と、54.0 MeV における 1.5 ch より劣るものの、同程度のバックグラウンド同位体比を得ることができた。また、測定データの解析によって 36 S の影響を低減させる手法を開発した。ゲート範囲の見直しや、全粒子エネルギーデータの活用などを検討した結果、バックグラウンド同位体比として 36 Cl/Cl < 4×10^{-16} を得た。

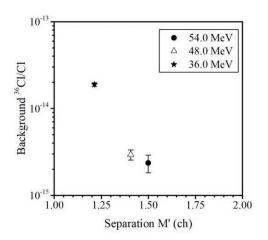


図 64^{-36} Cl/Cl バックグラウンドに関するエネルギー依存性と 36 Cl および 36 S の分離度.

宇宙線生成核種 10Be と 36Cl の降下フラックス

宇宙線は平均エネルギーが 1 GeV 程度の高エネルギー粒子であり、地球へ入射すると地球を構成する元素との間で核反応を起こし様々な粒子を生成する。この時に生成される粒子の中でも 10 Be と 36 Cl は高生成率 (10 Be; 290 atoms m $^{-2}$ s $^{-1}$, 36 Cl; 25 atoms m $^{-2}$ s $^{-1}$) かつ長寿命 (10 Be; 1. 36 Ma, 36 Cl; 0.301 Ma) である。現在では、年代測定や環境トレーサー、過去の宇宙線強度変動の復元など様々な分野で利用されている。 10 Be と 36 Cl は大気中で類似の挙動を示すと考えられているものの、測定が困難なこともあって長期的に同時に観測された例は少ない。よって、 10 Be と 36 Cl 降下フラックスの測定をおこない、降下フラックス同士の相関を検討することで、 10 Be と 36 Cl の環境中での振る舞いについて検討した。 2014 年 1 月から 2018 年 12 月までのつくば市における 10 Be, 36 Cl 降下フラックスを一か月ごとに測定した。 10 Be 降下フラックスは 20 50 ± 2 から (20 1. 20 ± 0.1) × 10 3 atoms m $^{-2}$ s $^{-1}$ の範囲を変動していた。結果から、 10 Be, 36 Cl 降下フラックスの相関を計算すると、相関係数 r = 0.51、p<0.01であり、 20 2 つの降下フラックスは相関を持っていることがわかった。観測地点によって 10 Be, 36 Cl 降下

フラックスは季節変動を持つことが示唆されている。得られた結果を各月ごとに平均すると,春と秋に降下フラックスが増大する二山型の傾向がみられた。これは偏西風の影響等により,春と秋に成層圏と対流圏の交換速度が上昇するためである。図 65 につくば市における月平均の ¹⁰Be と ³⁶Cl の降下フラックスを示す。

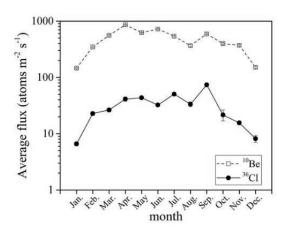


図 65 茨城県つくば市における ¹⁰Be, ³⁶Cl 降下フラックスの月平均変動

(3) 改良 Wilson クォークを用いた格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD 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、改良ウイルソン型格子クォークを用いた有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究を行なっている。2019 年度も、QCD の相構造やクォーク物質の熱力学的諸性質の共同研究を推進した。

有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究の多くは、計算量が少ないスタガード型格子クォークを用いて行われているが、連続極限で QCD を再現することが証明されていないという本質的問題を孕んでいる。我々は、理論的基礎が確立している Wilson 型格子クォークを用いて QCD 相転移近傍の温度でクォーク物質がどのような熱力学特性を示すかの大規模シミュレーション研究を推進している。Wilson 型クォークは、連続極限の正しさが保証されている反面、有限の格子上ではカイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル対称性に関わる物理量に関して格子化誤差が大きく、それを取り除いて物理量を計算するために膨大な計算資源が要求されるという困難があった。また、並進対称性に伴う保存カレントとして定義されるエネルギー運動量テンソルは系の力学特性を調べる上で基本的な観測量だが(例えば、対角成分はエネルギー密度や圧力などの情報を含み、2点相関関数から様々な粘性率が導かれる)、格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、複雑な繰り込み操作を行わなければ意味のある評価が出来なかった。

我々は、Gradient flow(勾配流)に基づいて鈴木博らにより開発された $\mathbf{SF}t\mathbf{X}$ 法 (small flow-time expansion method) を応用して、これまでの課題を克服した大きなブレークスルーを目指している。 勾配流とは、仮想的な時間パラメータ t (flow-time) を導入して一種の拡散方程式により場の量を変形 させる手法で、t>0 ではフローさせた演算子が紫外発散も同一点特異性も持たないという目覚ましい

特性を持っている。SFtX 法は、勾配流のこの有限性を活用して、連続極限のくりこまれた物理量に対応する量を格子上で評価する一般的な計算方法である。格子化により有限格子上では陽に壊されてしまう対称性と結びついた物理量でも直接評価できる。

クォークを無視したクエンチ近似 QCD による試験研究によって、SFtX 法の有用性が示されている。 我々は、SFtX 法が並進対称性の破れだけでなく、Wilson 型クォークによるカイラルの破れの困難に も有効であることに着目し、2+1 フレーバーの動的なクォークを含む現実的 QCD に SFtX 法を応用 した一連の研究を推進している。

2016-2017 年度に実行した u,d $クォークが現実よりやや重い場合の <math>N_f=2+1$ QCD 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る状態方程式の結果を良く再現することを示し、さらに、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、グルオンを用いた定義式と、それを、連続理論のカイラル関係式を用いてクォークを用いて表し直した評価式の両方で計算し、有限の格子間隔でも両者が極めてよく一致することを示した。通常の計算方法でスタガード型クォークを用いた研究では、この程度の格子間隔では両者は 2 桁も違っており、SFtX 法が物理的に信頼できる結果を得る上で極めて有用であることをあらわしている。

2018 年度からは、この研究を発展させ、現実のクォーク質量(物理点)での研究、及び、u,d クォークが重い場合に格子間隔を変えたシミュレーションを推進している。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間の大きな削減ができたが、物理点や格子間隔が細かい格子の配位生成には膨大な計算が要求され、様々な計算機資源を動員して大規模シミュレーションを遂行している。

2019 年度には、SF $_t$ X 法の改良として、くりこみスケールの研究と、マッチング係数における高次項の効果の研究、エネルギー運動量テンソルの相関関数の研究などを $N_f=2+1$ QCD で行った。また、再重み付け法を用いたクォークが重い極限近くの $N_f=2+1$ QCD の相構造の研究を進め、重クォーク展開の高次項の効果や格子間隔依存性の研究を行った。

SFtX 法におけるくりこみスケールの研究

SFtX 法では、格子上で測った t>0 でのフローさせた演算子と求める物理量をマッチング係数で結びつけ、 $t\to 0$ の極限を取ることにより、物理量を計算する。QCD を含む漸近自由な理論では、 $t\to 0$ の極限近傍で、マッチング係数を摂動論により評価することができる。マッチング係数を計算するときのくりこみスケール μ は、計算の摂動計算が破綻しない限り、どんな値を取っても良く、最終的な物理量の結果は μ に依存しないはずである。通常は、フローさせた演算子の自然なスケールの一つである $\mu_d=1/\sqrt{8t}$ (これは勾配流により場が平均化される領域の拡がりの逆数に等しい)を取るが、それと同程度の μ ならば、何をとっても良い。

他方、摂動展開の質は、 μ をどう取るかで変化する。 $\mathrm{SF}t\mathrm{X}$ 法で $t\to 0$ 外挿を実行する上で、どこまで大きな t を利用できるかは実用上重要である。 $\mu_d=1/\sqrt{8t}$ の形から分かるように、t を大きくすると赤外領域に近づき、マッチング係数の摂動計算が破綻する。

我々は、現実のクォーク質量(物理点)での研究を、PACS-CS Collaboration のゼロ温度配位が生成された格子間隔 $0.09 \mathrm{fm}$ の格子で進めている。この研究や、u,d クォークが重い場合に格子間隔を粗くした研究において、いくつかの物理量に関して、 $t \to 0$ 外挿を行うための線形領域が十分見えなくなるという現象を経験した。その一つの要因として、格子間隔がやや粗くなったために、摂動計算が破綻す

る無次元の flow-time t/a^2 が小さくなってしまい、 $t\to 0$ 外挿の十分な領域を確保できなくなったことが考えられる。

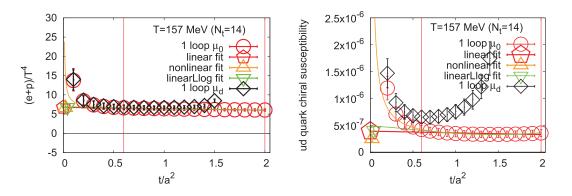


図 66 グラジエントフローに基づく SFtX 法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究:現実のクォーク質量におけるくりこみスケール依存性。左図:エントロピー密度 $\epsilon+p$ 。右図:ud クォークのカイラル感受率の非連結部分。 T=157 MeV での結果。横軸は無次元の flow-time t/a^2 で、物理的結果は $t\to 0$ 外挿によって得られる。(論文 1)

図 66 に、くりこみスケールとして、従来の μ_d を使った結果と、最近提案された $\mu_0=1/\sqrt{2e^{\gamma_E}t}$ (γ_E はオイラー数)を使った結果を比較する。左図は、エントロピー密度 $\epsilon+p$ の flow-time 依存性。右図は、ud クォークのカイラル感受率 disconnected part 依存性。 μ_d を使った結果が $t/a^2 \leq 1.5$ までしか無いのは、そこで running coupling が大きくなってしまい、摂動展開が破綻するからである。 $\mu_0 \simeq 1.5 \ \mu_d$ では、 $t/a^2 \leq 3$ まで摂動計算可能である。左図より、 μ_0 スケールにより、より安定した $t \to 0$ 外挿が可能であり、その結果は μ_d による $t \to 0$ 外挿と一致していることがわかる。右図より、 μ_d スケールでは $t \to 0$ 外挿をどのようにとって良いか分からない場合でも、 μ_0 スケールにより $t \to 0$ 外挿が可能となる場合があることがわかる。(論文 1)

SFtX 法を用いた物理点有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究

上記の結果を得て、 μ_0 スケールを採用して物理点有限温度 (2+1)-flavor QCD の熱力学量を評価したものが、図 67 である。ただし、 $T\simeq 122-146$ MeV のシミュレーションは、まだ進行中で、統計が十分ではない。また、ud クォークがやや重い場合の経験から、T>247 MeV $(N_t\le 8)$ では格子化誤差が小さくないと予想される。

図 67 や、他の物理量の挙動から、 $T \simeq 122-146~{
m MeV}$ が相転移温度近傍の臨界領域にあることが示唆される (論文 1)。精密な相転移温度を得るために、この温度域でのシミュレーションを推進中である。

SFtX 法における高次マッチング係数の効果の研究

上記の研究は、マッチング係数の 1 ループ摂動計算の結果を用いたものだが、最近、エネルギー運動量テンソルに関するマッチング係数の 2 ループ計算の結果が公表された(R.V. Harlander et. al, Eur. Phys. J. C78, 944 (2018))。図 68 でその効果を研究した。 μ_0 スケールを採用し、統計が十分ある、u,d クォークが現実よりやや重い場合で試験した。左図のエントロピー密度では、1 ループの結果と 2 ループの結果がよく一致していることがわかる。他方、中央図のトレース・アノマリでは、T>250

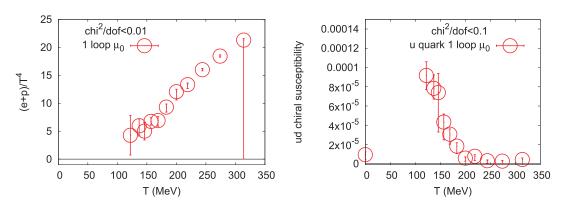


図 67 グラジエントフローに基づく SFtX 法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究:現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。 左図:エントロピー密度 $\epsilon+p$ 。右図:トレース・アノマリ $\epsilon-3p$ 。 横軸は温度 T。 (論文 1)

MeV でズレが見える。

実は、Harlander らの2ループ計算では、クォークの運動方程式を使って独立な演算子を減らしている。クォークの運動方程式はエネルギー運動量テンソルの対角成分にのみ作用するので、エントロピー密度には影響しないが、トレース・アノマリには効果がある。運動方程式は、SFtX 法で連続極限外挿を行なった後では効果が無いはずだが、有限格子上では格子化誤差を持ちうる。高温領域でのズレの原因を明確にするために、Harlander らのマッチング係数の1ループ部分だけを取り出してトレース・アノマリを評価したものが、図 68 の右図である。これから、ズレはクォークの運動方程式によるものであることがわかる。この結果は、 $N_t \leq 10$ の格子では、運動方程式に無視できない格子化誤差があることを示唆している。

なお、中央図と右図の比較から、運動方程式を使った1ループの結果と2ループの結果はよく一致して おり、左図のエントロピー密度と同様に、マッチング係数の高次項の効果そのものは小さいことが結論 できる。(論文1)

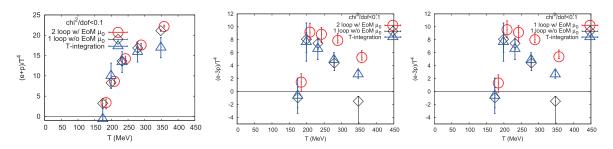
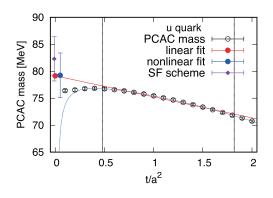


図 68 グラジエントフローに基づく SFtX 法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究:ud クォーク質量がやや重い QCD の結果。 2 ループ マッチング係数の効果。 左図:エントロピー密度 $\epsilon+p$ 。 中央図、右図:トレース・アノマリ $\epsilon-3p$ 。 右図では、 1 ループ マッチング係数で、運動方程式を使った結果との比較。 横軸は温度 T。 (論文 1)

SFtX 法による PCAC クォーク質量の研究

SFtX 法を用いれば、カイラル対称性と関係した他の様々な物理量も Wilson 型クォークで直接評価できると期待している。今回は、ud クォークが現実よりやや重い場合のゼロ温度格子で、クォークの

PCAC 質量を SFtX 法により評価した。図 69 に、ud クォーク質量および s クォーク質量の $t\to 0$ 外揮を示す。SFtX 法によるクォーク質量が、通常の Schrödinger 汎関数法による結果とよく一致していることがわかる (論文 6)。これを発展させて、SFtX 法による K 中間子バッグパラメータ B_K の計算を行い、CP の破れの研究につなげることを目指している(国際会議発表 7)。



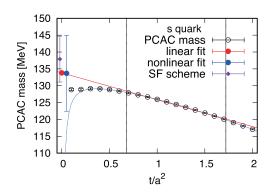


図 69 グラジエントフローに基づく SFtX 法による PCAC クォーク質量。ud クォーク質量がやや重い QCD の結果。左図:ud クォーク質量。右図:s クォーク質量。横軸は無次元の flow-time t/a^2 で、物理的結果は $t\to 0$ 外挿によって得られる。(論文 6)

再重み付け法によるクォークが重い極限近くの $N_f=2+1 \mathrm{QCD}$ の相構造の研究

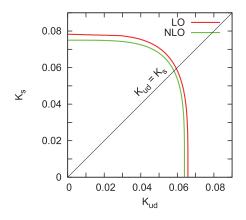
また、再重み付け法を用いたクォークが重い極限近くの $N_f=2+1$ QCD の相構造の研究を進め、重クォーク展開の高次項の効果や格子間隔依存性の研究を行った。 (論文 7)

図 70 に、クォークが重い極限近くの $N_f=2+1$ QCD の相構造の結果を示す。縦軸は ud クォーク質量の逆数に対応する ud クォーク ホッピングパラメータで、横軸は s クォーク質量の逆数に対応する s クォーク ホッピングパラメータ。原点はクォーク質量 = ∞ の純ゲージ QCD で、有限温度相転移が 1 次相転移であることが知られている。クォーク質量を小さくしていくと、有限温度 QCD 相転移が連続的なクロスオーバーに変わる。両者を区別する臨界線の位置を、再重み付け法を使ってポリアコフ・ループの分布関数の変化から計算した結果が、図 70 に示されている。 $N_f=2$ QCD でのシミュレーション結果を、重クォーク展開を用いて $N_f=2+1$ QCD の相構造に一般化した。

重クォーク展開の最低次を取り入れた再重み付け法の結果(赤線)が、重クォーク展開のその次の次数の効果を取り入れると、緑線の位置に変化する。左図は $N_t=4$ 格子での結果で、格子間隔がより小さい $N_t=6$ 格子では、右図のようになる。これから、格子間隔依存性がまだ大きく、また、連続極限に近づくにつれて重クォーク展開の収束性が悪くなることがわかる。定量的な予言を行うためにはさらに N_t を大きくすることが必要だが、有限密度研究では計算コストを抑える上で重クォーク展開が有用であり、より高次の重クォーク展開でどこまで改良できるかが、次の研究の一つの方向性と考えられる。

その他

SFtX 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た(論文 3、国際会議発表 7、8)。



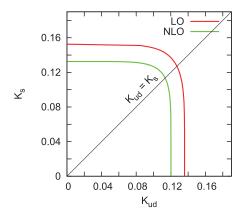


図 70 再重み付け法によるクォークが重い極限近くの $N_f=2+1$ QCD の相構造。縦軸は ud クォーク ホッピング パラメータで、横軸は s クォーク ホッピングパラメータ。K=0 がクォーク質量 $=\infty$ に対応する。有限温度 QCD 相転移が、原点近傍では 1 次相転移だが、右上領域ではクロスオーバーとなり、2 つの領域の境界となる臨界線が示されている。LO は重クォーク展開の最低次を取り入れた再重み付け法の結果で、NLO はその次の次数の効果を取り入れた結果。左図: $N_t=4$ 格子。右図: $N_t=6$ 格子。(論文 7)

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。SFtX 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 2)。

参考文献

- $[1]\,$ A. Yamazaki, K. Sasa et al., AIP Advances 9, 105111 (2019).
- [2] S. Hosoya, K. Sasa et al., Nucl Instrum Meth B 439 (2019) 131-135.
- [3] 奈良女子大学 港陽子 (2019), 令和元年度修士論文
- [4] A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, ALICE Collaboration, ALICE-PUBLIC-2019-005, http://cds.cern.ch/record/2696471
- [5] Design and Performance of a Silicon Tungsten Calorimeter Prototype Module and the Associated Readout, T. Awes, C.L. Britton, T. Chujo, T. Cormier, M.N. Ericson et al., e-Print: 1912.11115 [physics.ins-det]
- [6] Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, S. Acharya et al., (ALICE Collaboration), Phys. Rev. D 100, 092004 (2019)
- [7] "Jet quenching and acoplanarity via hadron-jet measurements in pp and PbPb collisions at 5.02 TeV with ALICE", Y. Mao (for the ALICE collaboration), QM2019 proceedings.
- [8] L. Lamers "Neutral Meson and Jet Reconstruction in Heavy Ion Physics," n.d., 73.
- [9] (ALICE Collaboration), Eur. Phys. Journal C 78, no. 3 (2018)
- [10] ALICE Collaboration, Phys. Rev. C. 101.034911(2019)
- [11] S. Wicks et al., Nucl. Phys. A. 783, 493 (2007)
- [12] A. Shreyasi et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B 804, 135377 (2020)
- [13] J. Adam et al. (ALICE Collaboration), JHEP 02, 077 (2020)
- [14] X. Luo, J. Xu, B. Mohanty, and N. Xu, J. Phys. G40,105104 (2013)
- [15] Y. Sato, Centrality determination with the Event Plane Detector for fluctuation measurements from STAR, Quark Matter 2019, 4 Nov 2019, Wuhan
- [16] B. I. Abelev et al, STAR Collaboration, Phys. Rev. C 76, 024915 (2007)
- [17] L. Adamczyk et al, STAR Collaboration, Nature 548, 62 (2017)
- [18] J. Adam et al, STAR Collaboration, Phys. Rev. C 98, 14910 (2018)
- [19] T. Inoue et al. (HAL QCD Collaboration) Phys. Rev. Lett. 106, 162002 (2011)
- [20] L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration) Phys. Rev. Lett. 114, 022301 (2015)

- [21] L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Nature 548, 62 (2017)
- $[22]\,$ J. Adam et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. C 98, 014910 (2018)
- [23] J. Adam et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. 123, 132301 (2019)
- $[24]\,$ F. Becattini and Iu. Karpenko, Phys. Rev. Lett. 120, 012302 (2018)
- $[25]\,$ X.-L. Xia et al., Phys. Rev. C 98, 024905 (2018)
- [26] J. Steinheimer et al., Phys. Rev. C 89, 054913 (2014)
- [27] J. Adam et al. (STAR collaboration), arXiv:2001.02852 (2020)
- [28] M. A. Stephanov, Phys. Rev. Lett. 107, 052301 (2011)

〈論文〉

- 1. Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Asobu Suzuki, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow, PoS (LATTICE 2019) 088 (2020)
- 2. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow, PoS (LATTICE 2018) 164 (2019)
- 3. Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, and Takashi Umeda, Study of energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD for QGP viscosities, PoS (LATTICE 2018) 166 (2019)
- 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) 173 (2019)
- Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Atsushi Kiyohara, Mizuki Shirogane, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Determination of the endpoint of the first order deconfiniement phase transition in the heavy quark region, PoS (LATTICE 2019) 071 (2020)
- 6. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow, PoS (LATTICE 2019) 191 (2020)
- Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Atsushi Kiyohara, Mizuki Shirogane, and Takashi Umeda, (WHOT-QCD Collaboration), End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy quark region by reweighting from quenched QCD, Phys. Rev. D 101, No.5, ref.054505, pp.1-17 (2020)
- 8. Kejun Dong, Yongjin Guan, Xiangdong Ruan, Shan Jiang, Exposure Age Dating of Chinese Tiankengs by 36Cl-AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol.459, 15 (2019) 29-35. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.07.006
- 9. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng, Masumi Matsumura, Tetsuya Masunaka, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Zhaomei Li, Zhenchi Zhao, Qingzhang Zhao, Kejun Dong, Yongjin Guan, Shan Jiang, 36Cl preparation method for Chinese karst samples (Tiankeng), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 458 (2019) 126-129.
- 10. Hajime Nakamura, Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Taichi Miura, Kimikazu Sasa and Tetsuaki Moriguchi, Investigation of Neutron-fluence Measurement Methods for Estimating Neutron-induced Activity from an Electrostatic Accelerator Source, Environmental Radiochemical Analysis VI, Royal Society of Chemistry
- 11. M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suzuki, Y. Tanaka, T. Moriguchi, D. S. Ahn, A. Aimaganbetov, M. Amano, H. Arakawa, S. Bagchi, K.-H. Behr, N. Burtebayev, K. Chikaato, H. Du, S. Ebata, T. Fujii, N. Fukuda, H. Geissel, T. Hori, W. Horiuchi, S. Hoshino, R. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. Kenzhina, Z. Korkulu, Y. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, K. Ohnishi, M. Ohtake, T. Ohtsubo, S. Omika, H. J. Ong, A. Ozawa, A. Prochazka, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sugihara, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Suzuki, H. Takeda, Y. K. Tanaka, I. Tanihata, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, T. K. Zholdybayev, Swelling of Doubly Magic 48Ca Core in Ca Isotopes beyond N =28, Physical Review Letters, 124, 102501 (6 pages), 2020.
- 12. T. Moriguchi, M. Amano, A. Ozawa, W. Horiuchi, Y. Abe, T. Fujii, R. Kagesawa, D. Kamioka, A. Kitagawa, M. Mukai, D. Nagae, M. Sakaue, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Yamaguchi, K. Yokota, Energy dependence of total reaction cross sections for 17Ne on a proton target, Nuclear Physics A, 994, 121663 (13 pages), 2020.
- 13. S. Omika, T. Yamaguchi, N. Tadano, Y. Abe, M. Amano, Z. Ge, D. Kamioka, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Naimi, A. Ozawa, F. Suzaki, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Wakayama, Y. Yamaguchi, Development of a new in-ring beam monitor in the Rare-RI Ring, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 463,

- 241-243, 2020.
- 14. Zhuang Ge, Tomohiro Uesaka, Sarah Naimi, Daisuke Nagae, Yasushi Abe, Syunichiro Omika, Fumi Suzaki, Takayuki Yamaguchi, Yoshitaka Yamaguchi, Masanori Wakusugi, Hongfu Li, Kiyoshi Wakayama, Hiroki Arakawa, Kumi Inomata, Kunimitsu Nishimuro, Takaaki Kobayashi, Akira Ozawa, Shun Hosoi, Yasuto Inada, Shinji Suzuki, Tetsuaki Moriguchi, Momo Mukai, Masamichi Amano, Daiki Kamioka, Yasushige Yano, Scheme of high-resolution identification and selection of secondary ions for mass measurements with the Rare-RI Ring, Hyperfine Interact. 92, 240 (11 pages), 2019.
- 15. M. Machida, D. Nishimura, M. Fukuda, S. Yagi, T. Sugihara, S. Kanbe, S. Yamaoka, M. Takechi, M. Tanaka, M. Amano, J. Chiba, K. Chikaato, H. Du, S. Fukuda, A. Homma, T. Hori, A. Ikeda, R. Ishii, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, R. Kehl, A. Kitagawa, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, A. Mizukami, T. Moriguchi, M. Nagashima, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Ohnishi, T. Ohtsubo, S. Sato, J. Shimaya, T. Suzuki, S. Suzuki, T. Tahara, Y. Tanaka, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Development of prototype RICH detector with multi-anode photomultipliers for radioactive ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 931, 23-28, 2019.
- 16. X.Xu, J.H.Liu, C.X.Yuan, Y.M.Xing, M.Wang, Y.H.Zhang, X.H.Zhou, Yu.A.Litvinov, K.Blaum, R.J.Chen, X.C.Chen, C.Y.Fu, B.S.Gao, J.J.He, S.Kubono, Y.H.Lam, H.F.Li, M.L.Liu, X.W.Ma, P.Shuai, M.Si, M.Z.Sun, X.L.Tu, Q.Wang, H.S.Xu, X.L.Yan, J.C.Yang, Y.J.Yuan, Q.Zeng, P.Zhang, X.Zhou, W.L.Zhan, S.Litvinov, G.Audi, S.Naimi, T.Uesaka, Y.Yamaguchi, T.Yamaguchi, A.Ozawa, B.H.Sun, K.Kaneko, Y.Sun, and F.R.Xu, Masses of ground and isomeric states of 101In and configuration-dependent shell evolution in odd-A indium isotopes, PHYSICAL REVIEW C 100, 051303(R) (2019).
- F.C.Ozturk, B.Akkus, D.Atanasov, H.Beyer, F.Bosch, D.Boutin, C.Brandau, P.Buhler, R.B.Cakirli, R.J.Chen, W.D.Chen, X.C.Chen, I.Dillmann, C.Dimopoulou, W.Enders, H.G.Essel, T.Faestermann, O.Forstner, B.S.Gao, H.Geissel, R.Gernhouser, R.E.Grisenti, A.Gumberidze, S.Hagmann, T.Heftrich, M.Heil, M.O.Herdrich, P.-M.Hillenbrand, T.Izumikawa, P.Kienle, C.Klaushofer, C.Kleffner, C.Kozhuharov, R.K.Knobel, O.Kovalenko, S.Kreim, T.Kuhl, C.Lederer-Woods, M.Lestinsky, S.A.Litvinov, Yu.A.Litvinov, Z. Liu, X.W.Ma, L.Maier, B.Mei, H.Miura, I.Mukha, A.Najafi, D.Nagae, T.Nishimura, C.Nociforo, F.Nolden, T.Ohtsubo, Y.Oktem, S.Omika, A.Ozawa, N.Petridis, J.Piotrowski, R.Reifarth, J.Rossbach, R.Sanchez, M.S.Sanjari, C.Scheidenberger, R.S.Sidhu, H.Simon, U.Spillmann, M.Steck, Th.Stohlker, B.H.Sun, L.A.Susam, F.Suzaki, T.Suzuki, S.Yu.Torilov, C.Trageser, M.Trassinelli, S.Trotsenko, P.M.Walker, M.Wang, G.Weber, H.Weick, N.Winckler, X.L.Tu, D.F.A.Winters, P.J.Woods, T.Yamaguchi, X.D.Xu, X.L.Yan, J.C.Yang, Y.J.Yuan, Y.H.Zhang, X.H.Zhou and the FRS-ESR, ILIMA, SPARC, and TBWD Collaborations, New test of modulated electron capture decay of hydrogen-like 142Pm ions: Precision measurement of purely exponential decay, Physics Letters B 797 (2019) 134800.
- X. Xu, M. Wang, K. Blaum, J. D. Holt, Yu. A. Litvinov, A. Schwenk, J. Simonis, S. R. Stroberg, Y. H. Zhang, H. S. Xu, P. Shuai, X. L. Tu, X. H. Zhou, F. R. Xu, G. Audi, R. J. Chen, X. C. Chen, C. Y. Fu, Z. Ge, W. J. Huang, S. Litvinov, D. W. Liu, Y. H. Lam, X. W. Ma, R. S. Mao, A. Ozawa, B. H. Sun, Y. Sun, T. Uesaka, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, X. L. Yan, Q. Zeng, H. W. Zhao, T. C. Zhao, W. Zhang, and W. L. Zhan, Masses of neutron-rich 52-54Sc and 54,56Ti nuclides: The N = 32 subshell closure in scandium, Phys. Rev. C 99 (2019) 064303/1-6.
- J.T. Zhang, K. Yue, H.X. Li, X.L. Tu, C.J. Shao, P. Ma, B. Mei, X.C. Chen, Y.Y. Yang, X.Q. Liu, Y.M. Xing K.H. Fang, Z.Y. Sun, M. Wang Yu. A. Litvinov, T. Yamaguchi, P. Egelhof, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, The development of in-ring reaction measurements at the HIRFL-CSR, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 948 (2019) 162848/1/5.
- 20. Shinji Suzuki, Akira Ozawa, Daiki Kamioka, Yasushi Abe, Masamichi Amano, Hiroki Arakawa, Zhuang Ge, Kentaro Hiraishi, Yukina Ichikawa, Kumi Inomata, Atsushi Kitagawa, Takaaki Kobayashi, Hong Fu Li, Takuya Matsumoto, Tetsuaki Moriguchi, Momo Mukai, Daisuke Nagae, Sarah Naimi, Shunichiro Omika, Shinji Sato, Yoshiyuki Tajiri, Kiyoshi Wakayama, Takayuki Yamaguchi, Efficiency and timing performance of time-of-flight detector utilizing thin foils and crossed static electric and magnetic fields for mass measurements with Rare-RI Ring facility, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 965 (2020) 163807.
- 21. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi and Hiroyuki Matsuzaki, Assessing the effect of laboratory environment on sample contamination for I-129 accelerator mass spectrometry, Analytical Sciences, 36, 2020, 631-636. DOI: 10.2116/analsci.20SBN05
- A. Yamazaki, K. Sasa, S. Tomita, S. Ishii, H. Naramoto, M. Sataka, H. Kudo, G. Itoh and M. Ohkubo, Microscopic 3dimensional mapping of hydrogebubbles in polycrystalline Al by elastic recoil detection analysis under transmission geometry, AIP Advances 9, 105111 (2019); doi: 10.1063/1.5099528
- 23. Tetsuya Matsunaka, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Keisuke Sueki, Hiroyuki Matsuzaki, Pre- and post-accident 14C activities in tree rings near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Radiocarbon, Vol 61, 6 (2019) 16331642. DOI:10.1017/RDC.2019.147
- 24. Jia Chen, Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Haihui Lan, Tetsuya Matsunaka, Masumi Matsumura, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Ming He, Yun He, Zhaomei Li, Zhenchi Zhao, Mingji Li, Siyu Wei, Mingli Qi, Qingzhang Zhao, Xiuju

- Qin, Xinqiang Chen, Shan Jiang, Radio carbon dating of Chinese ancient tea trees, Radiocarbon, Vol 61, 6 (2019) 17411748. DOI:10.1017/RDC.2019.117
- 25. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng; Masumi, Matsumura, Tetsuya Masunaka, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Qingzhang Zhao, (2019) 152 160. Doi: 10.1039/9781788017732-00152
- 26. Y. Shiina, R. Kinoshita, S. Funada, M. Matsuda, M. Imai, K. Kawatsura, M. Sataka, K. Sasa, S. Tomita, Measurement of Auger electrons emitted through Coster-Kronig transitions under irradiation of fast C2+ ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 460 (2019) 3033. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.10.041
- 27. Evidence of rescattering effect in Pb-Pb collisions at the LHC through production of K*(892) and $\phi(1020)$ mesons, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 802 (2020) 135225, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135225
- 28. Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays as a function of multiplicity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 02 (2020) 077, DOI: $10.1007/\mathrm{JHEP02}(2020)077$
- 29. Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavour hadron decays at midrapidity in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 804 (2020) 135377, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135377
- 30. Measurements of inclusive jet spectra in pp and central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 101 (2020) 3, 034911, DOI: 10.1103/PhysRevC.101.034911
- 31. Studies of J/ψ production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 02 (2020) 041, DOI: 10.1007/JHEP02(2020)041
- 32. Multiplicity dependence of (multi-)strange hadron production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 80 (2020) 2, 167, DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-7673-8
- 33. $^3_\Lambda {\rm H}$ and $^3_{\bar{\Lambda}} {\bar {\rm H}}$ lifetime measurement in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV via two-body decay, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 797 (2019) 134905, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134905
- 34. Measurement of Upsilon(1S) elliptic flow at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 19, 192301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.192301
- 35. Measurement of prompt D^0 , D^+ , D^{*+} , and D_S^+ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 12 (2019) 092, DOI: 10.1007/JHEP12(2019)092
- 36. Multiplicity dependence of light (anti-)nuclei production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 800 (2020) 135043, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.135043
- 37. Measurement of the inclusive isolated photon production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 11, 896, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7389-9
- 38. Scattering Studies with Low-Energy Kaon-Proton Femtoscopy in Proton-Proton Collisions at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 124 (2020) 9, 092301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.092301
- 39. Charged-particle production as a function of multiplicity and transverse spherocity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 10, 857, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7350-y
- 40. Inclusive J/ψ production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 10 (2019) 084, DOI: 10.1007/JHEP10(2019)084
- 41. Study of the Λ-Λ interaction with femtoscopy correlations in pp and p-Pb collisions at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 797 (2019) 134822, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134822
- 42. Production of muons from heavy-flavour hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s}=5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 09 (2019) 008, DOI: $10.1007/\mathrm{JHEP09}(2019)008$
- 43. Measurement of the production of charm jets tagged with D0 mesons in pp collisions at \sqrt{s} =7 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 08 (2019) 133, DOI: 10.1007/JHEP08(2019)133
- 44. Exploration of jet substructure using iterative declustering in pp and PbPb collisions at LHC energies, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 802 (2020) 135227, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135227
- 45. Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.D 100 (2019) 9, 092004, DOI: 10.1103/PhysRevD.100.092004
- 46. Measurement of jet radial profiles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 796 (2019) 204-219, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.07.020
- 47. First Observation of an Attractive Interaction between a Proton and a Cascade Baryon, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 11, 112002, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.112002
- 48. Coherent J/ψ photoproduction at forward rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 798 (2019) 134926, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134926
- 49. One-dimensional charged kaon femtoscopy in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 100 (2019) 2, 024002, DOI: 10.1103/PhysRevC.100.024002

- 50. Measurement of strange baryonantibaryon interactions with femtoscopic correlations, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 802 (2020) 135223, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135223
- 51. Investigations of Anisotropic Flow Using Multiparticle Azimuthal Correlations in pp, p-Pb, Xe-Xe, and Pb-Pb Collisions at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 14, 142301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.142301
- 52. Multiplicity dependence of (anti-)deuteron production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 794 (2019) 50-63, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.05.028
- 53. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JINST 14 (2019) 05, P05025, DOI: 10.1088/1748-0221/14/05/P05025
- 54. Measurement of D^0 , D^+ , D^{*+} , and D^+_S production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with ALICE, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 5, 388, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6873-6
- 55. Event-shape and multiplicity dependence of freeze-out radii in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 09 (2019) 108, DOI: 10.1007/JHEP09(2019)108
- 56. Real-time data processing in the ALICE High Level Trigger at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Comput.Phys.Commun. 242 (2019) 25-48, DOI: 10.1016/j.cpc.2019.04.011
- 57. Charged-particle pseudorapidity density at mid-rapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 4, 307, DOI: $10.1140/{\rm epjc/s10052-019-6801-9}$
- 58. Λ_{c+} production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 793 (2019) 212-223, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.04.046
- 59. Energy dependence of exclusive J/ ψ photoproduction off protons in ultra-peripheral pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 5, 402, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6816-2
- 60. Analysis of the apparent nuclear modification in peripheral PbPb collisions at 5.02 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 793 (2019) 420-432, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.04.047
- 61. Production of the ρ (770) meson in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 99 (2019) 6, 064901, DOI: 10.1103/PhysRev.C.99.064901
- 62. Two particle differential transverse momentum and number density correlations in p-Pb and Pb-Pb at the LHC, AL-ICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 100 (2019) 4, 044903, DOI: 10.1103/PhysRevC.100.044903
- 63. A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, ALICE Collaboration, ALICE public note, ALICE-PUBLIC-2019-005, URL http://cds.cern.ch/record/2696471
- 64. Fabrication and beam test of a silicon-tungsten electromagnetic calorimeter, Sanjib Muhuri et al., JINST 15 (2020) 03, P03015, DOI: 10.1088/1748-0221/15/03/P03015
- 65. J/ψ and $\psi(2S)$ production at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys.Rev.D 101 (2020) 5, 052006, DOI: 10.1103/PhysRevD.101.052006
- 66. Beam Energy and Centrality Dependence of Direct-Photon Emission from Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions, PHENIX Collaboration, A. Adare et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 2, 022301, DOI: 10.1103/Phys-RevLett.123.022301
- 67. Measurement of two-particle correlations with respect to second- and third-order event planes in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX Collaboration, A. Adare et al., Phys.Rev.C 99 (2019) 5, 054903, DOI: 10.1103/Phys-Rev.C.99.054903
- 68. Collision Energy Dependence of p_T Correlations in Au+Au Collisions at RHIC, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. C 99 (2019) 44918
- 69. Azimuthal harmonics in small and large collision systems at RHIC top energies, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 172301
- Collision energy dependence of second-order off-diagonal and diagonal cumulants of net-charge, net-proton and net-kaon multiplicity distributions in Au+Au collisions, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. C 100 (2019) 14902
- 71. Beam energy dependence of (anti-)deuteron production in Au+Au collisions at RHIC, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. C 99 (2019) 64905
- 72. Observation of excess J/ψ yield at very low transverse momenta in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 132302
- 73. First observation of the directed flow of D_0 and $\bar{D_0}$ in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 162301
- 74. Measurements of the transverse-momentum-dependent cross sections of J/ψ production at mid-rapidity in proton+proton collisions at $\sqrt{s} = 510$ and 500 GeV with the STAR detector, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. D 100 (2019) 52009
- 75. Polarization of Lambda (anti-Lambda) hyperons along the beam direction in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$

- GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 132301
- 76. Measurement of inclusive J/ψ suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV through the dimuon channel at STAR, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Lett. B 797 (2019) 134917
- 77. Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. D 100 (2019) 52005
- 78. Charge-dependent pair correlations relative to a third particle in p+Au and d+Au collisions at RHIC, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Lett. B 798 (2019) 134975
- Volume fluctuation and multiplicity correlation in higher-order cumulants, T. Sugiura, T. Nonaka and S. Esumi, Phys. Rev. C 100 (2019) 044904
- Efficiency correction for cumulants of multiplicity distributions based on track-by-track efficiency, X. Luo and T. Nonaka, Phys. Rev. C 99 (2019) 044917

〈レビュー、解説・総説、書籍・著書等〉

- Matsunaka Testuya and Sasa Kimikazu, Chapter 6.4, Distribution and migration of radioiodine in terrestrial environment, Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster, Cambridge University Press, pp186-190, 2019-08-15. ISBN: 9781108475808.
- 2. 新井田貴文、 江角晋一、 日本物理学会誌 2019 10 月号 「高速回転する流体 クォーク・グルーオン・プラズマの渦度」
- 3. 野中俊宏、日本物理学会誌 2020 1 月号「中国・武漢滞在記」
- 4. 野中俊宏、原子核研究 Vol.64 No.2, 2020 3 月「高次揺らぎを用いた QCD 相図の探索」

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- 1. Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda 「Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow」,
 - The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Wuhan, China, 6.16-22, 2019)
- 2. Shinji Ejiri, Atsushi Kiyohara, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Mizuki Shirogane, Ryo Iwami, Shota Itagaki, Takashi Umeda, and Yusuke Taniguchi 「Determination of the endpoint of the first order deconfiniement phase transition in the heavy quark region of QCD」,
 - The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Wuhan, China, 6.16-22, 2019)
- 3. <u>Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda 「Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Wuhan, China, 6.16-22, 2019)</u>
- 4. Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, and Takashi Umeda 「Non-perturbative renormalization of Kaon B parameter using gradient flow」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Wuhan, China, 6.16-22, 2019)
- 5. K. Kanaya, A. Baba, S. Ejiri, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda Thermodynamic properties of QGP at the physical point with the gradient flow method, The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, Univ. Tsukuba, Tokyo, Japan, 6.24-26, 2019)
- 6. <u>A. Baba</u>, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda 「Measuring chiral susceptibility using gradient flow」.
 - The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, Univ. Tsukuba, Tokyo, Japan, 6.24-26, 2019)
- 7. Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, M. Shirogane, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, and A. Baba $\lceil \text{QCD energy-momentum tensor using gradient flow} \rfloor$,
 - The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, Univ. Tsukuba, Tokyo, Japan, 6.24-26, 2019)
- 8. K. Kanaya, Y. Taniguchi, A. Baba, S. Ejiri, S. Itagaki, M. Kitazawa, T. Shimojo, A. Suzuki, H. Suzuki, and T. Umeda (2+1)-flavor QCD thermodynamics using the gradient flow ,
- 11th Symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (EPOCHAL, Tsukuba, Japan, 10.15, 2019)
 9. T. Yamaguchi, 'ILIMA status report and phase-0 program', Nuster Week 2019, CNRS, Gif-sur-Yvette, France,
- 2019/9/23-27
 Y Shiina, R Kinoshita, S Funada, S Tomita, M Matsuda, M Imai, K Kawatsura, M Sataka, K Sasa, Cluster effect on the yield of Auger electrons emitted through CosterKronig transitions, ISIAC, XXXIst International Conference

- on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Deauville, France, July 23-30, 2019
- Yasushi Iwata, Ryo Morioka, Iwane Suzuki, Kanako Tomita, Nozomi Orita, Tetsuro Matsumoto, Akihiko Masuda, Kimikazu Sasa, Mutagenesis to the Target Genes of Microalgae with the 15N-resonant Nuclear Reaction, 27th Advanced Materials Congress, European Advanced Materials Congress, 11-14 August, Stockholm Sweden
- 12. <u>T. Chujo, Recent jet results and future directions in ALICE, Heavy Ion Cafe, June 22-23, 2019, Sophia University, Tokyo</u>
- 13. T. Chujo, Jets in heavy ion collisions and future directions, Seminar at Shinshu University, October 9, 2019 @ Shinshu Univ.
- 14. R. Hosokawa, Recent results on hard probes in heavy-ion collisions from ALICE and LHCb, 7th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2019) 20-25 May 2019, Puebla, Mexico
- 15. N. Novitzky, ALICE Forward Calorimeter (FOCAL) Detector design and physics reach, 7th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2019) 20-25 May 2019, Puebla, Mexico
- 16. N. Novitzky, Calorimeter: ALICE FoCal Joint CFNS & RBRC Workshop on Physics and Detector Requirements at Zero-Degree of Colliders, 24-26 September 2019, Stony Brook University, NY, USA
- 17. T. Niida, Λ polarization along the beam direction in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, A workshop on QCD Physics and Study of the QCD Phase Diagram and New-type Topologic Effect, Jul. 2019, Shandong University, China
- 18. Y. Miake, Strangelets, 原研先端研コロキウム, Jun. 4, 2019
- 19. Y. Miake, Heavy Ion Acceleration Plan at J-PARC, 3rd J-PARC Symposium, Sep. 26, 2019
- 20. <u>T. Nonaka</u>, Studying the QCD phase diagram in RHIC-BES at STAR, 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD2019), 24-26 June, Tokyo, Japan
- 21. <u>A. Ozawa</u>, 'Mass measurements for Ni-isotopes in Rare-RI Ring RIBF', China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process", 2019, 10/9-12, ITP/CAS, Beijing, P.R. China
- M. Mukai, 'Measurement of nuclear magnetic dipole moments of 196-198Ir from laser spectroscopy at KISS', INPC2019, Glasgow (UK), 2020/7/28-8/2
- 23. <u>T. Yamaguchi</u>, 'New experimental plan and detector R&D at the Rare-RI Ring facility', China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process", 2019, 10/9-12, ITP/CAS, Beijing, P.B. China
- 24. <u>Hiroshi Matsumura</u>, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Koichi Nishikawa, Hajime Nakamura, Taichi Miura, Kotaro Bessho, Kimikazu Sasa, Tetsuaki Moriguchi, Fumiyoshi Nobuhara, Yoko Nagashima, Non-destructive High-sensitivity Measurement Method for Activation Estimation in Accelerator Room Concrete, The 10th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-10), July 16-19, 2019, in Taiyuan, China
- 25. N. Nitta, Y. Murao, H. Tsuchida, S. Tomita, K. Sasa, K. Hirata, H. Shibata Y. Hirano K. Yamada, A. Chiba, Y. Saitoh K. Narumi and Y. Hoshino, Surface Structures on Ge and Si Irradiated with C60 Cluster Ion Beams, 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23), 17-22 November 2019, Matsue, Japan
- 26. K. Sasa, M. Matsumura, T. Matsunaka, T. Takahashi, Y. Satou, N. Kinoshita, H. Matsuzaki and K. Sueki, Distribution of 129I in the terrestrial environment around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant before and after the accident, 5th International Conference on Environmental Radioactivity, 8 13 September 2019, Prague, Czech Republic
- 27. <u>Y. Ochiai, K. Sasa, Y. Tosaki, T. Takahashi, M. Matsumura, K. Sueki, Variation of Chlorine-36 deposition flux in precipitation at Tsukuba, Japan, 5th International Conference on Environmental Radioactivity, 8 13 September 2019, Prague, Czech Republic</u>
- 28. <u>Kimikazu Sasa</u>, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Yuta Ochiai, Tetsuya Matsunaka, Aya Sakaguchi, Hangtao Shen, Keisuke Sueki, Progress of Ultrasensitive Detection Techniques for the 6 MV multi-nuclide AMS System at the University of Tsukuba, The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 8), Nagoya University, 3 to 6 December, 2019.
- 29. <u>Kayo Kanzawa</u>, Fusa Miyake, Yuma Tada, Kazuho Horiuchi, Kou Ohtani, Kimikazu Sasa, Yuko Motizuki, Kazuya Takahashi, Yoichi Nakai, Hideaki Motoyama, Hiroyuki Matsuzaki, Variation of cosmogenic 10Be for cosmic ray event in 5480 BC from Antarctic Dome Fuji ice core, The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 8), Nagoya University, 3 to 6 December, 2019.
- 30. <u>Yuta Ochiai, Kimikazu Sasa, Yuki Tosaki, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Keisuke Sueki, Variations of Beryllium-10 and Chroline-36 deposition flux at Tsukuba, Japan, The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 8), Nagoya University, 3 to 6 December, 2019.</u>
- 31. T. Chujo, QGP Tomography with jets, 2019 Joint workshop of FKPPL and TYL/FJPPL, Jeju island, South Korea, 8-10 May, 2019
- 32. T. Chujo, ALICE T2 Status Hiroshima and Tsukuba, Ninth Annual ALICE Tier-1/Tier-2 Workshop Bucharest,

- Romania, 15 May, 2019
- 33. T. Chujo, ALICE FoCal upgrade, Kick-off meeting of Platform B (Silicon), September 3, 2019 @ KEK
- 34. T. Chujo, ALICE FoCal, a possibility of mass production in Japan KEK platform B (silicon) meeting, December 12, 2019 at KEK, Tsukuba, Japan
- 35. T. Chujo, ALICE FoCal, a possibility for mass production in Japan KEK platform B (silicon) meeting, January 8, 2020 at KEK, Tsukuba, Japan
- 36. T. Chujo, FoCal in Japan ALICE workshop in Hiroshima, January 26, 2020, Hiroshima Univ., Japan
- 37. T. Chujo, Online Algorithm for FoCal Mini-workshop on next generation DAQ, March 16, 2020, Campus Innovation Center Tokyo, Tamachi Tokyo, Japan
- 38. K. Tadokoro, Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02~{\rm TeV}$ with ALICE, Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
- 39. S. Sakai, Measurement of heavy flavour jets with electrons from heavy-flavour hadron decays in pp and p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE, Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
- 40. M. Takamura, The neutral meson measurement in jets in Pb-Pb collisions in ALICE, Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
- 41. N. Novitzky, System size dependence of direct photon production in large and small system collisions from PHENIX, Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
- 42. T. Niida, Global and local polarization of Λ hyperons in heavy-ion collisions, Nuclear Physics Seminar, Feb. 2020, BNL, USA
- 43. <u>K. Okubo</u>, Differential measurements of global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at 54.4GeV with STAR, Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
- 44. <u>K. Okubo</u>, Measurements of the Lambda polarization in Au+Au collisions at 54.4GeV, Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density region, Nov. 13-15, 2019, Central China Normal University, China
- 45. <u>Y. Sato</u>, Centrality determination with the Event Plane Detector for fluctuation measurements from STAR, Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
- 46. <u>Y. Sato</u>, Centrality determination with new detector EPD at STAR, Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density region, Nov. 13-15, 2019, Central China Normal University, China
- 47. T. Nonaka, Measurement of the sixth-order cumulant of net-proton multiplicity distributions at RHIC, 13th Workshop on QCD Phase Transition and Relativistic Heavy-Ion Physics (QPT 2019) 16-20 August, 2019, Enshi, China
- 48. <u>T. Nonaka</u>, Measurement of the sixth-order cumulant of net-proton multiplicity distributions from the STAR experiment (selected as plenary flash talk award), Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China
- 49. <u>T. Nonaka</u>, Measurements of the sixth-order cumulantsof net-particle distributions, Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density region, Nov. 13-15, 2019, Central China Normal University, China
- 50. <u>S. Esumi</u>, Beam-energy and collision-system dependence of the linear and mode-coupled flow harmonics from STAR (on behave of Niseem Abdelrahman), Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China

[国内学会・研究会]

- 1. Y. Taniguchi, A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda 「物理的なクォーク質量におけるエネルギー運動量テンソルの研究」,
 - 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)第 11 回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 品川区, 東京, 7.11-12, 2019)
- 2. <u>谷口 裕介</u>, 馬場 惇, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士 「QGP 粘性係数導出に向けた $N_f = 2 + 1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究 (II) 」, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019)(京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 9.2-4, 2019)
- 3. <u>白銀 瑞樹</u>, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, 若林 直輝 「高次補正項を取り入れたグラディエントフロウによる一次相転移点近傍の熱力学量」,
 - 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 9.2-4, 2019)
- 4. <u>馬場 惇</u>, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 鈴木 遊, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,
 - 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所,京都府,京都府,京都,9.2-4,2019)

- 5. 金谷 和至, 馬場 惇, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「QGP at the physical point with the gradient flow」.
 - 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 9.2-4, 2019)
- 6. <u>金谷 和至</u>, 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 II」,
 - 日本物理学会秋季大会(山形大学,山形県,山形市,9.17-20,2019)
- 7. <u>谷口 裕介</u>, 梅田 貴土, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 馬場 惇 「gradient flow を用いた K 中間子 B パラメータの非摂動論的な繰り込み」,
 - 日本物理学会秋季大会(山形大学,山形県,山形市,9.17-20,2019)
- 8. 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での Gradient flow を用いた PCAC mass の計算」,
 - 日本物理学会秋季大会 (山形大学, 山形県, 山形市, 9.17-20, 2019)
- 9. <u>馬場 惇</u>, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,
 - 日本物理学会第75回年次大会(名古屋大学,愛知県,名古屋市,3.16-19,2020)
- 10. 金谷 和至, 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 に基づく SFtX 法による格子 2+1 フレーバー QCD の熱力学 2-loop 係数の効果」,
 日本物理学会第75 回年次大会(名古屋大学, 愛知県, 名古屋市, 3.16-19, 2020)
- 11. <u>笹 公和</u>, イオンビーム分析法を用いた材料中の水素を含む多元素同時イメージング, 軽金属学会 アルミニウム中の水素と材料物性研究部会第2回研究会, 2019年11月6日, 日本アルミニウム協会第一会議室.
- 12. 中條達也、ジェット物理の最前線、理研シンポジウム:チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」、August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan
- 13. <u>中</u>條達也、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とカラーグラス凝縮 (CGC)、京都大学・集中講義 「高エネルギー重イオン衝突の物理」セミナー・談話会、2019 年 12 月 4 日-6 日
- 14. 中條達也、クォーク・グルーオン・プラズマ物理の最前線, 新学術領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」スクール, 2020 年 3 月 3 日 (理化学研究所 和光)
- T. Niida, Global and local polarization of Λ hyperons in heavy-ion collisions, Seminar at Quantum Hadron Physics Laboratory, Jul. 2019, Riken, Japan
- 16. 新井田貴文、「偏極、CME、CVE」、 チュートリアル研究会「高エネルギー原子核の物理」, Riken, Japan
- 17. <u>Kosuke Okubo</u>, Global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at STAR, Heavy Ion Cafe, Jun 22-23, 2019, RIKEN Wako, Japan
- 18. 野中俊宏、ビームエネルギー走査の最新結果、理研シンポジウム:チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」、August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan
- 19. <u>江角晋一</u>、小さい系・フローの最先端、理研シンポジウム:チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理:基礎・最先端・課題・展望」、August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan
- 20. 景澤怜央、固体水素標的を用いた 17F の反応断面積測定、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学(東山キャンパス)、2020 年 3 月 16 日~19 日
- 21. T. Moriguchi, Energy dependence of reaction cross section for 17Ne on proton target, The International Nuclear Physics Conference (INPC) 2019, Scottish Event Campus, Glasgow, UK, Jul. 29 Aug. 2, 2019 (Poster)
- 22. <u>森口哲朗</u>、「固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発」, H30 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、ホテルポートプラザ千葉、2019/04/22-23
- 23. 向井もも、「薄膜を利用した飛行時間検出器の開発」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019 年 9 月 17 日~20 日
- 24. <u>笹</u> 公和, 石井 聡, 高橋 努, 大和 良広, 田島 義一, 松村万寿美, 森口 哲朗 1, 上殿 明良, 筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の 現状 (2018 年度) , 第 32 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 2019 年 7 月 5 - 6 日 神戸大学.
- 25. <u>笹</u>公和, 石井 聡, 高橋 努, 大和 良広, 田島 義一, 松村 万寿美, 森口 哲朗, 上殿 明良, 筑波大学タンデム加速器施設の現状 報告, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年 7 月 31 日 - 8 月 3 日, 京都大学
- 26. <u>笹</u> 公和, 落合 悠太, 高橋 努, 松村 万寿美, 末木 啓介, カルシウム 41 の加速器質量分析法による高感度検出手法の開発, 2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 2019 年 9 月 18 - 21 日, 北海道大学
- 27. <u>菅澤佳世</u>, 三宅芙沙, 堀内一穂, 笹公和, 望月優子, 高橋和也, 中井陽一, 本山秀明, 松崎浩之, ドームふじアイスコア中 10Be と 36Cl 濃度の測定による BC5480 年宇宙線イベントの調査, 2019 年 9 月 17 日 20 日 , 山形大学 (小白川キャンパス)
- 28. 落合悠太, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 末木啓介, 加速器質量分析法を用いた塩素 36 測定における低バックグラウンド検出手法の開発, 2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 2019 年 9 月 18 21 日, 北海道大学
- 29. <u>横山 大輝</u>、笹 公和、松中 哲也、高橋 努、松村 万寿美、高野 健太、落合 悠太、長谷川 涼、太田 裕貴、末木 啓介、福島県の避 難指示区域における I-129 の分布と Cs-137 との関係性、日本放射化学会第 63 回討論会 (2019), 2019 年 9 月 24 - 26 日, い わき産業創造館 (LATOV 6 階)
- 30. <u>松中 哲也</u>, 笹 公和, 高橋 努, 松村 万寿美, 末木 啓介, 松崎 浩之, 樹木年輪に記録された福島第一原子力発電所発事故 由来 C-14 の分布, 日本放射化学会第 63 回討論会 (2019), 2019 年 9 月 24 26 日, いわき産業創造館 (LATOV 6 階)

- 31. <u>松村 万寿美</u>, 森口 哲朗, 笹 公和, 上殿明良、筑波大学 6MV タンデム加速器ビームラインの放射線サーベイ、公益社団法 人日本アイソトープ協会 放射線安全取扱部会年次大会、2019 年 10 月 24 - 25 日、倉敷市芸文館(岡山県倉敷市)
- 32. 松中哲也,後藤章夫,渡邊隆広,土屋範芳,平野伸夫,笹公和,蔵王山における火山活動と熱水系ヨウ素同位体比の変動,日本陸水学会 第84回金沢大会,2019年9月27日-9月30日,金沢大学角間キャンパス.
- 33. <u>菰田誉大</u>, 村尾 吉輝, 新田 紀子, 土田 秀次, 冨田 成夫, 笹 公和, 平田 浩一, 柴田 裕実, 平野 貴美, 山田 圭介, 千葉敦也, 斉藤 勇一, 鳴海一雅, 星野 靖, C60 クラスターイオンを照射した Si の照射角度依存性, QST 高崎サイエンスフェスタ 2019, 2019 年 12 月 10 11 日, 高崎シティギャラリー
- 34. 菅澤佳世, 三宅芙沙, 多田悠馬, 堀内一穂, 大谷昴, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 落合悠太, 望月優子, 高橋和也, 中井陽一, 本山秀明, 松崎浩之, BC5480 年宇宙線イベントにおける 10Be と 36Cl の変動:ドームふじアイスコアからの証拠, 応用物理学会 2020 年春季学術講演会, 2020 年 3 月 12 日 15 日, 上智大学 四谷キャンパス.
- 35. <u>笹 公和</u>, 山崎 明義, 石井 聰, 冨田 成夫, 左高 正雄, 楢本 洋, 工藤 博, 構造材料用マイクロビーム分析装置を用いた水素を含む多元素同時分析法の開発, 応用物理学会 2020 年春季学術講演会, 2020 年 3 月 12 日 15 日, 上智大学 四谷キャンパス.
- 36. <u>田所賢一</u> (for the ALICE collaboration)、LHC-ALICE 実験 鉛-鉛衝突 5.02TeV における重クォーク起源電子の方位角異方性の測定、日本物理学会 秋季大会、山形大学 9/17-20
- 37. <u>一色萌衣</u> (for the ALICE FoCal collaboration)、ALICE 実験アップグレード計画における超前方電磁カロリメータ FoCal の Geant-4 シミュレーションを用いた最終デザインの検討、日本物理学会 秋季大会、山形大学 9/17-20
- 38. 大久保孝祐 (for the STAR collaboration)、Global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at 54.4GeV with STAR、日本物理学会 秋季大会、山形大学 9/17-20
- 39. 佐藤優里 (for the STAR collaboration)、RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=54$ GeV \pm + 金衝突における net-proton 4 次の キュムラントの測定、日本物理学会 秋季大会、山形大学 9/17-20

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)

倉知 郁生(高エネルギー加速器研究機構 特別教授)

中村 浩二 (高エネルギー加速器研究機構 助教)

今年度より先端検出器の開発基盤強化のために、高エネルギー加速器研究機構から2名の連携教員を加えた.

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5名の連携教員により構成され、光量子計測器の開発に関する情報の共有し、つくば地区の連携研究 TIA の筑波大学拠点として活動している(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・社会への応用の推進など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」が平成 28 年度から開始され、平成 31 年度には本部門では以下のプロジェクトが採択された。

表 7 TIA かけはし平成 31 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),
(H28/29/30/R1)		東大

同プロジェクト(グループリーダーは倉知)は定期的な会合を重ね,令和2年1月27日には第4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。企業からの最新の研究を含め、招 待講演3件、一般講演3件の発表があった。本部門からは原が素粒子実験に用いる最新の3D積層素子の講演 を行い, 倉知が基調講演およびディスカッションをまとめた.

令和元年 12 月 13 日には、INFN の N. Cartiglia 氏を招いて宇宙史セミナー 「Tracking particles in space and time」を開催した。 同氏は時間分解能に優れた半導体検出器 LGAD 開発の第一人者で、活発な議論とともに今後の研究協力についても話し合った。

センターが主催する今年度の構成員会議では、6月は、中村「HL-LHC ATLAS 実験の内部飛跡検出器に用いる半導体検出器」、11月は原「SOFIST, an SOI based pixel sensor for the ILC」と倉知「SOI-MOSFET での特殊環境下動作への挑戦」の講演を行った。

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」活動の下、関連 WEB ページを作成している。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の推進を目指している。今年度は原、中村により時間分解能に優れた高位置分解能素子の本格的な開発に着手し、生命科学への応用も視野に高速光検出器の試作を行った。今まで SOI 開発において VLSI の設計教育を行い、これらを含めた一連の活動が可能となるが、施設の未整備のためにすべてを総括的に推進する体制の構築は今後の課題である。

本部門が活動計画のロードマップとして掲げる要点項目は「先端光量子検出器の開発」と「KEK トリスタン AR への電子テストビーム施設整備」である。後者については実現に至っていないがその重要性はコミュニティ全体から認知され、現在、KEK 主体で推進することが議論され始めている。

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、中村)

(1) HL-LHC 用 ATLAS ストリップ型センサー

2019 年 4 月にセンサー設計の外部レビュー (FDR: Final Design Review) が行われ,その結果,浜松ホトニクス社のみがセンサー供給者として選定された.これを受けて 19 年度に全体量の 1/20 の予備量産が行われた.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品質管理を分担し,この予備量産の期間に検査体制の確認を行った.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,人手に頼らないオートフォーカス顕微鏡に基づく全自動計測システムを作製した(図 71).予備量産の 318 センサーの測定はトラブルなく 3 日間で完了した.たわみの測定例と最大たわみ量の分布を図 72 に示す.モジュール製作からの要求はたわみ量を 300 μ m を押さえることであるが,すべてのセンサーが要求値を満たした.

本体センサーの品質管理(QC)に加えて、同時にプロセスするテストチップを用いた品質保証(QA)も系統的行われる。従来より行ってきた 1 cm 角のミニチュアセンサー (mini) を用いた電荷収集量の評価、新しく導入した様々なテスト構造を組み入れたテストチップ(TC)による評価、8 mm 角のダイオード(MD8)の評価が行われる。 mini については分担評価する世界の 5 機関で同条件のセンサーを用いて電荷収集量の測定値を比較し、筑波大は評価サイトとして認定された(図 73)。 TC および MD8 についてはリレーを用いた測定系を作製したが調整は 2020 年度に行う。

ITk ストリップ型センサーの開発と試作に関しては、広島国際シンポジウム(HSTD12) で報告され、電荷収集量に関しては原が代表して報告を行った。また将来の実験を見越した $10^{17}/\mathrm{cm}^2$ 照射後の振る舞いについ



図 71 センサーの品質管理のための検査システム。オートフォーカスによる顕微鏡システム,XY ステージ,自動ウェハーローディングシステムで構成される。センサーは 25 枚までウェハーカセットに収納される。このカセットは他の検査でも共通して用いられる。

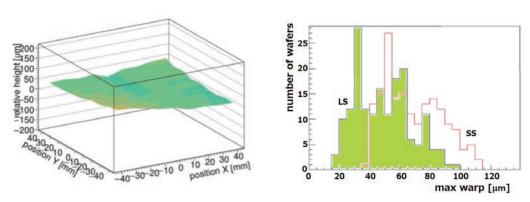


図 72 センサーたわみの測定例(センサーサイズは約 10 cm×10 cm) と、たわみ量の最大値の全センサーについての分布(2 種類のストリップ長 2.4 または 4.8 cm で分類).

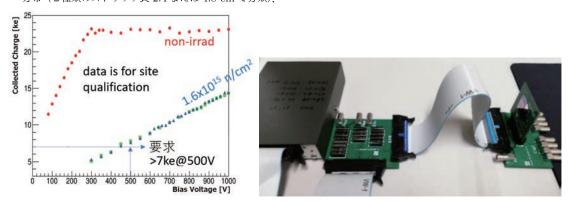


図 73 品質保証試験のうち、電荷収集量の評価(未照射および 2 つの照射済みセンサー)結果と TC/MD8 の測定系。電荷収集量に関しては、 1.6×10^{15} /cm² 照射後の電荷収集量が 500 V のバイアス電圧で 7,000 電子数以上の要求を満たす。

ては, 佐藤 (M1) が同学会で報告した.

(2) HL-LHC 用 ATLAS ピクセル型センサー

ITk バレル部の 5 層のピクセルセンサーの内,日本グループは $3\sim 5$ 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浜松ホトニクスと進めてきた.

ピクセルサイズについてはプロトタイプ 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比較し、 $50 \times 50 \ \mu m$ の方がクロストーク量が少ない等をテストビームを用いて評価した。また、バイアス構造のためにノイズ量がやや増えることが分かっていたが、RD53A では 3 種類のフロントエンド回路を比較評価のために実装しているため、異なる回路間の影響があることを解明した(図 74)。影響を排除するとノイズ量は 130 電子となり、バイアス構造がない場合の 80 電子より劣るものの十分に使用可能な水準である。実際に想定される放射線量(安全係数 1.5 を含んで $3.8 \times 10^{15} \ cm^2$)照射後でもビームテストの結果から十分に高い検出効率が得られることを示した。

2019 年度にいくつかのセンサー供給先からの試作品を比較評価する予定であったが全候補からのサンプルが未着であるため、浜松ホトニクス社製をふくめた数候補で予備 FDR を 2020 年度に行う。バイアス構造の有無などの差異があるが、全製造プロセスの効率なども総合的に評価して仕様が決定される。

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と想定していたが、国内企業を新たに加え、フリップチップ化までを一貫して進められる体制の構築をすすめた。 ASIC の厚さ 300 μ m に対する試作評価は完了し、現在最終的な 150 μ m 厚の試作を進行中で、その結果も予備 FDR に間に合わせる予定である.

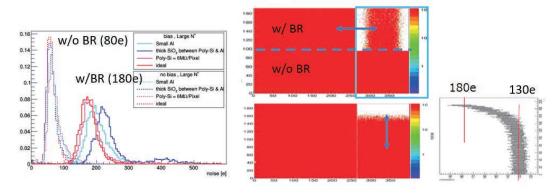


図 74 (左) バイアス構造の有無によるノイズの分布. (中) RD53A でのアナログ応答の分布 (右 1/3 の領域が ATLAS が使用するフロントエンド設計である). 上半分はバイアス構造が有り, 無い下半分と比較すると左右でアナログ応答がノイズのために不良となる. 中央上図はバイアスラインを左右に共有しているため隣接部からの影響を受けている. 下図はセンサーと ASIC を 90 度回転させ, バイアスラインの共有を上下にした. (右) 90 度回転した配置で, ノイズ量のコラム方向依存性.

CERN や DESY でのテストビームでは参照飛跡は備え付けのピクセルセンサーで検出されるが、FNAL での試験のために図 75 のようなシステムを作製し、実際に 2020 年 2-3 月に行ったビームテストに用いた.

LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発(原,中村)

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



図 75 テストビームでの参照飛跡を再構成するシステム。評価対象センサーは中央の断熱ボックス(カバーは外した 状態)内に設置し温度管理する。

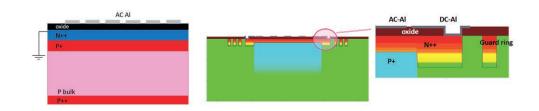


図 76 (左)AC-LGAD 構造の概念図. 増幅層は一様に配置される. (中) TCAD 内に $80\mu m$ ピッチで 5 つの AC 電極を配置した. (右) GND に接合する両端の DC 電極部の詳細を右に示す.

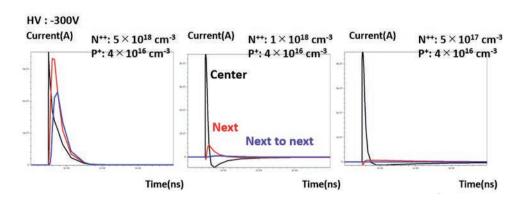


図 77 中央電極に荷電粒子を通過させたときの誘起電流の時間変化を隣接2電極まで示した。適切に信号が分離でき、また十分に応答時間の短いように電極へのドーブ濃度を調整する。

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である. 半導体検出器の優れた位置分解に加え時間情報を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.

LGAD は 1.3 mm 角のパッドタイプのものが HL-LHC 実験用に ATLAS で設計中である。飛跡検出器とするためには電極の一層の細分化が必要であり、2018 年度には TRENCH 溝による電極分離を TCAD シミュレーションを用いて評価した。その結果は 2019 年の Vertex 2019 国際会議で報告した(和田 D1)。2019 年は

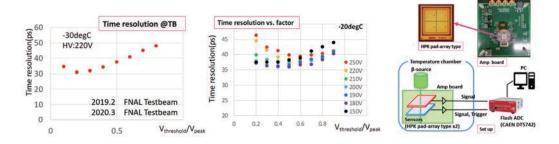


図 78 LGAD の時間分解能の測定. (左) テストビームによるもの, (右) β 線用いたテストベンチシステムによるもの.

増幅層と読み出し電極を酸化膜を介した AC 結合にする AC-LGAD の設計をすすめた. 図 76 に AC-LGAD の概念図および TCAD への実装を示す. 最も重要な設計パラメータは増幅層の濃度で n⁺⁺ 濃度が高いままだと誘起された信号電荷が広がり位置測定ができなくなるが低すぎると増幅が十分でなくなる. 図 77 は中央電極に信号を誘起させた場合の隣接電極を含めた誘起信号の時間変化を示す. 信号が分離でき,かつ適度に信号が GND に流れる条件を探した. 2019 年度から科研費を受け, AC-LGAD の設計に基づいて浜松ホトニクスで試作を完了し,これから実際の評価を進める. AC-LGAD の設計については大鳴 (M2) が HSTD12 国際学会で報告した.

時間分可能の評価は従来,テストビームを用いて行ってきたが,開発を促進するために β 線を用いたテストベンチシステムを構築した(図 78)。 2 枚のセンサーを重ね, β 線による波形を 5 GHz の FADC で記録する.時間差分布から得られる時間分解能はテストビームによる 30 ps と比べてやや劣る (36 ps) が,バイアスや温度条件を変えられるなど測定の簡便さは利点である.

SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発(原, 倉知)

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する素子である。我々は将来の素粒子実験に用いることのできるピクセル検出器として、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を 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開発研究している。

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てきた。2019 年度は、PDD をもつセンサーの放射線耐性を評価した。また、国際リニア衝突器 ILC(International Linear Collider)実験用に SOFIST センサーを開発してきたが、TIA(Tsukuba Innovatio Arena)による連携プログラム探索推進事業「TIA かけはし:3 次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」の成果を取り入れて、SOI ピクセル検出器で初めて 3D 化した SOFIST4 の試作に成功した。

(1) PDD 構造をもつセンサーの放射線損傷の基礎研究

Pinned-depleted diode (PDD) は固定電位層を配置して検出器容量を増やすことなくピクセル周辺部を含めた全領域からの電荷収集効率をあげる設計である。エネルギー分解能に優れている点が特筆されるが,固定電位層の電圧を調整することで放射線損傷による性能劣化を補償できる可能性がある。PDD 構造をもつセンサーとして京都大らが開発している XRPIX6E を用いて, 60 Co γ 線を照射してゲインおよびエネルギー分解能の劣化を評価した (図 79)。顕著な劣化はあるもののセンサーとして 50 kGy までは応答があることを初め

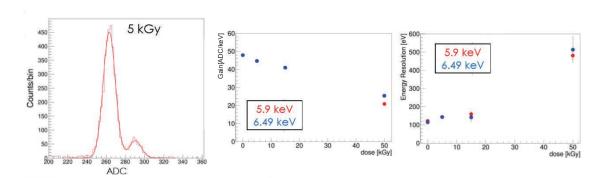


図 79 PDD 構造をもつセンサーの 5 kGy 照射後の 55 Fe に対する応答。5.9 および 6.49 keV に対するピークが観測されている。ピーク位置から評価するゲインおよびエネルギー分解能の照射量依存性。

て示すことができた.

(2) SOFIST3

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 30 μ m 角とやや大きいが、同一ピクセルに 3 ヒットまで対応できるメモリが実装され ILC 実験に対応できる性能をもつ。 2019 年 3 月にビーム試験を FNAL で行った。図 80 は 2 枚のセンサー (IP11 と IP15) について、同一ヒットに対して隣接 2 ピクセルのみが応答している場合について 2 ピクセルで測定された時間差分布をそれぞれに示す。分布は時間分解能の $\sqrt{2}$ 倍に相当する。これに対して直接 2 枚のセンサーの時間差分布から得られる時間分解能 1.87 μ s はやや劣る。これは、隣接 2 ピクセルでは時間校正の不確かさの影響は小さいが、異なる 2 センサー間では影響が残り、時間校正に不確かさが残ることを意味する。しかしながら、時間測定のみに特化した SOFIST2 で得た 1.55 μ s と比肩でき、SOFIST 方式により 2 μ s より優れた時間分解能が達成できることを実証した。ILC のビームトレイン長 720 μ s 内の衝突をこの精度で分離できることは SOFIST の優れた性能と特筆できる。

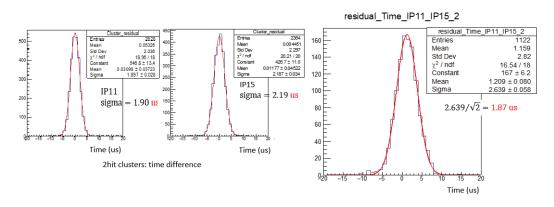


図 80 SOFIST3 の時間分解能のビーム評価. 2 ヒットクラスター内の時間差分布 (2 枚のセンサーそれぞれ) および 2 枚のセンサー間の時間差分布.

(3) SOFIST4

SOFIST3 と同じ機能をもちピクセルサイズは $20~\mu \mathrm{m}$ 角にした SOFIST4 をマイクロバンプを用いた $3~\mathrm{D}$

積層技術で実現した。図 81 に 3D 積層の概念図と用いた金マイクロバンプの SEM 画像を示す。円筒形状の金マイクロバンプ (直径 3 μ m) を上下チップの接続部に形成し圧縮接合する。上部チップからの信号は TBV を経て取り出すが,SOI での TBV は素子プロセス時に形成できるため微細加工が可能であり,TSV と比較してはるかに簡便で効率が良い。また,上部チップのシリコンはエッチングで除去するが埋め込み酸化膜がエッチングストッパーとして作用するので,この点でも SOI はこの 3D 積層技術との親和性が高い。

試作された SOFIST4 は β 線を照射することで全ピクセルの応答を検査し、マイクロバンプによる接続不良 は 0.02% であると評価できた.

SOFIST3 および SOFIST4 の開発に関しては,村山 (M2) が HSTD12 国際会議で報告した.



図 81 SOI による積層の概念。2つのチップは接合部に金の円筒状マイクロバンプ(右図)をスッパタ形成した上で圧縮接合する。積層した上のチップのシリコン部はエッチングし除去する。埋め込み酸化膜を貫通したビア (TBV:through BOX via) に接続パッドを形成し信号を外部に取り出す。

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 TIA の枠組みで研究を継続してきた。2017 年度までに国際廃炉機構および東京電力の事業の下に 1~3 号機のすべての測定を完了した。

2019 年には予備実験として東海村の原子炉で $2011 \sim 2014$ 年にかけて行った計測結果が、論文として PTEP に掲載された。また、1 号炉の観測結果(解け落ちて燃料装荷位置にはほとんど残っていない)も PTEP に投稿し受理された。

宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索 (COBAND) に向けた 遠赤外一光子検出のための超伝導体検出器の開発 (武内, 金, 倉知)

極低温下での STJ からの微小信号の読み出しのために、SOI 技術を用いた容量性負帰還差動増幅回路による電荷積分型増幅器を開発している。我々が用いる全空乏化型 SOI(FD-SOI) では極低温でもキンク効果が起きにくいことが特長のひとつである。一方で極低温下ではキャリアのドレインアバランシェが発生しやすいが、H 型ゲート構造を持つ SOI-MOS FET を用いることで同現象を抑制できることを確認した。これにより、動作パラメータはシフトするものの、極低温でも動作する CMOS FET が設計できることを実証した。

また、より優れたエネルギー分解能が期待できる Hf-STJ の作製は、 $K E K 先端計測器開発棟クリーンルームプロセス装置を用いて成功しているが、<math>^{55}$ Fe からの X 線信号を韓国 IBS の ADR を用いて測定することに成功した。これは韓国との共同研究の成果のひとつである。

COBAND 実験の詳細は素粒子構造部門の章に記述されている.

SOI を用いたより高性能な検出器の実現をめざして(倉知)

倉知は SOI 技術を用いてより高性能な検出器の実現をめざした研究開発を進め、原や武内・金との共同研究でのいくつかの成果として現れている。SOFIST4 で既述した金マイクロバンプを用いたピクセル単位の3 次元接合は TIA かけはしを端とした成果 (I. Kurachi et al., "Application of Three Dimensional Chip Stacking Technology for Fully Depleted Silicon-on-Insulator Quantum Beam Imager," ECS Trans. 92-5, pp. 29-38, 2019.) であり、極低温でもキャリアアバランシェの発生しない MOS FET は COBAND 実験用増幅器の核心設計となっている。SOI 素子は埋め込み酸化膜の存在のため放射線による電荷蓄積効果(TID)の影響を受けやすい。特に FD-SOI では FET チャンネルが直接埋め込み酸化膜に接するために影響が大きい。そのため意図的に部分空乏化(PD)させることにより TID 耐性を向上できるプロセス条件の試験を進めている。2 重酸化膜埋め込み構想の SOI 基板を用いて、TID の影響を受けた 1 層目の素子に対して 2 層目の電極に負電位を与える TID 補償の研究は原らと進めてきたが、補償電圧をジャンクションレス FET の閾値変動から自動的に設定できる回路の検討を進めている。また、TID による FET 特性変動をモデル化し、SPICEに組み込むことことで 100 kGy までの実測にシミュレーションを一致させることに成功した。

高エネルギー X線 2次元検出器を用いた高度物質構造科学研究 (西堀)

SPring-8 における長期利用課題として、単結晶 X 線回折ビームライン BL02B1 において、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 年より同研究を推進している。CdTe 半導体を用いた PILATUS 検出器(1M)の立ち上げ研究を行い 2019 年 4 月より実験を開始した。幾つかの問題点を特定し、原因の解明、問題除去方法の開発について国際学会 ICDM2019 で発表した。2020 年 1 月には販売前のPILATUS-4M 装置を導入し同社の技術者とともにマシンタイムで試用実験を行った。来年度以降も CdTe 検出器の利用研究を進めていく。

FC-HSTS の開発および紫外線照射で水素放出が誘起されるホウ化水素シートの研究(近藤)

(1)FC-HSTS の開発

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、実用に至るいくつかの課題を克服して 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進めてきた。その結果、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す実験結果が得られ、これは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。現在、投稿論文の査読に対応中である。

(2) 紫外線照射で水素放出が誘起されるホウ化水素シートの研究

ホウ素と水素のみで構成される二次元物質(ボロファン)については、グラフェンを凌駕する優れた電子材料特性や水素吸蔵特性を有するという予想があったが、我々は2017年に世界で初めてホウ化水素シートの合成に成功した (H. Nishino et al., https://doi.org/10.1021/jacs.7b06153). この新素材が光機能を持つことを確認し、Nature Communicationsで発表した (R. Kawamura et al., Nature Comm. 10 (2019) 4880). 研究は、室温・大気圧において紫外線照射のみで水素を放出する軽量で安全な水素キャリア材料を提供し、ま

た、電気・半導体素材、電気化学デバイス、光触媒などの分野への応用にもつながる。成果は筑波大、東工大、東大物性研、高知工科大で共同プレスリリースを行い、10件を超える新聞報道として扱われた。

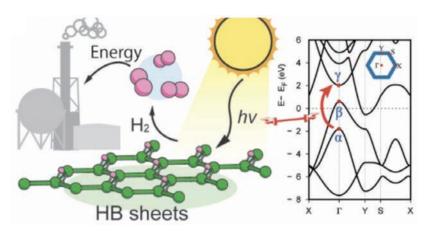


図 82 室温でも紫外線照射で分解され水素を放出するホウ化水素シートとエネルギーバンド構造.

〈論文〉

- 1. H. Fujii, K. Hara, S.H. Kim et al., "Imaging the inner structure of a nuclear reactor by cosmic muon radiography", PTEP Vol. 2019. Issue 5, 053C01 (2019).
- 2. S. Wada, K. Hara, K. Nakamura et al.,, "Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector", PoS(Vertex2019)057 (2019).
- 3. K. Nakamura. K. Hara, Y. Ikegami et al, "Development of a radiation tolerant fine pitch planar pixel detector by HPK/KEK", NIM A924 p64-68 (2019).
- K. Hara, I. Kurachi, Y. Ikegami et al. "Radiation hardness of silicon-on-insulator pixel devices", NIM A924 p426-430 (2019).
- 5. T. Tsuboyama, Y. Ikegami, K. Hara, "R&D status of SOI-based pixel detector with 3D stacking readout", NIM A924 p422-425 (2019).
- S. Ono, I. Kurachi, Y. Ikegami, K. Hara et al., "Development of a monolithic pixel sensor based on SOI technology for the ILC vertex detector", NIM A924 p431-435 (2019).
- S. Wada, K. Hara, K. Nakamuara et al., "Evaluation of characteristics of Hamamatsu low-gain avalanche detectors", NIM A924 p480-486 (2019).
- 8. I. Kurachi, K. Hara et al., "Investigation of radiation hardness improvement by applying back-gate bias for FD-SOI MOSFETs", NIM A924 p404-408 (2019).
- 9. C. Lacasta. K. Hara et al., "Design of the first full size ATLAS ITk strip sensor for the endcap region", NIM A924 p131-141 (2019). (国際共同研究)
- 10. A. J. Blue. K. Hara et al., "Test beam evaluation of silicon strip modules for ATLAS phase-II strip tracker upgrade", NIM A924 p108-111 (2019). (国際共同研究)
- 11. V. Cindro, K. Hara et al., "Measurement of the charge collection in irradiated miniature sensors for the upgrade of the ATLAS phase-II strip tracker", NIM A924 p153-159 (2019). (国際共同研究)
- 12. R. F. H. Hunter. K. .Hara et al, "First bulk and surface results for the ATLAS ITk Strip stereo annulus sensors", NIM A924 p142-146 (2019). (国際共同研究)

〈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, S. Wada et al., "Looking for dark-sector long-lived particles with ATLAS",
 2019 Joint Workshop of FKPPL and TYL/FJPPL, Jeju Korea, 2019 May 8-10. (一般講演).
- 2. K. Hara, "Poster Session Summary Talk",

Vertex 2019, Lopud, Croatia, 2019 Oct 12-18. (招待講演).

3. S. Wada, K. Hara, K. Nakamura et al., "Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector",

Vertex 2019, Lopud, Croatia, 2019 Oct 12-18. $(\sharp \lambda \beta -)$.

4. <u>K. Hara, K. Nakamura, Y. Ikegami et al., "Charge Collection of the ATLAS ITk Prototype Silicon Strip Sensors ATLAS 17LS for the HL-LHC".</u>

12th Hiroshima Symposium (HSTD12), Hiroshima, 2019 Dec 14-18. (一般講演).

- 5. <u>K. Sato</u>, K. Hara, Y. Ikegami, et al., "Characterization of Si Sensors irradiated up to 1e17/cm²", 12th Hiroshima Symposium (HSTD12), Hiroshima, 2019 Dec 14-18. (一般講演).
- 6. <u>K. Onaru</u>, K. Hara, K. Nakamura et al., "LGAD detector timing measurement and simulation for fine segmentation".

12th Hiroshima Symposium (HSTD12), Hiroshima, 2019 Dec 14-18. (ポスター).

- 7. H. Murayama, K. Hara, et al., "SOIFST SOI pixel detector for the ILC", 12th Hiroshima Symposium (HSTD12), Hiroshima, 2019 Dec 14-18. (ポスター).
- 8. <u>K. Hara</u>, I. Kurachi et al., "SOFIST, an SOI based pixel sensor for the ILC", Future Linear Collider Workshop (LCWS2019), Sendai, 2019 Dec 28-Nov 1. (一般講演).

[国内学会]

- 1. 原和彦, 倉知郁生,他:素粒子実験用 SOFIST ピクセルセンサーの 3 D 積層,第 4 回 3 次元積層半導体量子イメージセンサ研究会 (つくば市) 2020 年 1 月 27 日. (招待講演).
- 村山仁志,岩波四季恵,原和彦,倉知郁生,他:SOI pixel detector development, 第2回量子線イメージング研究会 (姫路市) 2019 年9月 25-26 日. (ポスター).
- 3. <u>原和彦</u>, 金信弘, 他:ミューオンラジオグラフィによる福島第一原発の燃料デブリの観測, SMART2019 (松江市) 2019 年 11 月 18-19 日. (招待講演).
- 4. 原和彦:SOFIST, an SOI based pixel sensor for the ILC,

宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学.

- 5. 大鳴匡史, 他, "内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) のベータ線による時間分解能測定システムの開発", 日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大(2020 年). (一般講演).
- 6. 村山仁志, 他, "ILC 崩壊点検出器としての位置・時間計測が可能な SOI ピクセル検出器 SOFIST の性能評価", 日本物理学会 第 75 回年次大会,名古屋大 (2020 年). (一般講演).
- 7. 佐藤勝哉, 他, "LHC 高輝度化に向けた ATLAS 検出器アップグレードのため RD53A ASIC を搭載したピクセル検出器の性能評価".

日本物理学会 第75回年次大会,名古屋大(2020年).(一般講演).

- 8. <u>谷野恭介</u>, 他, "ATLAS 検出器アップグレードに向けた新型 ASIC を用いたバイアスレール起因のノイズ評価", 日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大 (2020 年). (一般講演).
- 9. 原田大豪,
 他, "HL-LHC ATLAS ピクセル検出器性能評価のためのテストビーム飛跡システムの開発",

 日本物理学会
 第 75 回年次大会,名古屋大 (2020 年). (一般講演).
- 10. 大鳴匡史, 他, "内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) に関する基礎研究", 日本物理学会 秋季大会, 山形大 (2019 年). (一般講演).
- 11. 村山仁志, 他, "精密な位置・時間計測が可能な SOI ピクセルセンサー SOFIST の研究開発", 日本物理学会 秋季大会, 山形大 (2019 年), (一般講演).
- 12. 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性能評価, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス.
- 13. <u>若狭玲那</u>, 他,"Hit efficiency Studies",

ATLAS-Japan Silicon Workshop, 東工大,, 12月19-20日. (一般講演).

- 14. 山内大輝, 他, "Development of Performance Analysis Tool", ATLAS-Japan Silicon Workshop, 東工大, 12月19-20日. (一般講演).
- 15. <u>和田冴</u>, 他, "SCT IV scan 解析",

ATLAS-Japan Silicon Workshop, 東工大,, 12月19-20日. (一般講演).

- 16. 原和彦, 他, "Strip Sensor QC/QA in Japan",
 - ATLAS-Japan Silicon Workshop, 東工大,, 12月19-20日. (一般講演).
- 17. <u>谷野恭介</u>, 他, "ATLAS 検出器増強に向けた新型 ASIC 搭載による pixel sensor module の性能評価", ATLAS-Japan Silicon Workshop, 東工大,, 12 月 19-20 日. (一般講演).
- 18. 佐藤勝哉, 他, "Bump bond 高抵抗問題",

ATLAS-Japan Silicon Workshop, 東工大,, 12月19-20日. (一般講演).

〈 競争的資金 〉

- (a) 科学研究費 基盤研究 (B) 「高時間分解能を併せもつ高位置分解能 4 次元半導体検出器の実現」, 2019 2022 年度, 研究代表者: 原和彦, 5,590 千円 (直接経費 4,300 千円、間接経費 1,290 千円) (2019 年度)
- (b) TIA かけはし 「3 次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」, 2019 年度, 研究分担者: 原和彦, 150 千円 (2019 年度)
- (c) 科学研究費 新学術領域研究 「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋」(高橋忠孝 領域代表) 公募研究「医療機器 TOF-PET に用いる半導体検出器の開発」, 2019 2020 年度, 研究代表者: 中村浩二, 4,100 千円 (2019 年度)
- (d) 日米科学技術協力事業 (高エネルギー物理分野) 「高エネルギー加速器実験用の高時間分解能をもつ半導体検出器の開発」, 2019 年度, 研究代表者:中村浩二/Artur Apresyan, 5000 千円 (2019 年度)
- (e) 日仏素粒子物理学研究所事業「New Challenge for Internal Pixel Tracker construction」, 2019–2024 年度, 研究代表者:中村浩二, 250 千円 (2019 年度)

〈 学位論文 〉

(修士論文)

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2020 年 2 月

- 1. 安部竜平 「PDD 構造をもった SOI 検出器の放射線損傷」
- 2. 岩波四季恵 「大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器 INTPIX7 を用いたビーム飛跡検出のための開発研究」
- 3. 大鳴匡至 「4 次元検出器開発に向けた内部増幅機能つき半導体検出器 LGAD の時間分解能に関する研究」
- 4. 笠島誠嘉 「COBAND 実験における単一光子検出を目指した STJ 信号の極低温電荷積分型増幅器の開発研究
- 5. 原田大豪 「RD53A を搭載した HL-LHC 用 ATLAS ピクセル検出器の閾値およびテストビームによるクロストークの研究」
- 6. 村山仁志 「ILC 崩壊点検出器としての位置・時間計測が可能な SOI ピクセル検出器 SOFIST の性能評価」
- 7. 渡辺圭敏 「SOI-MOSFET 検出器における BOX 電荷自動補正回路の放射線耐性の評価」

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 82 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(金谷和至氏作 2017/10)。

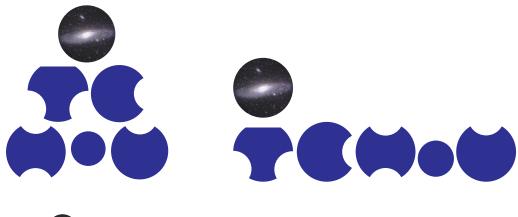




図83 宇宙史研究センター (朝永センター) のロゴとロゴタイプ

15 競争的資金獲得状況

職名	構成員名	(分担の場合) 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	久野成夫		その他		南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検 討	¥160,000
助教	新田冬夢		科研費補助金·学 術研究助成金	研究成果公開発表 (B)	自作の望遠鏡で宇宙を見よう	¥430,000
助教	橋本拓也		科研費補助金·学 術研究助成金	科学研究費助成事 業	巨大電波望遠鏡群を用いて探る宇宙再電離 時代にある銀河の星間媒質の研究	¥94,000
助教	橋本拓也		科研費補助金·学 術研究助成金	卓越研究員事業費	多波長の宇宙観測によって明らかにする宇宙 初期の銀河の性質	¥7,820,000
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	¥8,190,000
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	¥650,000
教授	金谷和至		科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(C)	グラジエントフローによるクォーク・ハドロン物 質の熱力学特性	¥1,300,000
准教授	伊敷吾郎		科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(C)	行列模型による超弦理論の非摂動的定式化 の研究	¥1,170,000
助教	飯田崇史		科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(B)	大発光量無機シンチレータで目指す宇宙史研 究	¥5,720,000
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
助教	飯田崇史		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)	フッ素系界面活性剤による透明な水シンチ レータの実現	¥2,210,000
教授	小沢顕		科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(A)	蓄積リングの質量測定によるハロー原子核の 探査	¥5,330,000
助教	向井もも		科研費補助金·学 術研究助成金	若手研究	稀少RIリングを用いた未踏核種の精密質量測 定による金、白金の起源解明	¥2,340,000
講師	中條達也		科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(A)	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	¥8,970,000
講師	中條達也	杉立徹	科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(B)	LHC鉛原子核衝突:フォトンで探る極初期状態 (initial stage)	¥2,000,000
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	¥5,450,000
講師	中條達也		共同研究	日仏事業 (KEK- CNRS)	QGP Tomography with photons, jets, and heavy flavors	¥400,000
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	¥3,640,000
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 度クォーク物質の研究	¥1,000,000
准教授	江角晋一		科研費補助金·学 術研究助成金	基盤研究(S)	高次ゆらぎと粒子相関による高密度クォーク 核物質の1次相転移と臨界点観測への挑戦	¥17,290,000
准教授	符公和		共同研究	金沢大学環日本海 域環境研究センター 共同研究	日本海と太平洋における人為起源129Iと 137Csおよび36CIの降下量変動評価と海洋循環トレーサーへの適用	¥210.000
准教授		原和彦	科研費補助金·学 術研究助成金	2019年度 基盤研究 (B)	高時間分解能を併せもつ高位置分解能4次元 半導体検出器の実現	¥5,590,000
	原和彦	中村浩二	その他	日米科学協力	高エネルギー加速器実験用の高時間分解能をもつ半導体検出器の開発	¥5,000,000
准教授		倉知郁夫	その他	TIAかけはし	3次元構造半導体量子イメージセンサーの調 査研究	¥150,000

16 共同研究・受託研究

職名	構成員名	(海外の場合は国名を括弧で付記) 相手先機関	金額	期間	内容
教授	三明康郎	スイス原子核共同研究機構CERN		2007-	QGP研究、フロー、ジェットエネルギー損失の研究
准教授	江角晋一	アメリカブルックヘブン国立研究所BNL		2000-	QGP研究、クォーク流体の研究
准教授	江角晋一	アメリカブルックヘブン国立研究所BNL		2016-	QGP研究、QCD相構造、臨界点の探索研究
准教授	原和彦	Marie-Hélène Genest (LAL)	2500 ユーロ	2019-	Looking for dark-sector long-lived particles with ATLAS
准教授	原和彦	Vitalily Fadeev et al. (USCS/CERN/others)		2005-	Construction of Strip Detector for HL-LHC ATLAS Itk
	原和彦/中村浩 二(KEK)	Reisaburo Tanaka (LAL)	250000ユーロ	2019-	New Challenge for Internal Pixel Tracker construction (2019–2024)

17 各種受賞等

職名	構成員名	(共同の場合) 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, Soo-Bong KIM, 佐藤構二, 武内勇司, 受川 史彦, 吉田拓生	CDF and D0 Collaborations	the 2019 European Physical Society [「] High Energy and Particle Physics Prize	for the discovery of the top quark and the detailed measurement of its properties		European Physical Society
	金信弘		2018年度(第42回)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 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	2019/5/11	成和記念財団
その他	足立宏幸		2019年度筑波大学数理 物質科学研究科物理学 専攻長賞	The Berezin-Toeplitz quantization for the fuzzy torus with a magnetic flux		筑波大学数理物 質科学研究科

18 新聞等報道・特記事項

職名	構成員名	(共同の場合) 共同発表者名	新聞·雑誌名	報道内容	年・月・日
	COBAND実験	ATLAS グルー		「科学の扉ー誕生直後の宇宙を探れ」に筑波大学宇宙 史研究センターがメインプロジェクトの一つとして推進し	
その他	グループ	プ	朝日新聞	ているCOBAND実験に関しての紹介がある。	2020/3/30

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	久野成夫	年会開催地理事	日本天文学会	2019.6 — 2021.5
教授	久野成夫	研究奨励賞選考委員会委員	日本天文学会	2017.6 — 2021.5
助教	橋本拓也	メンバー	次世代遠赤外線宇宙望遠鏡SPICA 日本国内科学検討チーム	
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	日本物理学会理事	日本物理学会	2019.3 –
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 –
教授	受川史彦	日本物理学会素粒子実験領域 代表	日本物理学会	2019.4 – 2020.3
その他	金 信弘	高エネルギー物理学奨励賞選 考委員会委員	高エネルギー物理学研究者会議	2018年度, 2019年度
准教授	原和彦	International Advisory Committee	Vertex2019	2012-
准教授	原和彦	NSS Topic Convenor	IEEE NSS	2019
准教授	原和彦	MG委員	TIA光量子計測	2018—