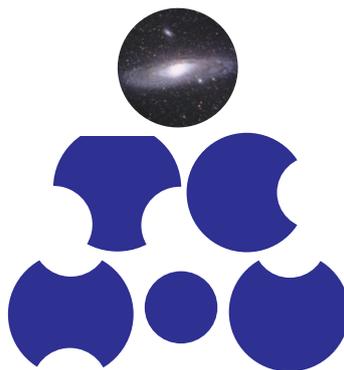


筑波大学 数理物質系
宇宙史研究センター

2020 年度
活動報告書



宇宙史研究センター

2021 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。各部門が中核を担っているプロジェクトの推進とともに、分野間の交流を促進することで新たな学問分野の創出も目指しています。

この報告書は、宇宙史研究センターの、2020 年度の活動実績をまとめたものです。残念ながら、2020 年度は新型コロナウイルスのため活動が大きく制限されることになりました。特に、海外での研究会等に現地で参加することができず、また、海外の研究者を招聘することもできず、国際的な交流が難しい状況が現在も続いています。これは特に、まさにこれから国際舞台に立つことを楽しみにしていた大学院生の皆さんには、非常に気の毒な状況となってしまいました。また、センターとして例年力を入れてきた一般の方への研究成果の紹介も、ほとんどの機会が失われてしまいました。今後、状況が改善され、一日でも早くこれまで通り国際交流や広報活動を行える日が来ることを期待したいと思います。

このようにこれまでに経験のない難しい状況の一年でしたが、それでもセンター構成員一同の努力によって多くの成果をあげることができましたので、ご覧いただけますと幸いです。

センターの活動記録等については、センターのウェブサイト

<https://tchou.tomonaga.tsukuba.ac.jp/>

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。

2021 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	2020 年度活動概要	3
2	宇宙史研究センターについて	5
2.1	設置の経緯	5
2.2	研究目的	5
2.3	朝永センターの名称について	6
2.4	宇宙史研究センターの構成	7
2.5	宇宙史研究センターの運営体制	8
2.6	宇宙史研究センターの活動スペース	9
3	構成員	10
3.1	国際テニュアトラック教員	11
3.2	海外教育研究ユニット招致	11
3.3	クロス・アポイントメント教員	12
3.4	その他の人事制度の活用	12
3.5	研究員	12
4	受賞	14
4.1	飯田崇史助教 東北大金研 若手萌芽研究最優秀賞受賞 (2020/10)	14
4.2	奈良誠大 (大学院生) 第 25 回大気化学討論会 学生優秀発表賞受賞 (2020/11)	14
5	各種会議	15
5.1	構成員会議	15
5.2	運営協議会	17
5.3	運営委員会	18
6	研究集会・セミナー	19
6.1	第 29 回「VERTEX2020」研究会	19
6.2	第 5 回「3 次元積層半導体量子イメージセンサ」研究会	19
6.3	極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」	20
6.4	TChOU ワークショップ	20
6.5	宇宙史セミナー	21
7	一般向け広報活動	22
7.1	令和 3 年度 科学技術週間	22
8	2020 年度会計報告	23

第 II 部	研究部門活動報告	25
9	南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy)	27
10	素粒子構造研究部門 (Division of Elementary Particles)	36
11	クォーク・核物質研究部門 (Division of Quark Nuclear Matters)	59
12	光量子計測器開発部門 (Division of Photon and Particle Detectors)	91
第 III 部	資料	103
13	センター細則	105
14	ロゴ	107
15	競争的資金獲得状況	108
16	共同研究・受託研究	108
17	各種受賞等	109
18	新聞等報道・特記事項	109
19	学会活動・各種委員等	109

第I部

全体報告

1 2020 年度活動概要

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）の2020年度活動概要を、以下にまとめる。

➤各研究部門の活動

・南極天文学研究部門

- ・ NRO45m鏡、ALMAなどによる銀河の観測的研究
- ・ 野辺山45m鏡用MKIDカメラの開発
- ・ 南極天文学の推進

・素粒子構造部門

- ・ 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
- ・ 宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索
- ・ 超弦理論の研究

・クォーク・核物質研究部門

- ・ CERN-LHC, BNL-RHIC, J-PARC における高温・高密度クォーク核物質 QGP の研究
- ・ 理化学研究所 RIBF、筑波大加速器施設における宇宙元素合成の研究
- ・ 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研究

・光量子計測器開発部門

- ・ 超電導検出器、SOI技術、LGAD検出器の開発

➤人事異動

- ・ 金谷和至教授 2020/4/1 定年後、特命教授として着任
- ・ 三明康郎教授 2020/4/1 定年後、特命教授として着任
- ・ 轟木貴人助教 2020/5/1 着任
- ・ 新田冬夢助教 2021/1/1 テニユア獲得
- ・ 江角晋一准教授 2021/2/1 教授に昇任

➤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 2020年6月15日(全体報告+11講演) オンライン
 - ・ 第2回 2020年11月30日(全体報告+11講演) オンライン

➤運営委員会

- ・ センターの事業計画、予算、施設の管理、などに関することを審議・決定
- ・ 毎月1回開催(8月を除く) オンライン
 - ・ 2020年度 4/13, 5/11, 6/8, 7/6, 9/14, 10/12, 11/9, 12/14, 1/12, 2/8, 3/8

➤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
 - ・ 第1回 2021年3月29日 オンライン

➤宇宙史セミナー

- 2020/2/25 杉浦哲郎氏 (Yahoo Japan, 筑波大学OB) “ヤフーにおけるサイエンス”

➤研究集会

- 2020/10/5-8 第29回「VERTEX2020」研修会 @オンライン
 - 参加者135名
- 2021/2/24 第5回「3次元積層半導体量子イメージセンサ」研究会 @オンライン
 - 参加者 95名
- 2021/3/15 極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」@オンライン
 - 参加者 20名
- 2021/3/23-30 TCHoHワークショップ @オンライン
 - 南極天文 3/25、素粒子構造 3/23、30、クォーク核物質 3/30、光量子 3/29

➤受賞など

- 2020/10/6 飯田崇史助教
東北大学金属材料研究所
「第8回研究部共同利用・共同研究 若手萌芽研究最優秀賞」
- 2020/11/13 奈良誠大 (筑波大修士2年)
「第25回大気化学討論会学生優秀発表賞」

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 のウェブサイトで入手できる。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年度に大学附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2020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 (「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」、「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」、「J-PARC における重イオン加速による超高密度ストレンジネス核物質の研究」、「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」)。また、宇宙観測分野では、南極テラヘルツ望遠鏡計画を推進している。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、これら重要実験プロジェクトと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。

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。

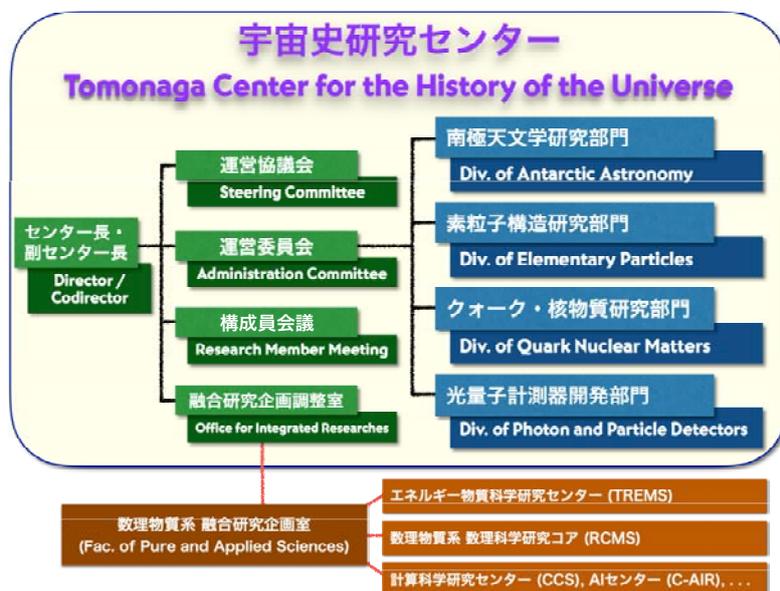


図4 宇宙史研究センターの運営体制

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 (404m²) の使用が許可されている。毎年度使用希望を更新しなければならないが、センターの活動に必要なとの理解を得て、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。

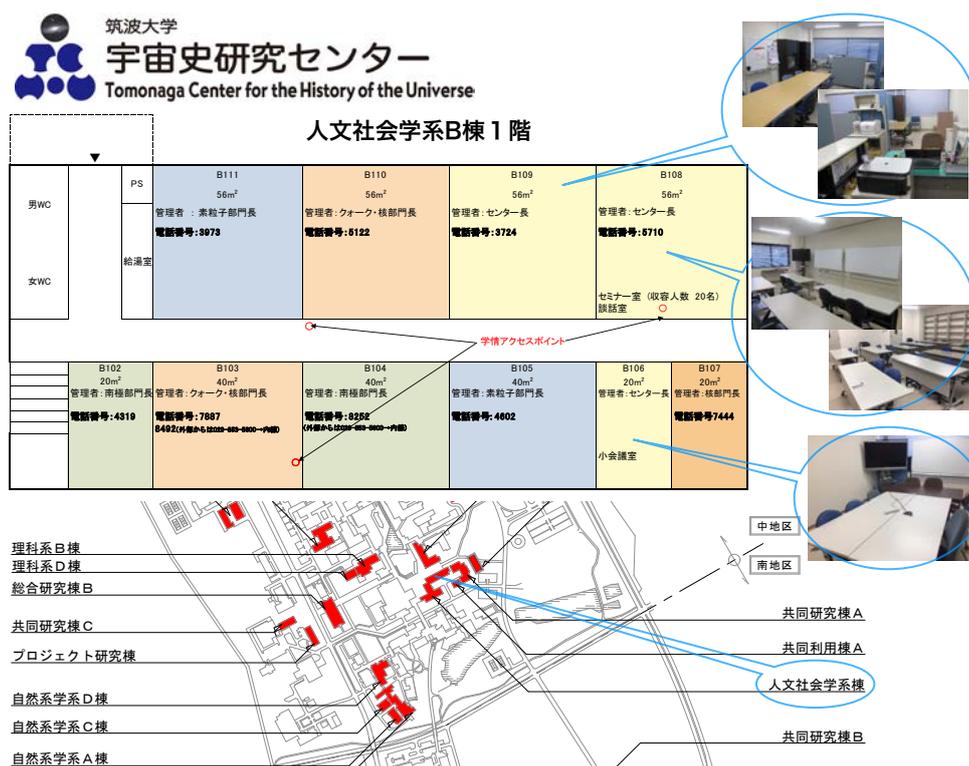


図 5 宇宙史研究センター活動スペース

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に基づき雇用される研究員からなる。2020 年度当初の構成教員・連携教員を図 6 に、2021 年度当初の構成教員・連携教員を図 7 に、それぞれ示す。主な異動は、以下である。金谷和至前センター長が 2020 年 3 月で定年となり、2020 年度から久野成夫教授が新センター長に就任した。なお、久野教授は南極天文学研究部門長を兼任する。2020 年 5 月 1 日付で轟木助教が着任した。江角クォーク・核物質研究部門長が 2021 年 2 月 1 日付で教授に昇任した。新田助教が 2021 年 1 月 1 日付でテニユアを獲得した。2020 年度の研究員を表 1 に示す。

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)、渡邊祥正(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)、

廣瀬茂輝(a)、金信弘(p特命)、Soo-Bong Kim(p海外unitPI: 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)、山口真之(apCA:埼玉大)、

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

Marco van Leeuwen(p海外unitPI: Utrecht大)

連携教員：藏増嘉伸(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)、齋藤彦彦(p:理研)、山口由高(ap:理研)

研究員：坂井真吾、Ashutosh Kumar Pandey

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)、富田成夫(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 6 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2020/4) : a/l/ap/p はそれぞれ、助教/講師/准教授/教授を表す。をを表す。

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、CiEISE 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

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)、渡邊祥正(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)、

廣瀬茂輝(a)、金信弘(p特命)、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(p)

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)、三明康郎(p特命)、金谷和至(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unitPI: Utrecht大)、

Marco van Leeuwen(p海外unitPI: Utrecht大)

連携教員：藏増嘉伸(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(p:広大)、齋藤武彦(p客員:理研)、山口由高(ap客員:理研)

研究員：坂井真吾、Ashutoh Kumar Pandey

光子計測器開発部門 部門長：原和彦(ap)

構成教員：江角晋一(p)、武内勇司(ap)、金信弘(p特命)

連携教員：西堀英治(p)、富田成夫(ap)、近藤剛弘(ap)、倉知郁生(特別p:D&S Co.Ltd.)、

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

2021/04

図7 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2021/4)

員（任期付）も雇用している。

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。

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」へ応募し採択され国際公募を行った結果、新井田貴文助教が採用されている(2019年7月1日着任)。

3.2 海外教育研究ユニット招致

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

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、Kim Soo-Bong 教授は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進めている。

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

3.3 クロス・アポイントメント教員

CiRiSE 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んでいる。筑波大学における業務割合は 10% である。これにより、CiRiSE 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）が採用された。2017 年 10 月にそれぞれ対応する TChOU の研究部門に配属され、現在も各部門の研究力強化に貢献している。

3.4 その他の人事制度の活用

科研費助教 江角晋一部門長の科研費（基盤 S）によって、クォーク・核物質研究部門に轟木貴人助教が採用された（2020 年 5 月 1 日着任）。

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ている。2020 年度には、新たにクォーク・核物質研究部門に理化学研究所から齋藤武彦客員教授と山口由高客員准教授が配置された。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。

特命教授 2020 年 3 月で退官となった金谷和至前センター長と三明康郎教授は、特命教授として引き続き宇宙史研究センターの研究活動に貢献している（2020 年 4 月 1 日着任）。

3.5 研究員

機能強化経費などにに基づき、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 2020 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-
坂井真吾	クォーク・核物質研究部門	物理学域	2020/9/1-

4 受賞

4.1 飯田崇史助教 東北大金研 若手萌芽研究最優秀賞受賞 (2020/10)

素粒子構造部門の飯田崇史助教が、東北大学金属材料研究所「第8回研究部共同利用・共同研究 若手萌芽研究最優秀賞」を受賞した(研究題目:「二重ベータ崩壊探索用シンチレータ結晶の新規開発」)。この賞は、東北大学金属材料研究所の共同利用・共同研究で優れた成果を上げた若手研究者に対し、研究意欲を高め、更なる研究の展開を支援し、材料科学研究分野の発展に資することを目的として授与されるものである。(2020年10月6日)。



図8 飯田崇史助教 東北大金研 若手萌芽研究最優秀賞受賞 (2020年10月6日)

4.2 奈良誠大 (大学院生) 第25回大気化学討論会 学生優秀発表賞受賞 (2020/11)

南極天文学研究部門の笠井康子客員教授と共同研究を行っている奈良誠大氏(筑波大修士2年)が、第25回大気化学討論会「学生優秀発表賞」を受賞した(発表題目:「超電導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)の広範囲観測による塩化水素の鉛直分布プロファイルの妥当性検証」)。この賞は、大気化学討論会において優秀な研究成果発表を行った学生会員を、日本大気化学会として表彰するものである。

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。後半の成果報告は、センター構成員以外にも公開している。今年度は、新型コロナウイルスの感染防止のため、オンラインでの開催となった。

5.1.1 2020 年度第 1 回構成員会議

日時 2020 年 6 月 15 日 (月) 9:00–17:00

場所 オンライン (zoom)

出席者 受川、江角、久野、武内、原、ほか (計 34 名)

1. 前回議事メモ確認 (久野)
2. 宇宙史研究センター概要 (久野)
3. 2019 年度全体活動概要・2020 年度活動予定 (久野)
4. 2019 年度各部門活動報告
 - 南極天文学研究部門 (久野)
 - 素粒子構造研究部門 (武内)
 - クォーク・核物質研究部門 (江角)
 - 光量子計測器開発部門 (原)
5. 審議・報告事項
 - 昨年度、「卓越大学院」へ申請し不採択となった「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」を修正して「138 億年史学位プログラム」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。
 - 令和 2 年度学内予算要求として「宇宙史研究に用いる光量子検出器性能試験システム」を申請したことが報告された。
 - 「第 4 期中期目標を見据えた全学的取組構想調書」に、「宇宙史研究センター (朝永センター) の拡充・整備」および「南極 10m 天文台の実現」を提案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 (11 講演)
 - ATLAS 実験 (廣瀬茂輝)
 - エネルギー走査と臨界点探索 (野中俊宏)
 - NbTiN-Al MKID アレイを用いた野辺山 45m 鏡用電波カメラの開発 (新田冬夢)
 - 4 次元飛跡検出器の開発 (原 和彦)
 - 紫外線照射で水素放出が誘起されるホウ化水素シート (近藤剛弘)
 - 超弦の場の理論 (石橋延幸)
 - グラジエントフローによる QGP 熱力学 (金谷和至)
 - 狭帯域フィルターによる Ly α 輝線撮像から探る銀河形成 (菊田智史)

- COBAND 実験のための遠赤外光源開発 (吉田拓生)
- 宇宙元素合成と超重元素 (和田道治)
- アルマ望遠鏡によって明らかにされたビッグバン後 10 億年未満の銀河の性質 (橋本拓也)

5.1.2 2020 年度第 2 回構成員会議

日時 2020 年 11 月 30 日 (月) 9:00-17:00

場所 オンライン (zoom)

出席者 受川、江角、久野、武内、原、ほか (計 44 名)

1. 2020 年度後期全体活動概要・2020 年度活動予定 (久野)
2. 中間評価の結果報告 (久野)
3. 2020 年度前期各部門活動報告
 - 南極天文学研究部門 (久野)
 - 素粒子構造研究部門 (武内)
 - クォーク・核物質研究部門 (江角)
 - 光量子計測器開発部門 (原)
4. 審議・報告事項
 - 2020 年 10 月 6 日に、飯田崇史助教 (素粒子構造部門) が東北大学金研若手萌芽研究最優秀賞を受賞したことが報告された。
 - 2020 年度の卓越大学院への申請 (「138 億年史学位プログラム」コーディネータ: 重田育照教授 (CCS, 生命物理)) が不採択となったことが報告された。
 - 令和 3 年度学内予算要求として「宇宙史研究に用いる光量子検出器性能試験システム」を申請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。
 - 宇宙史研究センターの中間評価の評価結果および評価コメントについて報告された。
5. 各プロジェクト成果報告 (11 講演)
 - LHC 実験での荷電ヒッグス粒子の探索 (佐藤構二)
 - テンソル繰り込み群を用いたゼロ温度高密度領域における NJL モデルのカイラル相転移の解析 (藏増嘉伸)
 - Advantages of a wide Field-of-view camera for galaxy survey and its data reduction techniques (Pranshu Mandal)
 - COBAND プロジェクトにおける STJ 信号読出のための極低温 SOI 増幅器の開発 (武内勇司)
 - 重イオン衝突における渦と偏極 (新井田貴文)
 - 高時間分解能検出器 (LGAD) の細密電極化に関する開発 (中村浩二)
 - ATLAS ITk ストリップ型シリコン検出器の初期量産 (原 和彦)
 - 銀河における星間ガス質量の高精度な導出 (徂徠和夫)
 - 行列正規化とその一般化について (伊敷吾郎)
 - 宇宙線生成核種分析による宇宙線イベントの研究 (笹 公和)
 - 原始銀河団環境における大質量銀河と超巨大ブラックホール形成の研究 (矢島秀伸)

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。

表2 2020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	久野成夫	物理学	教授
第7条第1項第2号	副センター長	受川史彦	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	准教授
第7条第1項第3号	クォーク・核物質研究部門	江角晋一	物理学	教授
第7条第1項第3号	光量子計測開発部門	原和彦	物理学	准教授
第7条第1項第4号	数理物質系長	齊藤一弥	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 素粒子原子核研究所	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		特任教授
第7条第1項第6号	計算科学研究センター	梅村雅之	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	櫻井鉄也		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

2020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特任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 2020年度第1回運営協議会

日時 2021年3月29日 14:00-16:30

場所 オンライン（zoom）

1. 第1部 14:00-15:30 （公開）

- 全体活動報告（久野）
- 南極天文学研究部門活動報告（久野）
- 素粒子構造研究部門活動報告（武内）
- クォーク・核物質研究部門活動報告（江角）
- 光量子計測開発部門活動報告（原）

2. 第2部 15:30 - - 16:30（非公開）運営協議員との質疑・応答

- 予算執行状況報告、将来計画、その他

2020年度の運営協議会を2021年3月29日に開催し運営協議会メンバーによる審議を行った。今年度は、新型コロナウイルスの影響でオンラインでの開催となった。

第1部はセンター教員から全体及び各部門の活動状況等報告で、TCHoU ワークショップと兼ねて一般に公開された。第2部は、運営協議委員とセンターの活動、院生の教育、将来計画などについて議論がかわされ、外部委員から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、例年行っている懇親会は中止となった。

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することまで、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。2020年度の運営委員会委員名簿を表3に示す。

表3 2020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	久野 成夫	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

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。

2020年度の開催実績は、以下のとおり：

2020年度 4/13, 5/11, 6/8, 7/6, 9/14, 10/12, 11/9, 12/14, 1/12, 2/8, 3/8

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 ウェブサイトのニュースコーナーも参照されたい。

6.1 第 29 回「VERTEX2020」研究会

日時 2020 年 10 月 5 日 (月) ~8 日 (木)

場所 オンライン

参加者 135 名 (日本人 20 名)

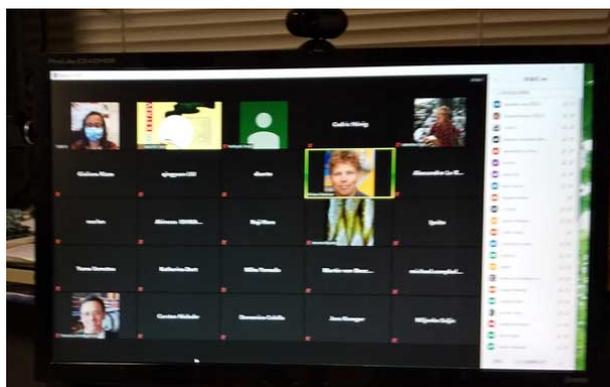


図 9 第 29 回「VERTEX2020」研究会 (2020 年 10 月 5-8 日)

Vertex 研究会 (International Workshop on Vertex Detectors) は物理、工学分野における、主にシリコン半導体検出器の開発、建設、運用についての情報交換を目的とした主要な国際的研究会である。1992 年以来毎年開催されてきたこの研究会は、COVID-19 により今回はインターネットによるリモート会議となった。LHC での 4 つの研究グループ、KEK-Belle グループからの現行検出器および増強についての報告に加え、モノリシック型検出器、時間測定検出器の 2 つのセッションを加えて 4 日間にわたり開催された。最終日には ICFA の先端検出器開発パネルチェアの Ian Shipsey 教授からのトークもあった。この研究会は光量子開発部門の原准教授が VERTEX2020 組織委員会委員長を務め宇宙史研究センターが共催した。

6.2 第 5 回「3 次元積層半導体量子イメージセンサ」研究会

日時 2021 年 2 月 24 日 (水) 13:30-17:15

場所 オンライン

参加者 95 名

本研究会は、TIA かけはしテーマ「究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して」の調査研究の一環と



図 10 第 5 回「3次元積層半導体量子イメージセンサ」研究会（2021年2月24日）

して、イメージャーとしての 3D 技術の発展につながることを期待して実施された。今回は非常事態宣言下でもあり、リモートでの開催となった。

6.3 極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」

日時 2021年3月15日(月) 9:30-15:45

場所 オンライン

参加者 20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オンラインで開催した。南極 30cm サブミリ望遠鏡計画の進捗報告やサイエンスについて議論された。

本研究会は、国立極地研究所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 TChOU ワークショップ

日時 2021年3月23日(火) 14:00-15:30 素粒子構造研究部門 (I)

2021年3月25日(木) 13:00-17:00 南極天文学研究部門
2021年3月29日(月) 10:00-12:30 光量子計測開発部門
2021年3月30日(火) 9:30-17:00 クォーク・核物質研究部門
2021年3月30日(火) 13:30-16:40 素粒子構造研究部門(II)

場所 オンライン

例年、宇宙史研究センター運営協議会に合わせて部門ごとワークショップを開催している。今年度は新型コロナウイルスのため、全てオンラインでの開催となった。

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究者レベルで円滑にし、宇宙史プロジェクト内の素粒子・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」を定期的で開催してきた。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が、残念ながら今年度は新型コロナウイルスの影響で、開催数が少なくなってしまった。

第1回

日時 2021年2月25日(木) 16:00-17:30

場所 オンライン

講演 杉浦哲郎氏 (Yahoo Japan, 2018年度博士号取得筑波大学OB)

“ヤフーにおけるサイエンス”

概要：御本人による自己紹介や、ヤフーにおけるAIなどを多用したサイエンスの取り組みを発表して頂いた。

参加者 16名



図11 第1回 宇宙史セミナー (2021年2月25日)

7 一般向け広報活動

TCHoU では、学生・一般向けの広報活動も積極的に推進しているが、残念ながら 2020 年度は新型コロナウイルスのため多くのイベントが中止となった。

7.1 令和 3 年度 科学技術週間

日時 2020 年 4 月 中止

場所 筑波大学 1E 棟

8 2020 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 2020 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 200 万円が配分された。研究センター中間評価の結果を踏まえて、センター再編 200 万円と重点及び戦略的経費 100 万円が追加配分された。この他に、2019 年度からの繰越し金が収入となる。

支出は、主に研究員雇用、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 を参照。機能強化経費の収入と支出の差額は 2021 年度への繰越金とした。

表4 2020年度予算執行報告

収入		支出		小計/残
項目	金額	項目	金額	
運営費交付金 (プロジェクト)	24,800,000	研究員5名(宇観2, 宇理1, 核2) 【人件費】	18,481,312	25,637,328
繰越金	13,375,535	クロスアポイントメント教員6名 【人件費】	6,745,916	
		クロスアポイントメント教員6名 【旅費】	410,100	644,600
		部門活動費 南極天文学	499,400	
		部門活動費 素粒子構造 戦略イニシアティブへ		
		部門活動費 クォーク・核物質	145,200	
		部門活動費 光量子 戦略イニシアティブへ		118,504
		消耗品・短期雇用・その他	118,504	
合計	38,175,535	合計	26,400,432	11,775,103

収入		支出		小計/残
項目	金額	項目	金額	
配分	10,000,000	教員/研究員 人件費		3,951,493
		特命教授 週2時間×3名	1,421,932	
		事務補佐員	2,529,561	
繰越	2,861,218	消耗品費	323,751	741,761
		クロスアポイントメント教員 研究費	55,260	
		運営協議会(旅費, 謝金)	30,000	
		報告書(印刷費, 郵送費)	332,750	
合計	12,861,218		4,693,254	8,167,964

収入		支出		小計/残
項目	金額	項目	金額	
R3:拠点形成	4,000,000	国際会議開催(VERTEX 2020)		250,760
		ポスター製作	23,720	
		会議論文オンライン版出版費用	227,040	
イノベーション 創出・社会貢 献(追加配分)	1,000,000	部門活動費		2,964,148
		素粒子構造	2,411,750	
		光量子	552,398	
繰越	1,375,984	賃金・謝金		452,129
		その他		
		テレビ会議システム, スピーカ	360,426	
		人文棟スペースチャージ	81,600	
		会議費 TCHoU WS	0	
		電話・電報料	10,103	
合計	6,375,984		3,667,037	

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)

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

中井 直正 (関西学院大学理学部 教授)

瀬田 益道 (関西学院大学理学部 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

渡邊 祥正 (芝浦工業大学 准教授) 客員准教授

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。それに向けて、テラヘルツ望遠鏡に搭載する予定の超広視野超伝導電波カメラへ向けた実機 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 カメラの開発や、南極用に開発された 30cm 望遠鏡を南極内陸部に設置し、銀河系における星間ガスの進化の研究を行う計画を進めている。

(1) 近傍銀河・銀河系の研究

W51 における大質量星形成

野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡を用いて、大質量星形成領域 W51 の多輝線観測を行い、その内部構造と物理状態を詳細に調べた結果、W51 の内部には 4 つの異なる速度をもつ分子雲が存在し、それらが接触している場所に HII 領域が見られ、かつ $^{13}\text{CO} (J=3-2)/(J=1-0)$ が上昇していることからこれらの分子雲が HII 領域に付随していることが確認された。これらの結果から、W51 では内部の異なる速度を持つ分子雲の衝突により高密度ガスが形成され、それによって活発な大質量星形成が引き起こされていることが示唆された。これは、巨大分子雲における大質量星形成メカニズムに迫る成果である。(図 12)

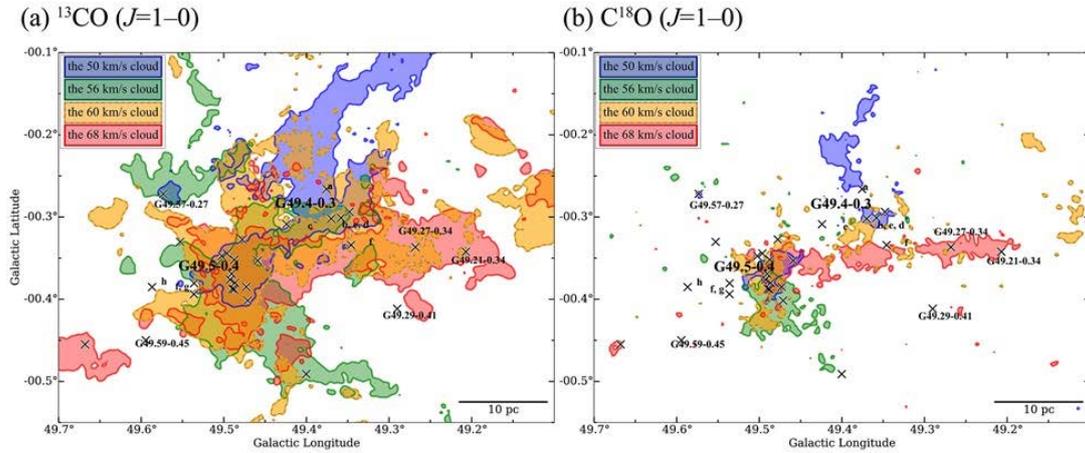


図 12 W51 内の 4 つの異なる速度をもつ分子雲。(a) $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 、(b) $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 。×は HII 領域。速度の異なる分子雲が衝突している場所に HII 領域が見られる。(論文 7)

銀河における分子ガスの物理状態と星形成効率の関係

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で得られた $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ と $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ のデータから求めた輝線強度比 $(I(^{12}\text{CO})/I(^{13}\text{CO})) = R_{1213}$ を用いて、近傍銀河の分子ガスの物理状態と星形成活動性の関係を調べた。その結果、 R_{1213} と星形成率を星質量で割った sSFR の間に相関がみられた。また、ダスト温度と速度幅も sSFR と相関があることがわかり、これらの結果から分子ガスの物理状態の一つの指標となる R_{1213} は、温度や乱流といった分子ガスの性質で決まっていることが示唆された。これは、分子ガスの物理状態が何によって決まるかという問いに対するヒントを与える結果である。(図 13)

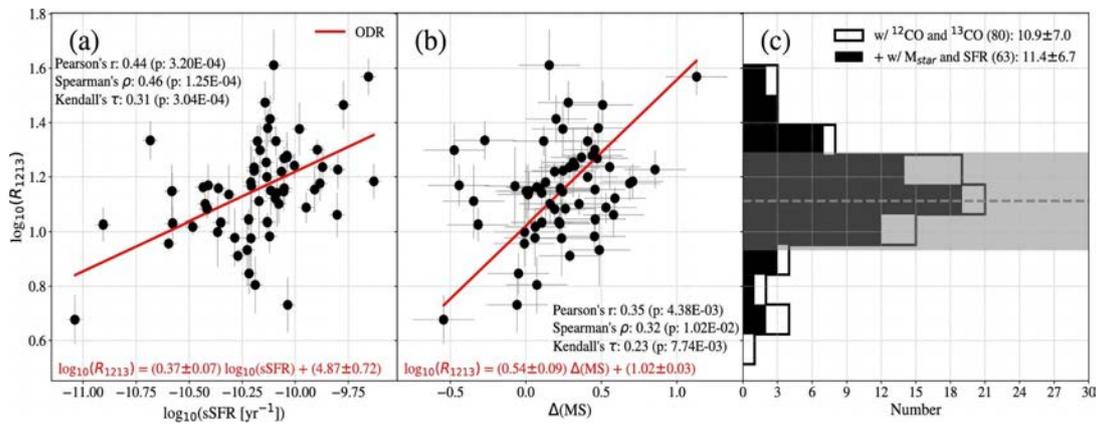


図 13 (a) sSFR と R_{1213} の関係 (b) 銀河の主系列からのずれ ($\Delta(\text{MS})$) と R_{1213} の関係 (c) R_{1213} の分布 (論文 18)

(2) ALMA、すばる、VLT などの望遠鏡を用いた遠方銀河および近傍矮小銀河の性質

本年度は、大別して三つのテーマを遂行した。具体的には、(I) ALMA を用いた、超遠方銀河の遠赤外線観測のおよび理論的な研究 [論文 1, 2, 8, 9, 10], (II) 機械学習とすばる望遠鏡で探る、極矮小銀河の性質 [論文 12], (III) 最高感度の可視光面分光装置 VLT/MUSE による遠方銀河の紫外線の研究 [論

文 6, 13, 14] である。ここでは, (I) に関して詳述する。

超遠方銀河の遠赤外線の観測的および理論的な研究

図 14 は, ALMA を用いて $z = 8.31$ にある銀河から検出した [CII] 158 μm 輝線の様子である。これは, [CII] 輝線としては最遠方の検出記録である。[OIII] 88 μm /[CII] 158 μm 光度比は約 8 で非常に高い。理論研究との比較から示唆されることは, 遠方銀河の星間媒質で (i) 金属量が低い, (ii) O/C 元素組成比が高い, (iii) 電離状態が高い, (iv) 中性ガス分布が多孔質, である。後者二つの仮説は, LyC が脱出しやすい状況であるため, 宇宙再電離現象の観点で興味深い。さらに, 本天体のダスト温度が 80 K 以上と極めて高いことが分かった。超遠方銀河のダスト温度が推定された例は少ないが, 仮に高いダスト温度が普遍的である場合, 過去の研究で得られた赤外光度やダストに隠された星形成率が過小評価されていた可能性がある。

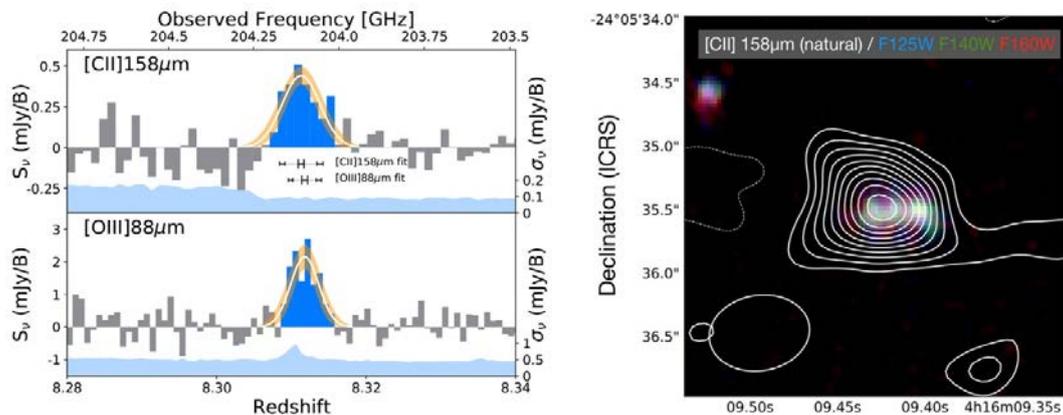


図 14 左パネルは, $z = 8.31$ にある銀河 MACS0416-Y1 の [CII]158 μm および [OIII] 88 μm 輝線スペクトル (論文 1)。右パネルは, 背景の三色合成画像はハッブル宇宙望遠鏡で取得した静止系紫外域の大質量星の分布を表す。白色の等高線が, ALMA で取得した [CII] 輝線の分布である。

関連して, 近傍の metal-poor dwarf 銀河のアーカイブデータを活用し, 遠赤外線と可視光の性質を横断的に調べた [浦瀧太 学士論文]。[OIII]/[CII] 光度比が高い天体は, (a) 電離状態が高い, (b) 爆発的星形成をしている (c) 金属量が低い, という傾向を初めて観測的に示した。今後 ALMA と JWST の組み合わせで実現する, 超遠方銀河の遠赤外線と可視光データを解釈する際に, 重要な参照元になると期待される [業績: PI 観測提案書]。一般的に, 超遠方銀河のダスト温度推定は困難である。この状況を打開するため, 一点の測光点からダスト温度を推定する計算手法を開発した [論文 9]。ダスト粒子が熱平衡にあると仮定し, ダスト粒子の空間分布を仮定すれば, ダスト放射の空間サイズと強度から温度を決定できるのである。本論文では, 地上実験から得られたダスト粒子の組成, 結晶状態, 温度の放射率に対する依存性も編纂しており, ダスト研究へ役立つと期待される。

(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 帯連続波カメラの開発を行っている。昨年度までに, コプレーナ線路のグラウンド面に膜厚 200 nm の窒化ニオブチタン (NbTiN) を, 中心線路に膜厚 50 nm のアルミニウム (Al) を用いた 109 素子アンテナ結合型ハイブリッド MKID の製作・光学評価を行い検

出器の高感度化に向けた開発を進めてきた。単一読み出し回路を用いて取得した 109 素子アンテナ結合型ハイブリッド MKID の雑音等価電力 (NEP) の解析を進め、放射負荷電力が約 8 ~ 16 pW の際に $NEP = 3 - 5 \times 10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$ と良好な結果を得た。

フランスの MKID カメラグループとの共同研究により、100 GHz 帯集中定数型 MKID アレイの評価も進めた。MKID アレイはフランスのグループが製作したものであり、素子数は 144 素子、超伝導薄膜には Ti と Al の 2 層構造を用いている。フーリエ分光器を用いた周波数特性の測定により、帯域は期待通りの 70 - 115 GHz であることを確認した (図 15)。一方、検出器の空間感度分布であるビームパターンの測定ではサイドローブが想定よりも大きいことが明らかになり、冷却光学系との結合に課題があることが分かった。

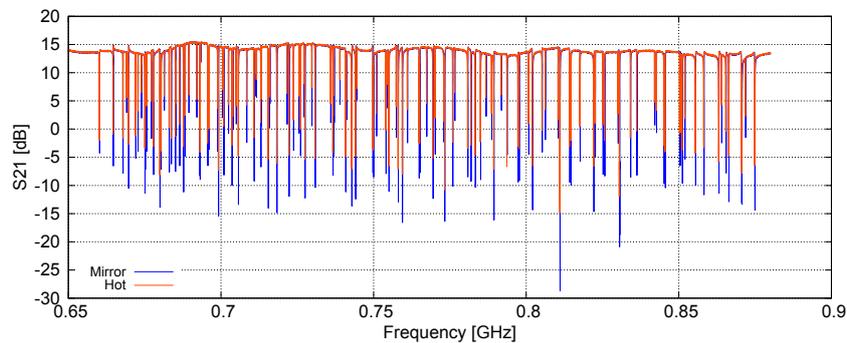


図 15 144 素子集中定数型 MKID アレイの透過スペクトル

(4) 南極天文学の推進

南極 10m テラヘルツ望遠鏡の実現のためには、望遠鏡の鏡面を精度よく測定する必要があるが、南極は厳しい環境下でありそこで実施可能な方法が必要となる。南極で実施可能な鏡面測定法として点格子干渉計とファイズ・リトリバル・ホログラフィー法の研究を進めた。点格子干渉計に関しては、奥村大志氏の博士論文に、ファイズ・リトリバル・ホログラフィー法に関しては周斌氏の博士論文としてまとめられた。

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、 $[CI](^3P_1-^3P_0)$ と $CO(J = 4 - 3)$ 輝線による銀河面サーベイを計画している。新型コロナウイルスの影響で当初想定していたイタリア・フランスの運用するコンコルディア基地での運用が困難になったため、国立極地研究所の新ドームふじ基地での運用を目指している。 $[CI](^3P_1-^3P_0)$ と $CO(J = 4 - 3)$ 輝線の同時観測を実現するため、国立天文台との共同研究で ALMA バンド 8 用に開発された広帯域ミキサー素子を搭載した受信機の開発を進めている。

〈査読付き論文〉

1. Bakx, T. L. C., Tamura, Y., Hashimoto, T., Inoue, A. K., Lee, M. M., et al., "ALMA uncovers the [CII] emission and warm dust continuum in a $z = 8.31$ Lyman break galaxy", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 493, Issue 3, pp. 4294-4307 (2020)
2. Binggeli, C., Inoue, A. K., Hashimoto, T., Toribio, M. C., Zackrisson, E., et al., "A puzzling non-detection of [OIII] and [CII] from a $z \sim 7.7$ galaxy observed with ALMA", Astronomy & Astrophysics, Volume 646, id. A26, 13 pp. (2021)
3. Cooray, S., Takeuchi, T. T., Yoda, M., Sorai, K., "A Method for Unmasking Incomplete Astronomical Signals:

- Application to CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies Project” , Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.72 No.4, pp.61:1-15 (2020)
4. Doi, Y., Hasegawa, T., Furuya, R. S., Coude, S., , , Saito, H., , , Robitaille, J. F. (total 138) “The JCMT BISTRO Survey: Magnetic Fields Associated with a Network of Filaments in NGC 1333” ApJ, Vol. 899, pp28-50 (2020)
 5. Eden, D. J., Moore, T. J. T., Currie, M. J. and 103 more (Kuno, N. 78 番目), “CHIMPS2: survey description and ^{12}CO emission in the Galactic Centre” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 498, Issue 4, pp.5936-5951 (2020)
 6. Feltre, A., Maseda, M. V., Bacon, R., Pradeep, J., Leclercq, F., et al. (Hashimoto, T. 8 番目), “The Muse Hubble Ultra Deep Field Survey. XV. The mean rest-UV spectra of $\text{Ly}\alpha$ emitters at $z > 3$ ” , Astronomy & Astrophysics, Volume 641, id. A118, 26 pp. (2020)
 7. Fujita, S., Torii, K., Kuno, N., Nishimura, A., Umemoto, T., Minamidani, T., Kohno, M., Yamagishi, M., Tosaki, T., Matsuo, M., Tsuda, Y., Enokiya, R., Tachihara, K., Ohama, A., Sano, H., Okawa, K., Hayashi, K., Yoshiike, S., Tsutsumi, D., Fukui, Y., “Massive star formation in W51 A triggered by cloud-cloud collisions” , Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 73, Issue Supplement.1, pp.S172-S200, (2021)
 8. Harikane, Y., Ouchi, M., Inoue, A. K., Matsuoka, Y., Tamura, Y., et al. (Hashimoto, T. 17 番目), “Large Population of ALMA Galaxies at $z > 6$ with Very High [OIII] $88\ \mu\text{m}$ to [CII] $158\ \mu\text{m}$ Flux Ratios: Evidence of Extremely High Ionization Parameter or PDR Deficit?” , The Astrophysical Journal, Volume 896, Issue 2, id. 93, 19 pp. (2020)
 9. Inoue, A. K., Hashimoto, T., Chihara, H., and Koike, C., “Radiative equilibrium estimates of dust temperature and mass in high-redshift galaxies” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 495, Issue 2, pp. 1577-1592. (2020)
 10. Izumi, T., Onoue, M., Matsuoka, Y., Strauss, M. A., Fujimoto, S., et al. (Hashimoto, T. 24 番目), “Subaru High- z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). XII. Extended [CII] Structure (Merger or Outflow) in a $z = 6.72$ Red Quasar” , The Astrophysical Journal, Volume 908, Issue 2, id. 235, 10 pp. (2021)
 11. Kohno, M., Tachihara, K., Torii, K., Fujita, S., Nishimura, A., Kuno, N., Umemoto, T., Minamidani, T., Matsuo, M., Kiridoshi, R., Tokuda, K., Hanaoka, M., Tsuda, Y., Kuriki, M., Ohama, A., Sano, H., Hasegawa, T., Sofue, Y., Habe, A., Onishi, T., Fukui, Y., “FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). VI. Dense gas and mini-starbursts in the W 43 giant molecular cloud complex” , Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 73, Issue Supplement.1, pp.S129-S171 (2021)
 12. Kojima, T., Ouchi, M., Rauch, M., Ono, Y., Nakajima, K., et al. (Hashimoto, T. 9 番目), “Extremely Metal-poor Representatives Explored by the Subaru Survey (EMPRESS). I. A Successful Machine-learning Selection of Metal-poor Galaxies and the Discovery of a Galaxy with $M_* < 10^6 M_\odot$ and $0.016 Z_\odot$ ” , The Astrophysical Journal, Volume 898, Issue 2, id. 142. (2020)
 13. Kusakabe, H., Blaizot, J., Garel, T., Verhamme, A., Bacon, R., et al. (Hashimoto, T. 7 番目), “The MUSE Hubble Ultra Deep Field Survey. XIV. Evolution of the $\text{Ly}\alpha$ emitter fraction from $z = 3$ to $z = 6$ ” , Astronomy & Astrophysics, Volume 638, id. A12, 23 pp. (2020)
 14. Maseda, M. V., Bacon, R., Lam, D., Matthee, J., Brinchmann, J., et al. (Hashimoto, T. 13 番目), “Elevated ionizing photon production efficiency in high-equivalent-width Lyman- α emitters” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 493, Issue 4, pp. 5120-5130 (2020)
 15. Maruques-Chaves, R., Alvarez-Marquez, J., Colina, L., Perez-Fournon, I., Schaerer, D., et al. (Hashimoto, T. 7 番目), “The discovery of the most UV- $\text{Ly}\alpha$ luminous star-forming galaxy: a young, dust- and meta-poor starburst with QSO-like luminosities” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 499, Issue 1, pp. L105-110. (2020)
 16. Miyamoto, Y., Yasuda, A., Watanabe, Y., Seta, M., Kuno, N., Salak, D., Ishii, S., Nagai, M., Nakai, N., “Atomic carbon [CI]($^3\text{P}_1$ - $^3\text{P}_0$) mapping of the nearby galaxy M 83” , Publications of the Astronomical Society of Japan, psab020 (2021)
 17. Morishita, T., Stiavelli, M., Trenti, M., Treu, T., Roberts-Borsani, G., et al. (Hashimoto, T. 7 番目), “SuperBoRG: Exploration of Point Sources at $z \sim 8$ in HST Parallel Fields” , The Astrophysical Journal, Volume 904, Issue 1, id. 50, 11 pp. (2020)
 18. Morokuma-Matsui, K., Sorai, K., Sato, Y., Kuno, K., Takeuchi, T. T., Salak, D., Miyamoto, Y., Yajima, Y., Muraoka, K., Kaneko, H., “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). X. Physical conditions of molecular gas and the local SFR-Mass relation” , Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.72 No.5, pp.90:1-16 (2020)
 19. Muraoka, K., Kondo, H., Tokuda, K., Nishimura, A., Miura, R. E., Onodera, S., Kuno, N., Zahorecz, S., Tsuge, K., Sano, H., Fujita, S., Onishi, T., Saigo, K., Tachihara, K., Fukui, Y., Kawamura, A., “ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M 33. II. Triggered High-mass Star Formation by Multiple Gas Colliding Events at the NGC 604 Complex” , The Astrophysical Journal, Volume 903, Issue 2, id.94, 11 pp. (2020)
 20. Nara, S., Sato, T. O., Yamada, T., Fujinawa, T., Kuribayashi, K., Manabe, T., Froidevaux, L., Livesey, N. J.,

- Walker, K. A., Xu, J., Schreier, F., Orsolini, Y. J., Limpasuvan, V., Kuno, N., and Kasai, Y.: “Validation of SMILES HCl profiles over a wide range from the stratosphere to the lower thermosphere”, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, pp.6837–6852 (2020)
21. Nishimura, A., Fujita, S., Kohno, M., Tsutsumi, D., Minamidani, T., Torii, K., Umemoto, T., Matsuo, M., Tsuda, Y., Kuriki, M., Kuno, N., Sano, H., Yamamoto, H., Tachihara, K., Fukui, Y., “FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). VIII. Possible evidence of cloud-cloud collisions triggering high-mass star formation in the giant molecular cloud M 16 (Eagle Nebula)”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 73, Issue Supplement_1, pp.S285-S299 (2021)
 22. Salak, D., Nakai, N., Sorai, K., Miyamoto, Y., “Molecular Gas Outflow in the Starburst Galaxy NGC 1482”, *The Astrophysical Journal*, Vol.901 No.2, pp.151:1-16 (2020)
 23. Sato, K., Hasegawa, T., Umemoto, T., Saito, H., Kuno, N., Seta, M., Sakamoto, S. “FUGIN hot core survey. I. Survey method and initial results for $l = 10 - 20$ ”, *PASJ* (2021),
 24. Tokuda, K., Muraoka, K., Kondo, H., Nishimura, A., Tosaki, T., Zahorecz, S., Onodera, S., Miura, R. E., Torii, K., Kuno, N., Fujita, S., Sano, H., Onishi, T., Saigo, K., Fukui, Y., Kawamura, A., Tachihara, K. “ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M 33. I. Resolving Star Formation Activities in the Giant Molecular Filaments Possibly Formed by a Spiral Shock”, *The Astrophysical Journal*, Volume 896, Issue 1, id.36, 10 pp. (2020)
 25. Torii, K., Hattori, Y., Matsuo, M., Fujita, S., Nishimura, A., Kohno, M., Kuriki, M., Tsuda, Y., Minamidani, T., Umemoto, T., Kuno, N., Yoshiike, S., Ohama, A., Tachihara, K., Fukui, Y., Shima, K., Habe, A., Haworth, T. J., “CO observations of the molecular gas in the Galactic H II region Sh2-48: Evidence for cloud-cloud collision as a trigger of high-mass star formation”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 73, Issue Supplement_1, pp.S368-S384, (2021)
 26. Yajima, Y., Sorai, K., Miyamoto, Y., Muraoka, K., Kuno, N., Kaneko, H., Takeuchi, T. T., Yasuda, A., Tanaka, T., Morokuma-Matsui, K., Kobayashi, I. N. M., “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). IX. $^{12}\text{CO}(J = 2 - 1)/^{12}\text{CO}(J = 1 - 0)$ line ratio on kiloparsec scales”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 73 No.2, pp.257–285 (2021)
 27. Yamanaka, S., Inoue, A. K., Yamada, T., Zackrisson, E., Iwata, I., et al. (Hashimoto, T. 8 番目), “Testing an indirect method for identifying galaxies with high levels of Lyman continuum leakage”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 498, Issue 3, pp. 3095-3114. (2020)
 28. Yen, Hsi-Wei, Koch, P. M., Hull, C. L., Ward-Thompson, D., , , Saito, H., , , Zhang, C.-P. (total 46) “The JCMT BISTRO Survey: Magnetic Fields Associated with a Network of Filaments in NGC 1333” *ApJ*, Vol. 899, pp28-50 (2020)

〈その他論文〉

1. Nitta, T., Nagai, M., Murayama, Y., Hikawa, R., Suzuki, R., Sekimoto, Y., Takakura, H., Hasebe, T., Noda, K., Saeki, S., Matsuo, H., Kuno, N., Nakai, N., “Anti-reflection structures for large-aperture cryogenic lenses and vacuum window in 100-GHz band”, *Proceedings of SPIE*, 11453, 114534C (2020)
2. Tamura, Y., Kawabe, R., Fukasaku, Y., Kimura, K., Ueda, T., Taniguchi, A., Okada, N., Ogawa, H., Hashimoto, I., Minamidani, T., Kawaguchi, N., Kuno, N., Togami, Y., Hagimoto, M., Nakano, S., Matsuda, K., Okumura, S., Nakamura, T., Kurita, M., Takekoshi, T., Oshima, T., Onishi, T., Kohno, K., “Wavefront sensor for millimeter/submillimeter-wave adaptive optics based on aperture-plane interferometry”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11445, id. 114451N 9 pp. (2020)

〈学位論文〉

[博士論文]

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 奥村大志：Analytical and Numerical Study of a Radio Point-Diffraction Interferometer as a Novel Reflector Surface Measurement Method for the Antarctic Terahertz Telescope
2. 田中隆広：Effect of the bar pattern speed on the molecular gas dynamics in galaxy NGC 7479
3. 周 斌：The study of the phase retrieval holography measurement for the Ritchey–Chrétien telescope
4. Pranshu MANDAL：Development of data analysis method and image synthesis pipeline for 100GHz band Nobeyama 45m MKID Camera

[修士論文]

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 佐藤景亮：棒渦巻銀河の中心領域におけるガスのダイナミクスと星形成との関係
2. 柴田和樹：棒渦巻銀河 NGC 3627 における分子ガスの物理状態と星形成効率多様性の関係
3. 鈴木理花子：常温および低温黒体を用いた 100 GHz 帯カメラ用力学インダクタンス検出器アレイの光学性能評価

4. 鴫田翔哉：相互作用銀河 NGC 4567/4568 の衝突領域における分子ガスの物理状態の観測的研究
5. 奈良誠大：超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) の広範囲観測による塩化水素の鉛直分布プロファイルの妥当性検証
6. 保坂智哉：スターバースト銀河 NGC 1808 を観測対象とした系外銀河の分子ガス質量導出方法に関する研究

[学士論文]

1. 青木美和：力学インダクタンス検出器アレイの多素子同時読み出しにおける雑音低減に関する研究
2. 梅澤智幸：Perseus Arm における巨大分子雲の物理状態と星形成活動の比較
3. 浦 遼太：近傍宇宙にある矮小銀河の多波長の性質と遠方銀河への示唆
4. 藤森柗人：美笹 54m アンテナの 20GHz 帯における両偏波観測用受信機の開発
5. 山本祥汰郎：近傍銀河 NGC253、NGC1482 におけるアウトフロー中の星間ダストの観測的研究

<研究成果発表>

[国際会議]

1. Harikane, Y., incl. Hashimoto, T., et al. “Large Population of ALMA Galaxies at $z > 6$ with Very High [OIII] 88 μm to [CII] 158 μm Flux Ratios”, SAZERAC online conference, July, 2020
2. (Accepted, Postponed) S. Nara, T.O. Sato, T. Yamada, Lucien Froidevaux, Nathaniel J. Livesey, Kaley A. Walker, Franz Schreier, Jian Xu, N. Kuno, Y. Kasai., “Validation of HCl profile observed by SMILES from international space station.”, International Radiation Symposium 2020, Abstract ID:409, Greece, Jul, 2020
3. (Accepted, Canceled) S. Nara, T.O. Sato, T. Yamada, T. Fujinawa, Lucien Froidevaux, Nathaniel J. Livesey, Kaley A. Walker, Franz Schreier, Jian Xu, N. Kuno, Y. Kasai. “Validation Analysis of Hydrogen Chloride Profiles by Observation of SMILES Between Stratosphere and Lower Thermosphere”, Asia Oceania Geoscience Society 17th Annual Meeting, ID:PS10-A021, Korea, Jun-Jul, 2020 (ポスター)
4. Hashimoto, T., “A review on recent progress in metals and dust studies at high- z ”, The Rise of Metals and Dust, Marseille, France (held in online) October 26-30, 2020, (招待講演)
5. Sugahara, Y., incl. Hashimoto, T., et al. “Another tail of Big Three Dragons: A [NII] 122 μm constraint and a new dust-continuum detection of a $z = 7.15$ Lyman Break Galaxy with ALMA”, The Rise of Metals and Dust, Marseille, France (held in online) October 26-30, 2020
6. Harikane, Y., incl. Hashimoto, T., et al. “Large Population of ALMA Galaxies at $z > 6$ with Very High [OIII] 88 μm to [CII] 158 μm Flux Ratios”, The Rise of Metals and Dust, Marseille, France (held in online) October 26-30, 2020
7. Ayako Niwa, Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Mitsuhiro Fukushima, Norio Okada, Jun-Ichi Morino, Risa Kurosawa, and Junichiro Moriya, “Development of Compact 0.8 K Sorption Coolers for THz Photon Counting Detectors”, 21st East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop, Online, November 24-25, 2020
8. Nitta, T., Nagai, M., Murayama, Y., Hikawa, R., Suzuki, R., Sekimoto, Y., Takakura, H., Hasebe, T., Noda, K., Saeki, S., Matsuo, H., Kuno, N., Nakai, N., “Anti-reflection structures for large-aperture cryogenic lenses and vacuum window in 100-GHz band”, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2020, Online Forum, December 14-18, 2020 (ポスター)

[国内学会・研究会]

1. 徂徠和夫, 他 COMING メンバー “COMING: Results and a Next Step”, FUGIN & COMING リモート研究会, 2020 年 7 月 7 日, 大阪府立大学 (オンライン開催) (招待講演)
2. Sugahara, Y., Inoue, A. K., Yamanaka, S., Hashimoto, T., Fujimoto, S., Tamura, Y., Matsuo, H., Binggeli, C., and Zackrisson, E. “A constraint of [NII] 122 μm and a new dust continuum detection of a $z = 7.15$ Lyman Break Galaxy with ALMA”, 日本天文学会 2020 年秋季年会, X23a, 2020 年 9 月 9 日, 弘前大学 (オンライン開催)
3. 田村陽一, 萩本将都, 谷口暁星, 山本宏昭, 川邊良平, 鎌田 剛, 小嶋崇文, 酒井 剛, 原田健一, 谷口達, 小関研介, 田中邦彦, 廿日出文洋, 竹腰達哉, 河野孝太郎, 吉村勇紀, 井上昭雄, 橋本拓也, 他 FINER チーム 「北半球最高感度ミリ波サブミリ波ヘテロダイナ受信システム LMT-FINER I. デジタルサイドバンド分離広帯域分光計ファームウェアの開発」, 日本天文学会 2020 年秋季年会, X23a, 2020 年 9 月 9 日, 弘前大学 (オンライン開催)
4. 佐藤景亮, 宮本祐介, 久野成夫, Dragan SALAK, Alex Wagner, 瀬田益道, 中井直正, 「棒渦巻銀河 NGC 613 の中心領域におけるガスダイナミクスと星形成の関係」, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020 年 9 月 10 日, 弘前大学 (オンライン開催)
5. 矢島義之, 徂徠和夫, 「 $^{12}\text{CO}(J=1-0)/^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線強度比による近傍の棒渦巻銀河 Maffei2 の分子ガスの物理状態」, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020 年 9 月 10 日, 弘前大学 (オンライン開催)
6. 村岡和幸, 近藤滉, 西村 淳, 藤田真司, 川下紗奈, 小西亜侑, 中尾優花, 西本晋平, 米山 翔, 大西利和, 徳田一起, 濤崎智佳, 三浦理絵, 西合一矢, 佐野栄俊, 河村晶子, 小野寺幸子, 久野成夫, 立原研悟, 柘植紀節, 福井康雄, 「Atacama Compact Array による渦巻銀河 M33 の ^{12}CO , ^{13}CO $J=2-1$ 広域観測」, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020 年 9 月 10 日 (オンライン開催)
7. 近藤 滉, 村岡和幸, 西村 淳, 藤田真司, 大西利和, 徳田一起, Sarolta Zahorecz, 濤崎智佳, 佐野栄俊, 三浦理絵, 西合一矢, 河村晶子, 小野寺幸子, 久野成夫, 柘植紀節, 立原研悟, 福井康雄, 小林将人, 「ALMA による渦巻銀河 M33 の巨大分子雲の高分解能観

- 測 (5) : $10^6 M_{\odot}$ に及ぶ巨大分子雲の性質とその進化」, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020 年 9 月 10 日 (オンライン開催)
8. 新田冬夢, 他, 「野辺山 45m 電波望遠鏡用 100-GHz 帯 109 素子連続波カメラの開発」, Nobeyama Science Workshop 2020, 2020 年 9 月 15-16 日 (オンライン開催)
 9. 鴫田翔哉, 金子紘之, 久野成夫, 「相互作用銀河 NGC4567/4568 の衝突領域における分子ガスの物理状態」, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020 年 9 月 10 日 (オンライン開催)
 10. 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤 元, 福嶋美津広, 岡田則夫, 森野潤一, 黒澤里沙, 守屋潤一郎, 「テラヘルツ光子計数型検出器のための 0.8 K 小型吸着式冷凍器の評価」, 第 29 回日本赤外線学会研究発表会, 2020 年 10 月 29-30 日 (オンライン開催)
 11. 奈良誠大, 佐藤知紘, 山田崇貴, 久野成夫, 笠井康子, 「超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) の広範囲観測による塩化水素の鉛直分布プロファイルの妥当性検証」, 第 25 回大気化学討論会, ID: S1-06, 2020 年 11 月, 千葉大学 (オンライン開催)
 12. 柴田和樹, 渡邊祥正, 久野成夫, 徂徠和夫, 「近傍銀河 NGC 3627 における星形成効率の多様性とその起源の探究」, 天体形成研究会, 2020 年 11 月 6-7 日, 筑波大学 (オンライン開催)
 13. 徂徠和夫, 「銀河における星間ガス質量の高精度な導出」, 令和 2 年度 第 2 回宇宙史研究センター構成委員会, 2020 年 11 月 30 日, 筑波大学 (オンライン開催)
 14. 丹羽綾子, 松尾 宏, 江澤 元, 福嶋美津広, 岡田則夫, 森野潤一, 黒澤里沙, 守屋潤一郎, 「テラヘルツ光子計数型検出器のための 0.8 K 小型吸着式冷凍器の開発」, 第 9 回可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2020, 2020 年 12 月 1-2 日 (オンライン開催)
 15. 久野成夫, 「南極テラヘルツ望遠鏡」, 宇宙電波懇談会シンポジウム 2020 年度: 「極限性能で切り開く電波天文学」, 2020 年 12 月 21 日-22 日 (オンライン開催)
 16. Nitta, T. et al., 「Optical measurements of MKID arrays for the Nobeyama 100-GHz band camera」, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2020, 2021 年 1 月 5-7 日 (オンライン開催)
 17. Salak, D., Nakai, N., Sorai, K., Miyamoto, Y., 「Molecular gas outflow in the starburst galaxy NGC 1482」, ALMA/45 m/ASTE Users Meeting FY2020, 2021 年 1 月 5 日-7 日, (オンライン開催)
 18. Shibata, K., Watanabe, Y., Kuno, N., Sorai, K., 「Study of SFE diversity in nearby galaxy NGC 3627」, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2020, 2021 年 1 月 5 日-7 日 (オンライン開催)
 19. 久野成夫, 「計画概要」極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」, 2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)
 20. 久野成夫, 「南極でのポインティング方法」極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」, 2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)
 21. 久野成夫, 「OTF 対応: アンテナ制御・リダクションソフト・Qlook」極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」, 2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)
 22. 徂徠和夫, 「南極 30 cm 望遠鏡搭載分光計の更新」, 極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」, 2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)
 23. 徂徠和夫, 「南極 30 cm 望遠鏡による [CI] & CO 観測」, 極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」, 2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)
 24. 奈良誠大, 「30 cm 望遠鏡でのサイエンス〜地球大気〜」, 極地研研究集会「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」, 2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)
 25. 八嶋裕, 徂徠和夫, 清水一揮, 久野成夫, 永井誠, 瀬田益道, 他南極天文コンソーシアムメンバー, 「南極 30 cm サブミリ波望遠鏡のデジタル分光計の整備」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16-19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 26. 丹羽綾子, 松尾 宏, 江澤 元, 福嶋美津広, 岡田則夫, 森野潤一, 黒澤里沙, 守屋潤一郎, 「テラヘルツ強度干渉計用光子計数型検出器のための 0.8 K 小型吸着式冷凍器の開発」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16-19 日 (オンライン開催)
 27. Salak, D., Nakai, N., Sorai, K., Miyamoto, Y., 「ALMA discovers a starburst-driven molecular outflow in NGC 1482」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 17 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 28. 柴田和樹, 渡邊祥正, 久野成夫, 徂徠和夫, 「NGC 3627 において同定された GMC の物理状態と SFE 多様性の関係」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 17 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 29. 保坂智哉, Dragan SALAK, 久野成夫, 保田敦司, 宮本祐介, スターバースト銀河 NGC1808 の [CI] 観測: ガストレーサーとしての有用性の検証」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 17 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 30. 田村陽一, 谷口暁星, 戸上陽平, 萩本将都, 中野寛矢, 松田慧一, 川邊良平, 川口則幸, 南谷哲宏, 大島泰, 深作悠平, 久野成夫, 木村公洋, 岡田望, 中村友子, 奥村幸子, 小川英夫, 大西利和, 栗田光樹夫, 竹腰達哉, 河野孝太郎, 「ミリ波補償光学の開発 V. 野辺山 45 m ミリ波望遠鏡における開口面干渉法波面センサの実証実験」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 18 日 (オンライン開催)
 31. 久野成夫, 新田冬夢, 橋本拓也, 齋藤弘雄, Dragan SALAK, 瀧口風太, 小山 徹, 加藤良寛, 瀬田益道, 中井直正, 徂徠和夫, 八嶋 裕, 清水一揮, 永井 誠, 梅本智文, 小嶋崇文, 鴫澤佳徳, 伊王野大介, 長崎岳人, 他南極天文コンソーシアムメンバー, 「南極 30 cm サブミリ波望遠鏡計画」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 32. 橋本拓也, 井上昭雄, 田村陽一, 松尾 宏, 伊王野大介, 久野成夫 「ngVLA による遠方銀河の遠赤外線微細構造輝線の観測可能性」, 日本天文学会 2021 年春季年会, Z220a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 33. 松尾 宏, 江澤 元, 鎌崎 剛, 新田冬夢, 橋本拓也, 丹羽綾子, 久野成夫, 瀬田益道, 中井直正 「南極テラヘルツ干渉計による原子輝線の観測計画」, 日本天文学会 2021 年春季年会, V108a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 34. 中野寛矢, 田村陽一, 谷口暁星, 萩本将都, 竹内努, T. Bakx, 井上昭雄, 橋本拓也, 松尾 宏, 梅畑豪紀, B. Salmon, D. Coe, L. Bradley, P. Oesch, V. Strait, M. Bradac, ALMA/SPT0615 観測チーム, 「大質量銀河団 SPT-CL J0615-5746 に属する

- CO 分子輝線銀河が示す環境効果による星形成活動の抑制」, 日本天文学会 2021 年春季年会, X17a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
35. 播金優一, 井上昭雄, 札本佳伸, 橋本拓也, 松尾 宏, 田村陽一, 山中郷史, 「銀河形成の「ロゼッタストーン」: H バンドドロップ $z \sim 13$ 銀河探査」, 日本天文学会 2021 年春季年会, X23a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 36. 菅原悠馬, 井上昭雄, 橋本拓也, 山中郷史, 「ALMA 微細構造線と電離平衡モデルを用いた $z > 6$ BPT 図の推定」, 日本天文学会 2021 年春季年会, X24a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 37. 徳岡剛史, 井上昭雄, 橋本拓也, 山中郷史, 菅原悠馬, 札本佳伸, 田村陽一, 松尾 宏, 吉田直紀, 「重力レンズ効果を考慮した回転円盤モデルフィッティングコードの開発」, 日本天文学会 2021 年春季年会, X25a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 38. Tom Bakx, Y. Tamura, E. Zackrisson, I. Shimizu, T. Hashimoto, H. Umehata, A. Inoue, H. Matsuo, T. Okamoto, N. Yoshida, Y. Taniguchi, B. Hatsukade, Y. Matsuda, K. Mawatari, T. Shibuya, K. Kohno, K. Ota, M. Lee, “Dust at high redshift; an observational perspective” , 日本天文学会 2021 年春季年会, X26a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 39. 五島雛子, 嶋作一大 (東京大学), 山中郷史 (早稲田大学), 他 HSC Project 85 (橋本拓也 含), 「すばる望遠鏡/HSC による $z = 7.3$ Ly α 光度関数と宇宙再電離への制限」, 日本天文学会, 2021 年春季年会, X29a, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 40. 小山 徹, 齋藤弘雄, 加藤良寛, 久野成夫, Dragan SALAK, 瀬田益道, 永井 誠, 他南極天文コンソーシアムメンバー, 「南極 30cm サブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシステムの開発」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 19 日, 東京工業大学 (オンライン開催)
 41. 俣和夫, 「THz 帯での近傍銀河観測」, 南極 THz 望遠鏡合同ワークショップ, 2021 年 3 月 25 日, 筑波大学 (オンライン開催)
 42. 齋藤弘雄, 「星惑星系形成」南極 THz 望遠鏡合同ワークショップ, 2021 年 3 月 25 日, 筑波大学 (オンライン開催)

〈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」2021 年 3 月 15 日 (オンライン開催)

〈外部委員〉

1. 久野成夫 日本天文学会年会開催地理事、2019 年 6 月 - 2021 年 5 月下旬
2. 久野成夫: 日本天文学会研究奨励賞選考委員会委員、2017 年 6 月 - 2021 年 5 月下旬
3. 橋本拓也: 遠赤外線宇宙望遠鏡 SPICA 日本国内科学検討チーム (ミッション中止のため今年度で終了)
4. 橋本拓也: 次世代大型電波干渉計 ngVLA 日本国内科学検討チーム

〈外部資金〉

1. 国立極地研究所、国立極地研究所研究集会: 久野成夫 (研究代表者) 「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」(交付金 18,3 万円)
2. 国立天文台共同開発研究「南極 30m 望遠鏡用 500GHz 帯広帯域 2SB 受信機の開発」(交付金 260 万円)
3. 日本学術振興会、卓越研究員事業: 橋本拓也 (研究代表者) 「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」2019~2024 年度 (R 2 交付金 800 万円) (2/5 年)
4. 科学研究費補助金、研究活動スタート支援: 橋本拓也 (研究代表者) 「成層圏赤外線天文台で暴く近傍銀河の電離光子放射メカニズム」(研究課題 20K22358) 2020~2021 年度 (R2 交付金 110 万円) (1/2 年)

〈受賞〉

1. 橋本拓也 2019 年度日本天文学会欧文研究報告 (PASJ) に掲載された論文で最も盛んに議論された論文へ選出、High Impact Articles From PASJ, Hashimoto et al. “Big Three Dragons: A $z = 7.15$ Lyman-break galaxy detected in [OIII] 88 μm , [CII] 158 μm , and dust continuum with ALMA” , 2020 年 7 月
2. 奈良誠大: 第 25 回大気化学討論会、「学生優秀発表賞」(受賞日 2020 年 11 月 13 日)
3. 奈良誠大: 2020 年度筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻、物理学専攻長賞 (受賞日 2021 年 3 月 25 日)

〈記者会見及びプレスリリース、新聞報道等〉

1. 橋本拓也: 小島崇史ら (橋本拓也 含), 「今の宇宙に残された、形成初期の銀河を発見-すばる望遠鏡と機械学習で銀河の酸素量の世界記録を更新-」, 2020 年 8 月 1 日
2. 橋本拓也: 小島崇史ら (橋本拓也 含), 「赤ちゃん銀河を発見, 年齢 1000 万年」, 日本経済新聞 2020 年 8 月 1 日

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)

伊敷 吾郎 (数理物質系物理学域 准教授)

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)

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)

金 信弘 (数理物質系物理学域 特命教授)

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

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)。

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 年ー 2021 年間のアップグレードのためのシャットダウン中であり、2022 年*¹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いる。

*¹ 2021 年の予定であったが、COVID-19 の影響により Run-3 実験の開始は、2022 年に延期された。

(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、ニュートリノ崩壊過程に潜む新物理の探索、宇宙背景ニュートリノの実験的観測を目指したプロジェクトである。またニュートリノ崩壊が観測されれば、ニュートリノ質量の絶対値が決定されることから、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単一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光量子計測器開発部門のプロジェクトとして連携の下、開発を行っている。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。

(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継続されている。

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、2020 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 2 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 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)

吉田教授は、COVID-19 の影響により本学への来訪は出来なかったが、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、主にオンラインによるコミュニケーションを通じて、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た。池上准教授は、高エネルギー加速器研究機構において本部門教員と共に ATLAS 実験のシリコン検出器増強に従事し、当プロジェクトに参加する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, 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での陽子・陽子衝突型加速器である。本研究室では、LHC 実験でデータを取得している ATLAS 実験に参加して来た。LHC で陽子陽子衝突を測定している ATLAS と CMS 両実験は、2012 年にヒッグス粒子を発見した。その後も LHC 加速器は運転を続け、ヒッグス粒子や標準理論の精密測定、新物理の探索などさまざまな素粒子物理の研究を続けて来た。今後も、加速器と検出器をアップグレードしながら 2030 年代半ばまで稼働を続け、より高い精度での研究を行う計画である。

2020 年度には、LHC 加速器と ATLAS 実験はアップグレードのためのシャットダウン中であつた。これまで得られているデータを用いた様々な物理解析が進行中である。ここではヒッグス粒子の精密測定、2 個のヒッグス粒子が同時に生成される物理過程の探索、標準理論を超えるヒッグス粒子の探索に絞って、物理解析の現状をまとめる。筑波大学グループでは、シリコンストリップ検出器の運転を行っ

ている。

また 2027 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発も光量子計測器開発部門との密接な連携のもと進められており、詳細は当報告書の光量子計測器開発部門活動報告を参照頂きたい。

LHC-ATLAS 実験の状況と将来計画

2011-2012 年の Run-1 実験では、重心系エネルギー 7 ~ 8 TeV での陽子・陽子衝突を行った。Run-1 後も LHC は、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、重心系エネルギーを 13 TeV に上げて衝突実験を行った。Run-1 では 7 TeV, 8 TeV のデータをそれぞれ 4.57 fb^{-1} , 20.3 fb^{-1} , Run-2 では 13 TeV のデータを 4.57 fb^{-1} 取得した。

2019 年からは、加速器と検出器のアップグレードのためのシャットダウンを行っている。今回のシャットダウンで、ATLAS 実験では、加速器での瞬間ルミノシティの増強に伴うバックグラウンド・レートの増加に対応するためのトリガーのアップグレードを行っている。バックグラウンドとなる QCD ジェットをいままで以上に効率よく排除しながら電子とミュオンにトリガーをかけるために、カロリメータ・トリガー用電子回路と、超前方のミュオン・トリガー検出器のアップグレードが主な作業である。

今後は、2022-2024 年に Run-3 実験を行い、重心系エネルギー 13 ~ 14 TeV でさらに 300 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。2025-2026 年には、再び加速器と検出器のアップグレードが予定されており、2027 年からは瞬間輝度を Run-3 の 2.5 倍に上げる HL-LHC 実験が開始される。10 年間かけて 3000 fb^{-1} の大規模データセットを取得する計画である。

2020 年度には、COVID-19 感染症の世界的な流行が発生し、研究者の海外渡航が各国政府により制限された。CERN でも研究者の入構を制限するなどの感染防止対策が取られた。この影響により、アップグレード・ワークに遅延が生じた。Run-3 実験はもともと 2021 年から開始の予定だったが、当初予定より 1 年間開始を延期し 2022 年に開始することに、2020 年夏に決定した。

ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、ATLAS および CMS 両実験により、2012 年に LHC 加速器での陽子・陽子衝突データを用いて発見された。LHC 実験での重要なテーマのひとつは、発見したヒッグス粒子の性質を詳しく測定し、標準理論を厳しく検証することである。

ATLAS 実験では、ヒッグス粒子の質量も、データの増加とともに精度を上げて測定を更新している。2018 年には、Run-2 の 36 fb^{-1} のデータを Run-1 の全データと合わせ、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ および $H \rightarrow ZZ^{(*)}$ の 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 $124.97 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$ と測定されていた。2020 年春には、 139 fb^{-1} を解析した $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ 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 $124.92_{-0.20}^{+0.21} \text{ GeV}/c^2$ と測定された。図 16 にこの解析での不変質量分布を示す。

ヒッグス粒子の重要な性質は、フェルミオンとの湯川結合の強さが、フェルミオン質量に比例すると標準理論で予言されていることである。また、標準理論によると、ゲージ粒子は、電弱対称性が破れる際に質量を獲得したのであり、そのヒッグス粒子との結合が標準理論通りであるかどうかを検証することは意義深い。これら標準理論の粒子とヒッグス粒子の結合は、ヒッグス粒子のさまざまな生成・崩壊過程の頻度を測定することで検証する。ヒッグス粒子事象の頻度は、生成断面積と崩壊分岐比の積として測定されるが、LHC ではこの測定量の標準理論による予言値との比を信号強度と呼ぶ。

ヒッグス粒子がゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$, $H \rightarrow WW^*$ の崩壊およびトップクォークのループ・ダイアグラムを介する $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊が、Run-1 データの詳細な解析により確認されていた。

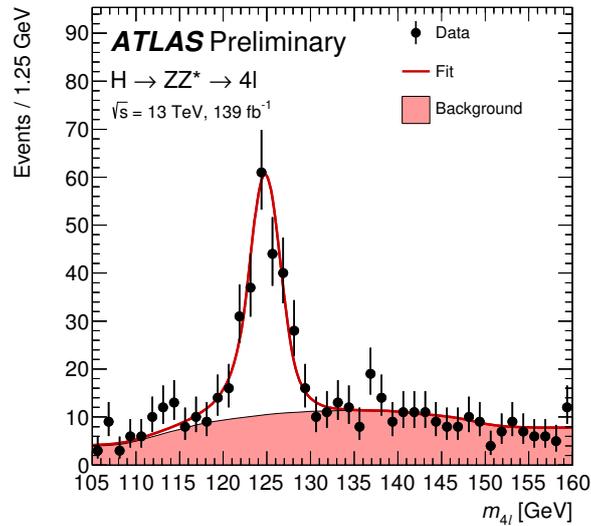


図 16 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 崩壊チャンネルでの 4 つのレプトンの不変質量の分布。フィットの結果が赤線で示されている。赤く塗った領域は、バックグラウンドの寄与を表している。

同じく Run-1 のデータ解析により、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊も ATLAS と CMS 両実験の複合結果で観測されたことで、Run-2 がはじまる前にはヒッグス粒子がフェルミオンと結合することが確認された。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、ヒッグス粒子がトップクォーク対と同時に生成される過程がそれぞれ観測された。これらによりヒッグス粒子がクォークとも湯川結合することが確認された。同時に、LHC での研究が難しいニュートリノを除いて、第 3 世代のフェルミオンとヒッグス粒子の間の結合がすべて確認できた。

続いて、第 2 世代のフェルミオンの質量の起源もヒッグス粒子であることを確かめることが大切である。2020 年に ATLAS 実験では、 139 fb^{-1} のデータを用いた $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析を公表した。この解析では、 $t\bar{t}H$ 、 VH 、グルーオン融合、ベクトル・ボソン融合の 4 つのヒッグス粒子生成過程を個別に解析し、最後に統一的に統計解釈することで解析感度を最適化した。図 17 に、すべての生成過程の解析チャンネルを複合した 2 つの μ 粒子の不変質量分布を示す。信号強度 μ は、 $\mu = 1.2 \pm 0.6$ と測定され、 $H \rightarrow \mu\mu$ 信号の有意度は 2σ であった。また、標準理論の予言値の 2.2 倍より大きい信号強度を 95% の信頼度で棄却した。 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程は、CMS 実験でも 2020 年に探索結果を公表し、 3σ の有意度で信号の兆候が確認されたと報告されている。Run-3 でデータを増やし、測定精度を向上していくことが重要である。

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の粒子の間の結合の強さを測定することができる。2020 年度には、 139 fb^{-1} のデータを用いた複合測定による結合測定をアップデートした。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 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重要な物理パラメータを解析した。図 18 に、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に

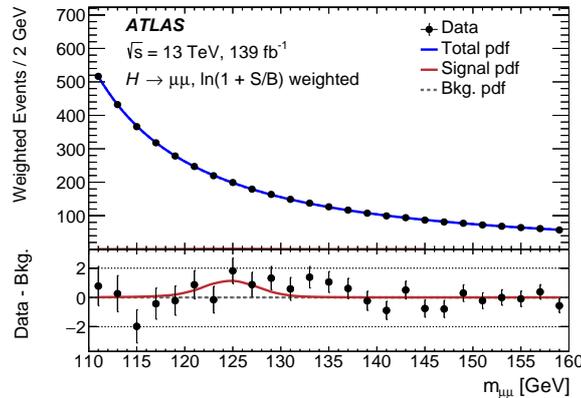


図 17 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析での 2 つの μ 粒子の不変質量分布。フィットで得られた信号とバックグラウンドの寄与を S と B とし、候補事象に $\ln(1 + S/B)$ 重みをかけてヒストグラムにした。下部パネルは、分布からバックグラウンドの寄与を差し引いた図である。

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と崩壊過程の組み合わせに対して、信号強度を測定した結果である。信号強度は生成断面積と崩壊分岐比の積を標準理論の予言値で規格化した量と定義しているので、標準理論の予言値は図中では 1 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測定した結果である。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。解析に使用できるデータ量が増加したことで、いままでよりも詳しくヒッグス粒子の生成過程を測定できるようになってきている。ヒッグス粒子の生成過程をいくつかの運動学的な領域に分割し、それぞれの領域での生成断面積を、さまざまなヒッグス粒子の崩壊過程での測定を同時にフィットすることで測定した結果が図 19 である。運動学的な領域の分割は、多くの場合ヒッグス粒子または随伴する粒子の運動量によって定義している。結果は、標準理論の予言とよく一致している。

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 20 に示す生成過程が考えられる。標準理論通りであれば左と中の 2 つの過程が混ざりあって生成するが、こうした事象を発見し精密に測定することでヒッグス粒子の自己相互作用を測定できる。一方で、たとえば重い中性ヒッグス粒子など、標準理論を超える理論では、ヒッグス粒子 2 つに崩壊する重い新粒子を予言する理論も多い。そうした新粒子が存在すれば、2 ヒッグス事象は標準理論の予言する頻度よりもはるかに頻繁に起こりうる。ATLAS 実験では、ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象を、 $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$, $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$, $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \rightarrow W^+W^-W^+W^-$, $HH \rightarrow W^+W^-\gamma\gamma$, $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$ 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 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 21 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 データを使ってアップデートしている。2020 年には、139 fb^{-1} のデータを用いて $HH \rightarrow \rightarrow WW \rightarrow bbl\nu l\nu$ 事象の探索結果をアップデートした。データはバックグラウンドとよく一致

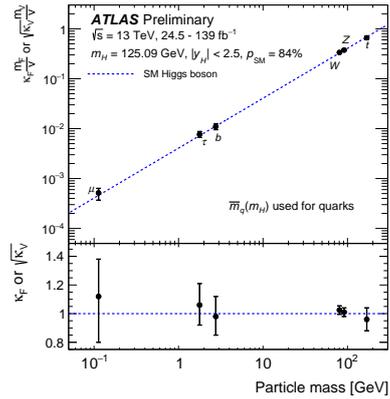
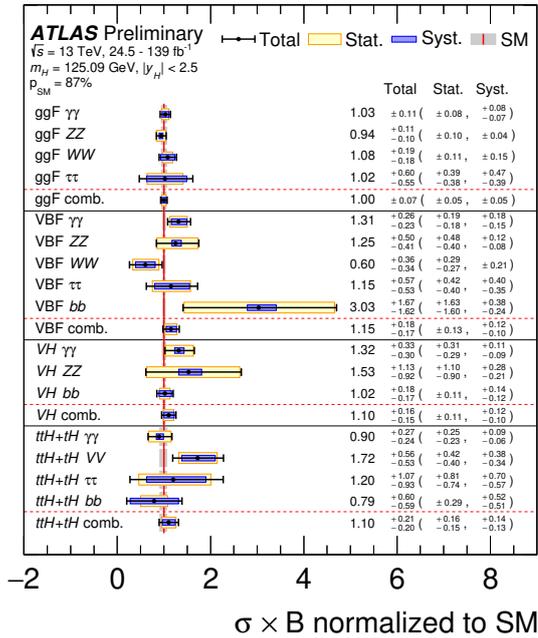


図 18 ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子測定の結果を総合的に解析した結果。(左) さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して測定された信号強度。(右) さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

し、信号は確認されなかったが、2 ヒッグス生成断面積に対して標準理論の予言する断面積の 40 倍に相当する上限を得た。先述した 36 fb^{-1} での同チャンネルの上限は標準理論の断面積の 305 倍であったの比べると、解析感度が格段に改善された。今後、他のチャンネルの解析アップデートを待ち、複合結果もアップデートされる。

標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

標準理論では、ヒッグス場としてアイソスピン・ダブレットを 1 個導入し、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。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。ヒッグス場にアイソスピン・ダブレット 2 個を導入する 2HDM モデルは、興味深い素粒子理論として取り上げられることが多い。有望視されている超対称性理論でも、ヒッグス・ダブレットを複数導入する必要がある。最小限の超対称性理論である MSSM (Minimum Supersymmetric Standard Model) でも、2 個のヒッグス・ダブレットを導入する。LHC での標準理論を超えるヒッグス粒子探索では、2HDM や MSSM のさまざまなシナリオを考えて研究を行う場合が多い。

ここでは MSSM のうちでも h_{MSSM} シナリオに限って議論する。2 つのヒッグス・ダブレットを導入する MSSM では、3 つの荷電中性なヒッグス粒子 h , H , A と正と負の荷電を持ったヒッグス粒子 H^+ , H^- の計 5 つのヒッグス粒子が予言されている。これまでの実験データとの整合性から、すでに発見されている $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子は h である可能性が高く、他の 4 つのヒッグス粒子は h よりも重い可能性が高い。

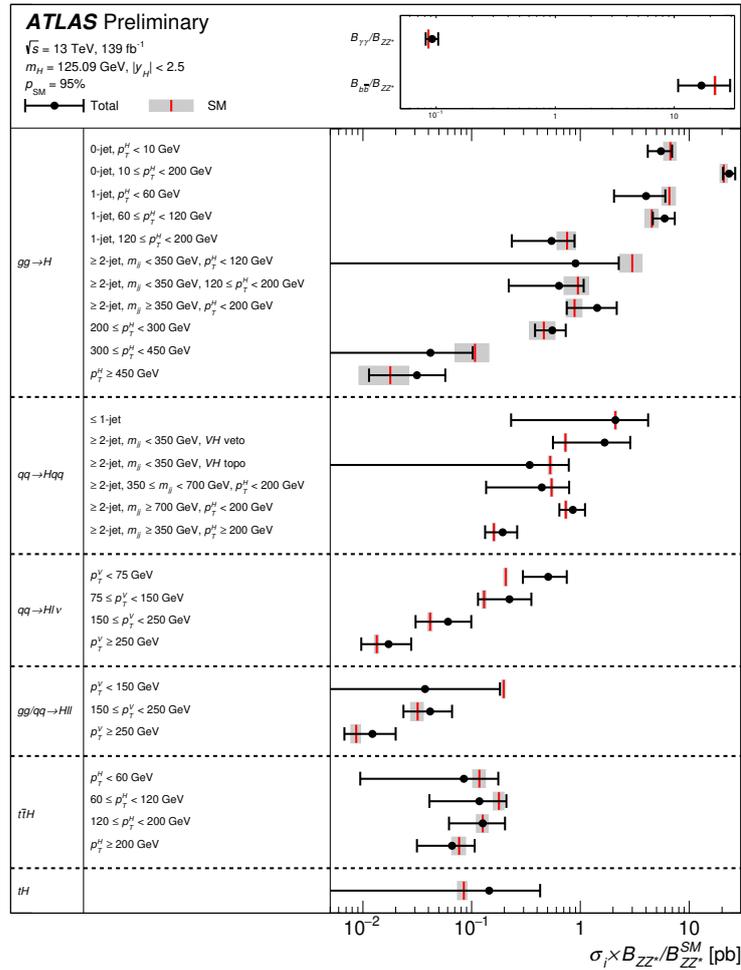


図 19 ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

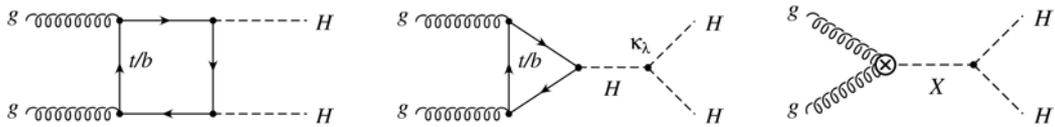


図 20 LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

重いヒッグス粒子の直接探索解析による h_{MSSM} シナリオに対する棄却領域をまとめたのが図 22 である。2020 年に公表した $H \rightarrow \tau\tau$ 探索だけ 139 fb^{-1} のデータを使用した結果で、他のチャンネルは 36 fb^{-1} での解析の結果である。

2021 年 2 月には、トップクォークを随伴して生成し、 $H^\pm \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子を Run-2 全データを用いて探した解析結果を公表した。この解析で得られた生成断面積の上限と h_{MSSM} シナリオのパラメータに対する棄却域を図 23 にしめす。

ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

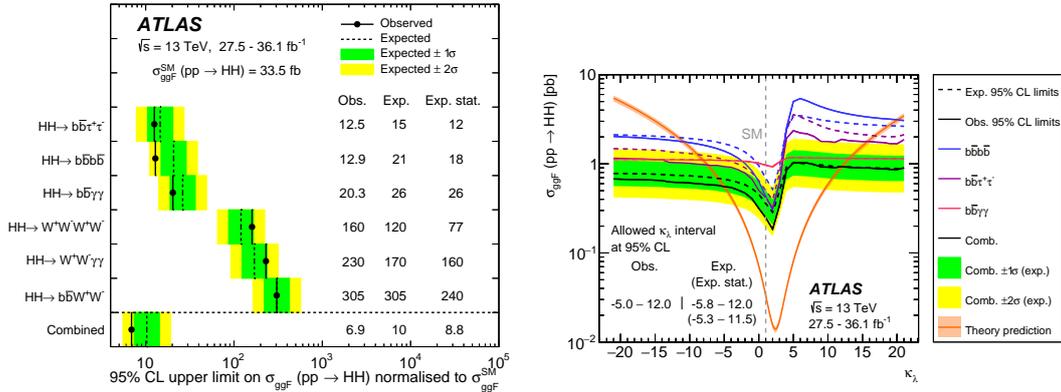


図 21 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。(左) 解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) ヒッグス粒子の自己相互作用 κ_λ の関数として計算した生成断面積の上限。 κ_λ は標準理論の予言値で規格化して表示している。

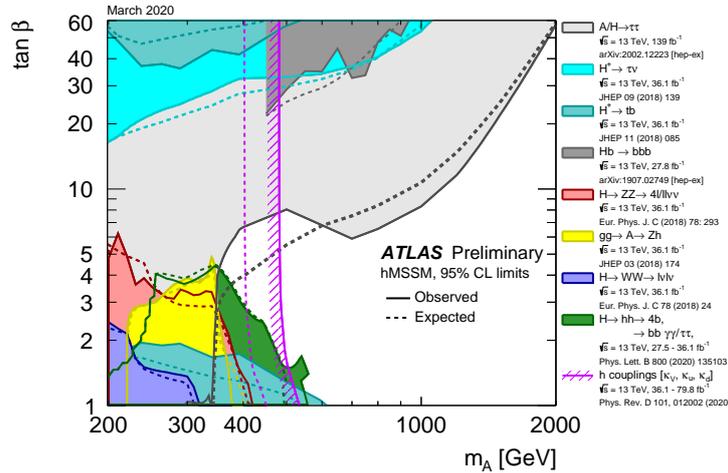


図 22 ATLAS 実験でのさまざまな解析による、hMSSM シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された 125 GeV/c² のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

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。Run 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 2021 年にかけての LHC シャットダウン期間中では、今後の Run 3 運転 (2022–24 年) 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 LHC の厳しい実験環境下で運転されてきた SCT センサーは、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、Run 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準備をしておくことも重要となる。

SCT 用シリコンストリップセンサーは、 n 型シリコンバルク上に p^+ 型ストリップを形成した p^+ -on- n

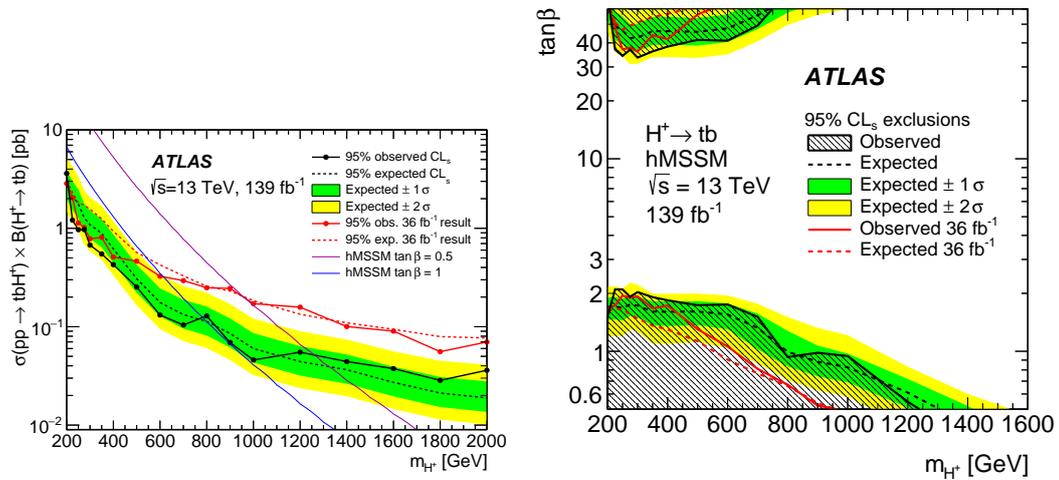


図 23 $H^\pm \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索結果。比較のために 36 fb^{-1} のデータによる結果を赤線で示している。(左) 荷電ヒッグス粒子の質量の関数として得られた生成断面積の上限值。(右) h_{MSSM} シナリオに対する制約。

型シリコンセンサーである。 n 型バルクが損傷を受け、実効アクセプター濃度が上昇すると、実効的に p 型バルクとなる「型変換」を起こす。型変換前にはストリップ直下にあった pn 接合部は、型変換後には裏面の n^+ 型電極との境界部に移動する。すると、空乏層は裏面側から広がるようになるため、十分なバイアス電圧を印加して完全空乏化しないと、荷電粒子検出効率（ヒット検出効率）が低下してしまう。

このような型変換の兆候は、図 24 に示すヒット検出効率やノイズのバイアス電圧依存性によく顕れている。ヒット検出効率（図 24 左）は、空乏層が裏面側から広がるようになることを反映し、型変換後が起きた 2017 年 11 月以降はプラトーに到達する電圧が増加し、2018 年終わりには約 140 V となっている。また、同時期にノイズのバイアス電圧依存性（図 24 右）には、数 10 から 100 V 付近に、“ニー”（knee）と呼ばれる特徴的な依存性の変化が見える。このニーの前後で完全空乏化が起きていると考えられるが、放射線損傷により電場が複雑になるため、静電容量特性の電圧依存性に影響があらわれていると推測される。

2022 年より始まる ATLAS Run 3 運転において、SCT のバイアス電圧を完全空乏化電圧以上に保つことは、その性能を維持する鍵となる。より正確に現在の完全空乏化電圧を見積もるため、暗電流-電圧特性の変化を利用した測定手法を開発した。図 25 は、最も放射線量の多い SCT 最内層における測定結果を示す。最下段に示されているように、暗電流は予想値と良く合致しており、またセンサー内の空乏層の体積に比例するため、完全空乏化電圧を見積もる良い指標となる。ここから見積もられた完全空乏化電圧は、図 25 の 3 段目に示されている。この図から、Run 2 運転期間中における完全空乏化電圧の変化は、ハンブルクモデルにもとづく予想値とよく一致しており、2016–17 年に型変換が発生したことも確認された。Run 3 運転終了時点での完全空乏化電圧は約 150 V 程度と予想されており、SCT 電源システム的设计上限値である 450 V と比べて十分に低く保たれると評価できる。

SCT センサーへの放射線損傷の影響は、将来の大型シリコン飛跡検出器システムの運用に対しても有用な情報となる。より詳細に、放射線損傷による性能への影響のメカニズムを理解するため、TCAD ソフトウェアによるシミュレーションを利用した研究も進めている。これまでに、図 26 に示すような、

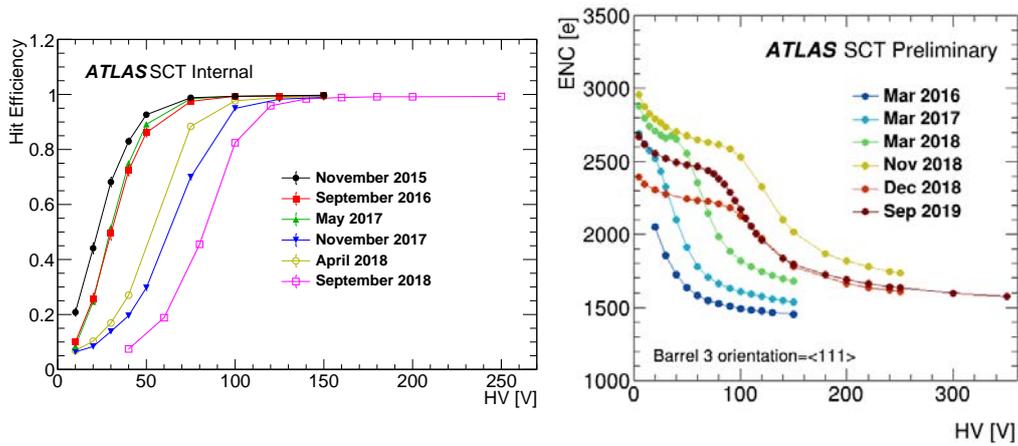


図 24 ヒット検出効率（左）とノイズ（右）のバイアス電圧依存性測定結果。

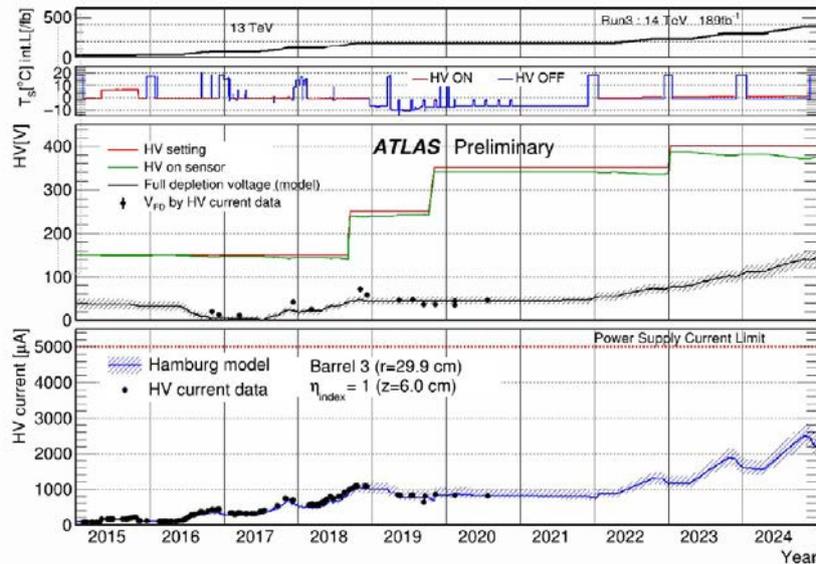


図 25 Run 2 から Run 3 運転期間における、積分ミノシティー（一段目）、センサー温度（二段目）、完全空乏化電圧（三段目）、漏れ電流（四段目）の変化。三段目の図中、黒実線はハンブルクモデルにもとづく予想、黒点は実測値を表す。また、バイアス電圧の設定値（赤実線）と、漏れ電流による電圧降下を考慮したセンサーに対する実効的なバイアス電圧（緑実線）も描かれている。四段目の図中、青実線はハンブルクモデルにもとづく予想、黒点は実測値を表す。

型変換後の p^+ -on- n 型シリコンストリップセンサーの特性を定性的に再現することに成功した。今後、格子欠陥密度の増加率などのシミュレーションパラメーターを決定し、定量的に実際の SCT を再現した上で、その放射線損傷に関するメカニズムの調査を進めていく。

(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，吉田，金）

COBAND 実験は、筑波大学宇宙史研究センター素粒子構造部門を中心とする国際共同プロジェクトであり、現在の観測値であるニュートリノ寿命下限値 10^{12} 年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を探索する実験を計画中である。

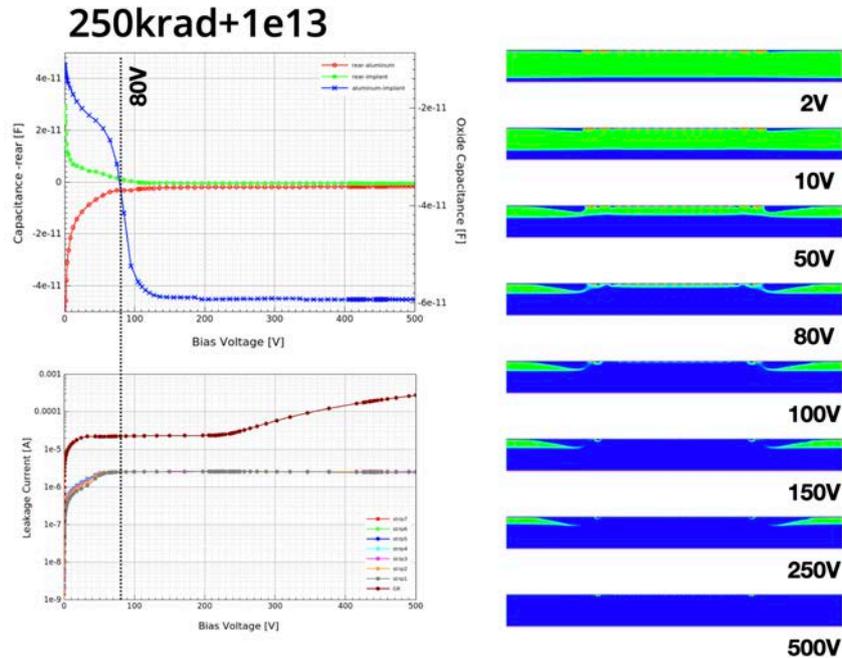


図 26 TCAD によってシミュレートした、放射線損傷後の静電容量（左上・青実線）および漏れ電流（左下・茶実線）のバイアス電圧依存性。このときのアクセプター濃度の変化を右に示す。緑領域がアクセプター濃度が高い領域、青が空乏化した領域を表す。

我々のグループでは、観測ロケット実験で使用予定のニオブ（超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 1.55$ meV, $T_c = 9.23$ K）とアルミニウム（ $\Delta = 0.172$ meV, $T_c = 1.20$ K）を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ (Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた超伝導ギャップエネルギーが更に小さいハフニウム（ $\Delta = 20$ μ eV, $T_c = 0.165$ 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。これらの超伝導体を用いた検出器の開発、及び SOI 技術を用いた超伝導体検出器の極低温信号読出の開発は、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いる。これらの開発状況の詳細については、光量子計測器開発部門の報告に「COBAND 実験 遠赤外域光検出器の開発」プロジェクトとして記載しているので、ここでは割愛し、以下ではロケット実験に向けたその他の取り組みについて報告する。

Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が現実のものとなれば、格子状に 50 個並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。ロケット実験に向けた望遠鏡の光学系及び Nb/Al-STJ による分光測定のための回折格子を含むロケット実験用の光学系の開発も福井大、関西学院大等との共同研究により進められている。これまでの成果として、波動光学シミュレーションに基づいた 50 μ m 域回折格子設計・製作、及び福井大の遠赤外線分子レーザーによる回折格子の性能を確認している。2020 年度における成果としては、望遠鏡光学系の光学シミュレーションによる集光効率の計算、及び光学系の設計の最適化を行い、ミラーの一部の試作 (図 27)、及び可視光レーザーポインタを用いたシミュレーションとの比較を行った。また、STJ の受光効率を高くするために、STJ 素子表面に反射防止膜を施す計画である。反射防止膜としては、シリコン薄膜を用いるが、薄膜の厚みを最適化するためには、極低温での 50 μ m 域光に対する Nb 屈折率・

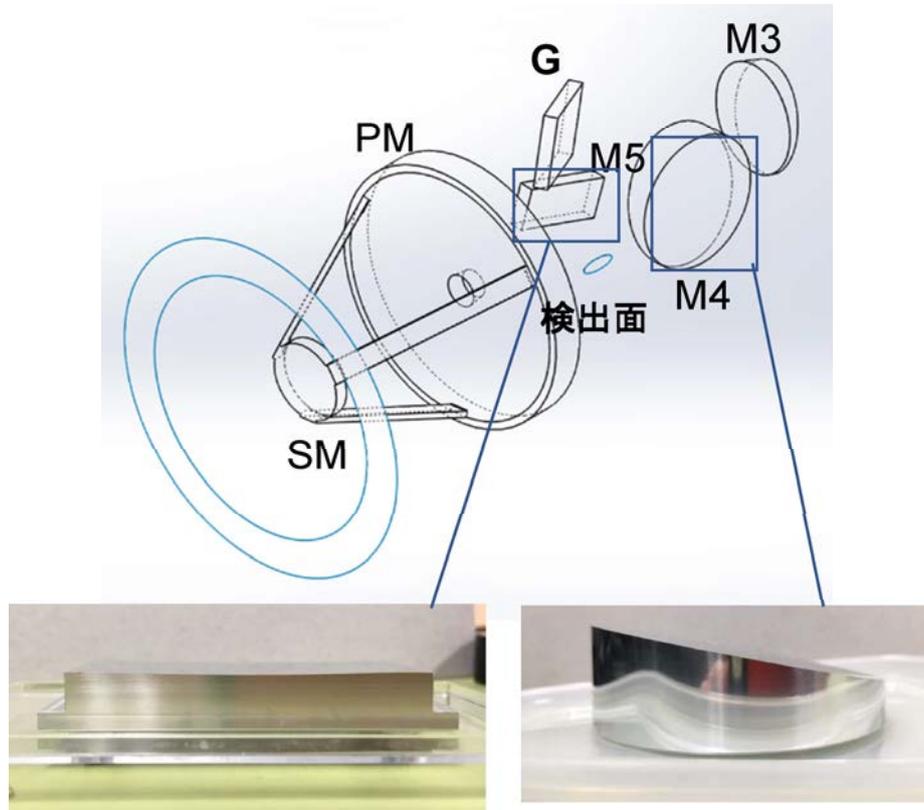


図 27 光学シミュレーションの計算に基づき設計された望遠鏡光学系の構造図。光学系を構成するミラー M4, M5 は試作され、レーザーポインタを使用して集光位置の測定によるシミュレーションとの比較が行われた。

消衰係数のデータが必要となる。これらの値は実測されたデータが存在しないため、波長 $10\ \mu\text{m}$ 、温度 $4.2\ \text{K}$ までのデータから推測した値を使い、シリコン膜厚 $5\ \mu\text{m}$ という計算結果を得た。そしてこの膜厚のシリコン薄膜の試作、及び Nb/Al-STJ 表面への貼り付けテストを行った。この反射防止膜の反射率の測定には、福井大学遠赤外センターの遠赤外分子レーザーを使う予定である。また、反射防止膜の正確な最適膜厚を決定するため、極低温での $50\ \mu\text{m}$ 域光に対する Nb 屈折率・消衰係数の実測データが必要であり、その測定に向け、予備実験として室温・可視光域での測定し既存の実測データとの比較により、測定法の確立を行っている。

(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。量子化された幾何、NS5 ブレーン、行列模型における部分的閉じ込め、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。

行列模型における量子化された幾何について

行列模型は M 理論や弦理論の非摂動的定式化を与えると予想されている。行列模型はその名の通り、有限サイズの行列を自由度とした模型であるが、行列サイズが無限大になる極限において、広がった時空における弦や膜のダイナミクスを記述していると期待されている。弦理論における弦や D-brane と

いった物体の幾何学は、行列模型において行列の様々な配位により記述されると考えられており、この幾何と行列の関係は、行列正則化という名で知られている。

伊敷と大学院生の足立、菅野は、ダブリン高等研究所（アイルランド）の松本高興研究員とともに行列正則化についての研究を行った。伊敷らは行列正則化を与える数学的手法の一つである「Berezin-Toeplitz 量子化」に注目し、その一般化を得ることに成功した（論文 85）。従来の行列正則化では、スカラー場の量子化のみが対象であったが、この一般化された枠組みでは電荷をもったスカラー場やテンソル場への適用が可能となった。本研究ではさらに、それらの場に作用するラプラス演算子の量子化の方法も提案された。

行列模型における NS5 プレーンの記述について

弦理論には弦だけではなく、D-brane や NS5-brane と呼ばれる多次元に広がった物体が含まれていることが知られている。弦や D-brane については、それらを記述する方法が（少なくとも低エネルギー領域では）知られているが、NS5-brane についてはまだ記述法が確立しておらず、弦理論の理解に向けてこれを理解することが重要な課題となっている。

先行研究により、NS5-brane が BMN 行列模型と呼ばれる模型を用いて記述できるのではないかと予想されていた。伊敷、浅野と大学院生の渡辺は、ダブリン高等研究所（アイルランド）の松本高興研究員とともにこの予想の数値的検証を行った。その結果、行列模型の物理量が理論に含まれるパラメータに対して予想された通りに振る舞うことが示された。この結果は先行研究の予想が正しいことを強く支持している。

行列模型における部分的閉じ込め

部分的閉じ込めは、ラージ N ゲージ理論での非閉じ込め相転移の際に中間のエネルギースケールに閉じ込め領域と非閉じ込め領域が共存する二相共存現象として発見された。この現象はゲージ/重力対応を通じて、双対な重力理論に現れるブラックホール時空の転移現象と関連することが予想され、超弦理論や重力の量子的な性質の解明に寄与できる可能性がある。渡辺は、サリー大学の花田政範研究員や OIST の船井正太郎博士、Jena 大学の Bergner 研究員らと共に gauged-Gaussian 行列模型や Yang-Mills 行列模型の Monte Carlo 計算を通して相転移温度近傍の解析を行った。これらの模型では解析的な計算や先行研究により、Polyakov line phase の分布関数やエネルギー等の物理量の解析から部分的閉じ込めが起きていることがわかっているが、行列場の成分の意味でも前述のような二相共存が起こっているかは明らかになっていなかった。また、Yang-Mills 行列模型は相互作用を含む模型のため、弱結合領域を超えても部分的閉じ込めが起こるかも非自明な問題であった。今回の研究（論文 88）では、エルミートな行列場の独立自由度から分布関数を定義し、その振る舞いから部分的閉じ込めと解釈できる二相共存現象が起きていることを数値的に示した。

スカラー行列場の独立な自由度の意味で二相共存が起きていると、閉じ込め領域と非閉じ込め領域での自由度の分布関数 $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x), \rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$ は一意に決まっており、全体としての分布関数はそれらと適当な重み付け和で記述できることを意味している。ここでの重みは (非) 閉じ込め領域にいるように振る舞う自由度の個数 (以降 M, M' で表す) によって決まるはずであり、Polyakov loop の値によって読み取ることができる。以上のアイデアに基づいて Yang-Mills 行列模型のスカラー場の配位を数値的に解析して得られた、それぞれの領域での分布関数が図 28 である。解析の都合上、異なる重み M, M' で共存している 2 つの分布関数を比較することで $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$ と $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$ へ分離しているが、その (M, M') の組み合わせに依らず分布関数が一意に得られている。また図 29 を見るとわかるように、この閉じ込め/非閉じ込め領域に分離できた分布関数はお互い異なる関数形をしており、統計誤差よりも大きいことがわ

かる。同様の結果が gauged-Gaussian 行列模型での解析や、Yang-Mills 行列模型の配位を異なる手法で生成した場合についても得ることができた。

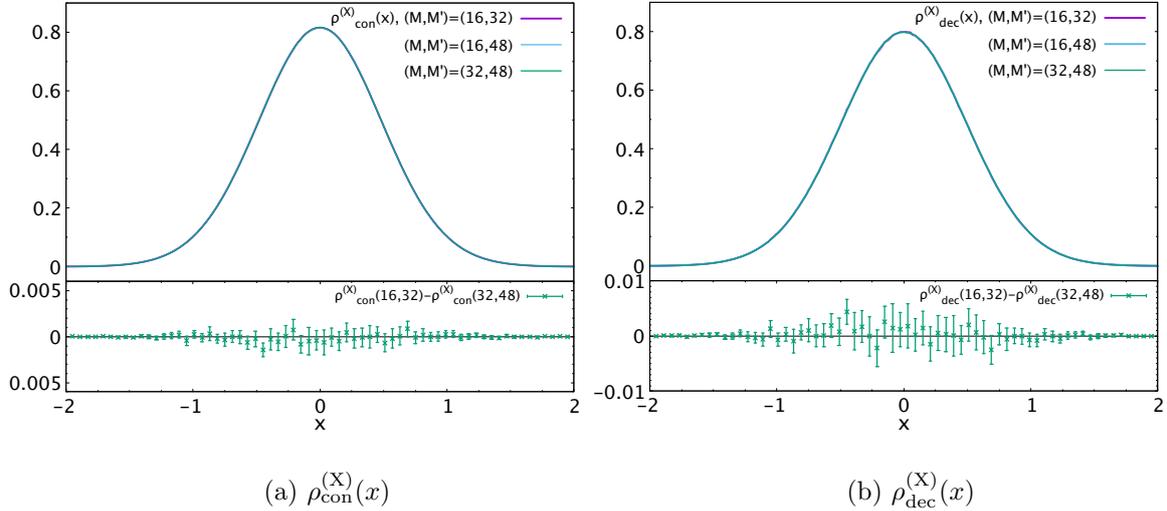


図 28 Yang-Mills 行列模型を $N = 64$, $L = 24$, かつ $T = 0.885$ で数値計算して得られた行列スカラー場 X の独立な自由度の分布関数。 $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$ と $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$ はそれぞれ閉じ込め/非閉じ込め領域での分布関数を示す。

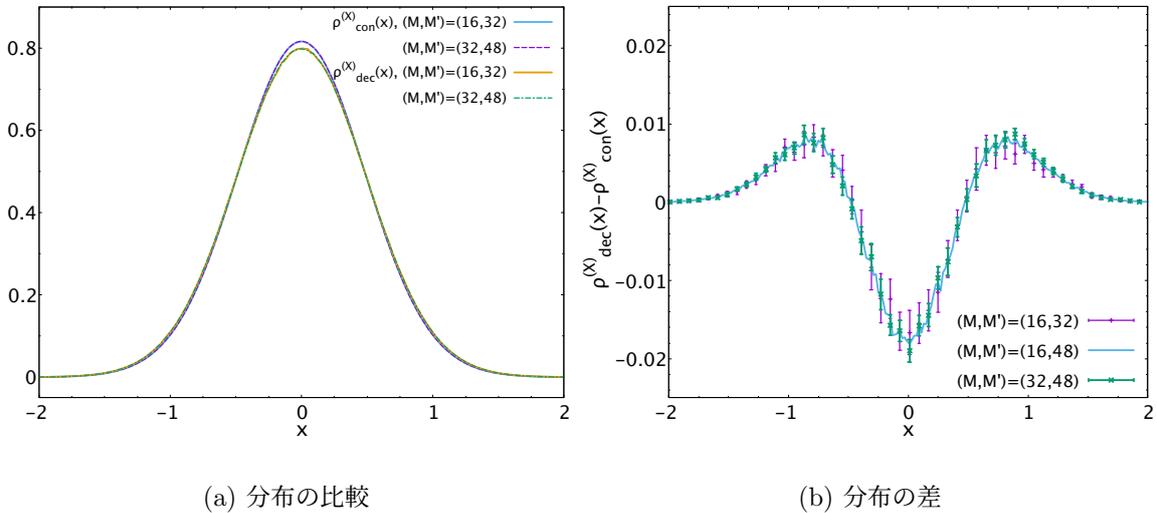


図 29 図 28 に示した各領域での分布関数 $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$, $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$ の比較。 $N = 64$, $L = 24$, かつ $T = 0.885$ での Yang-Mills 行列模型の行列スカラー場 X の配位を用いて計算した。(a) 両者の分布は僅かではあるが、異なる分布をしていることがわかる。(b) 両者の分布の差は分布関数の統計誤差よりも明らかに大きい。

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。JT gravity は AdS/CFT との関係から最近非常に活発に議論されている。

JT gravity に対応する非臨界弦理論の極限は、非臨界弦理論として解釈するのが難しい極限であり、ど

のように記述したらよいかという問題が多く研究者を悩ませてきた。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。確率過程量子化に基づいた弦の場の理論の定式化を整備し、JT gravity に対応する極限を記述するにはどうしたらいいかを明らかにした。

(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。本年は、これまでに開発を進めてきた ^{48}Ca を含むヨウ化カルシウム (CaI_2) シンチレータに対して、低温での特性を評価した。 CaI_2 は発光量がプラスチックシンチレータの10倍近く、波形による粒子識別も可能であるため、高性能なシンチレータとして有望である。いくつかのアルカリハライド無機シンチレータでは温度を冷やすことで発光量の増加が報告されており、 CaI_2 でも低温でさらなる発光量の増加が期待される。

金属材料研究所吉川研究室の炉を用いて Bridgman-Stroockbarger 法で、2インチ径の CaI_2 結晶育成を行った。多少のクラックが入ってしまったが、作成した結晶を大阪の ISC Lab. 株式会社へ送って加工を委託した。その結果、1.5 cm 角×2 mm 厚程度に結晶を切り出し、アルミケースに封止することに成功した (図 30 左)。この結晶を、ウルトラバイアルカリ光電面を持つ光電子増倍管 (R7600U-200) にグリースを用いて接着し、全体をマイナス 40 °C まで温度コントロールが可能な恒温槽内に設置、外側から ^{137}Cs 線源からのガンマ線を照射した。光電子増倍管には HV モジュールで高電圧をかけ、出力信号はシェーピングアンプ (ORTEC 572A) を通して、MCA (ORTEC 926) でスペクトルを取得した。実験セットアップの概要を図 30 中央に示す。また、波形の測定では、光電子増倍管の信号を PM アンプで 10 倍に増幅し、Waveform digitizer に入力してデータを取得した。温度は、常温 (20 °C) から、10 度おきに -40 °C まで変えて測定を行った。

異なる温度で得られたエネルギースペクトルを図 31 左に示す。それぞれ、20 °C (青), 0 °C (赤), -20 °C (緑), -40 °C (青) の分布となっている。温度が下がるにつれて、Cs の 662 keV の光電ピークが右にシフトしており、発光量の増加が確認できる。図 31 右は、各温度でのピーク位置を相対的にプロットしたものである。20 °C の場合を 1 としているが、-40 °C まで冷やすことで 27% 程度の発光量増加が確認された。-30 °C まではほぼ線形で変化しており、その変化率は約 0.5 %/°C と見積もられた。同じく Ca を含むアルカリハライド結晶である CaF_2 では、約 2 %/°C という値が報告されており、それよりは温度依存性は小さいことが分かった。図 32 は温度ごとの平均波形をプロットしたものである。温度が下がるにつれて、遅い発光成分が増えて波形の時定数が長くなっていることが見て取れる。

以上の通り、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊探索を目的としてこれまでに開発を進めてきた

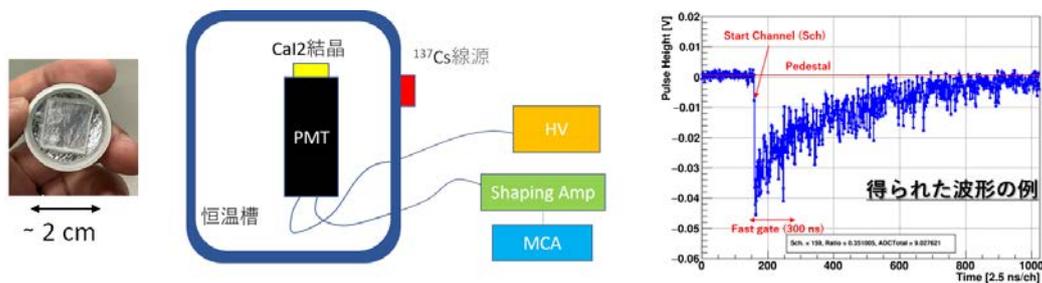


図 30 (左) 金研で育成し、業者で加工した CaI_2 結晶。(中) 低温でのスペクトル測定実験のセットアップ。(右) 波形測定実験で得られた波形データのサンプル。

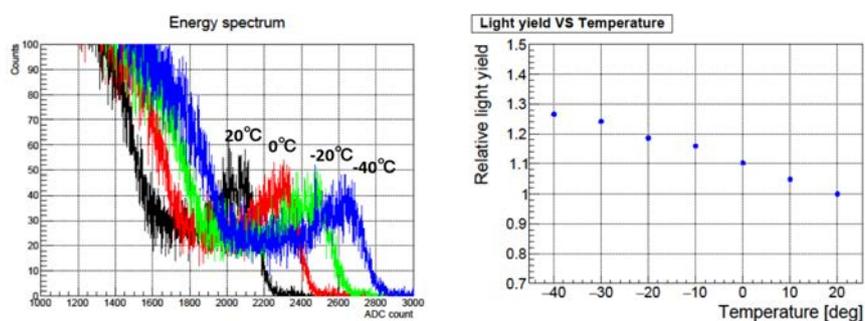


図 31 (左) Cs 線源照射時の各温度でのエネルギースペクトル。(右) 横軸温度、縦軸相対発光量の二次元プロット。20 °C の値を 1 としている。

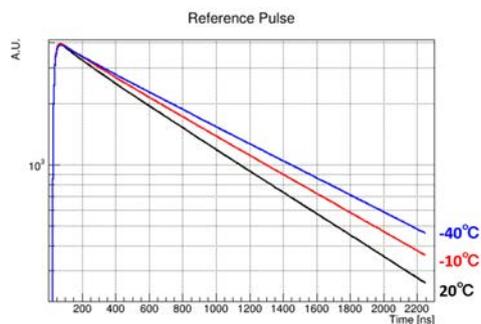


図 32 温度によるの平均波形の変化。

ヨウ化カルシウム (CaI_2) 結晶を用いて、その低温での発光特性評価を行った。その結果、以下の 2 点が明らかになった。

- 低温で発光量が増加する (1 °C 当たり約 0.5 %)。
- 低温で発光時定数が長くなる。

発光量の増加が二重ベータ崩壊探索で重要なエネルギー分解能や粒子波形識別能にどのような影響を与えるのか、今後調査を継続していく。

〈論文〉 光子計測器開発部門プロジェクトにおける成果と重複するものは、光子計測器開発部門報告で掲載されています。

1. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Observation and

- Measurement of Forward Proton Scattering in Association with Lepton Pairs Produced via the Photon Fusion Mechanism at ATLAS,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 261801 (2020).
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions recorded by ATLAS in Run 2 of the LHC,” *JHEP* **10**, 062 (2020).
 3. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a photon and a hadronically decaying Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 251802 (2020).
 4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with one lepton, missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into two b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 691 (2020).
 5. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for $t\bar{t}\bar{t}$ production in the multilepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1085 (2020).
 6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction and identification of boosted di- τ systems in a search for Higgs boson pairs using 13 TeV proton-proton collision data in ATLAS,” *JHEP* **11**, 163 (2020).
 7. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation of the ATLAS trigger system in Run 2,” *JINST* **15**, P10004 (2020).
 8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances decaying into a weak vector boson and a Higgs boson in the fully hadronic final state produced in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **102**, 112008 (2020).
 9. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Alignment of the ATLAS Inner Detector in Run-2,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1194 (2020).
 10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential cross-sections of combined $t\bar{t}\gamma$ and $tW\gamma$ production in the $e\mu$ channel at 13 TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **09**, 049 (2020).
 11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new non-resonant phenomena in high-mass dilepton final states with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 005 (2020). [erratum: *JHEP* **04**, 142 (2021)]
 12. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section in the lepton+jets channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **810**, 135797 (2020).
 13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pairs of scalar leptoquarks decaying into quarks and electrons or muons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 112 (2020).
 14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in events with a Higgs or Z boson using 139 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1080 (2020).
 15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into two new low-mass spin-0 particles in the $4b$ channel with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **102**, 112006 (2020).
 16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the missing transverse momentum triggers for the ATLAS detector during Run-2 data taking,” *JHEP* **08**, 080 (2020).
 17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the $Z\gamma$ decay mode of the Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **809**, 135754 (2020).
 18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for $t\bar{t}$ resonances in fully hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 061 (2020).
 19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the upgraded PreProcessor of the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger,” *JINST* **15**, P11016 (2020).
 20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [CMS and ATLAS], “Combination of the W boson polarization measurements in top quark decays using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **08**, 051 (2020).
 21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet resonance search with weak supervision using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions in the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 131801

- (2020).
22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1165 (2020).
 23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the all-hadronic $t\bar{t}$ plus missing transverse momentum final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 737 (2020).
 24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2,” *JINST* **15**, P09015 (2020).
 25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 005 (2020).
 26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ CP Properties of Higgs Boson Interactions with Top Quarks in the $t\bar{t}H$ and tH Processes Using $H \rightarrow \gamma\gamma$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 061802 (2020).
 27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson inclusive and differential fiducial cross sections in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 942 (2020).
 28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Lund Jet Plane Using Charged Particles in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 222002 (2020).
 29. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Higgs boson production cross-section measurements and their EFT interpretation in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 957 (2020). [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 29 (2021); erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 398 (2021)]
 30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs Boson Decays into a Z Boson and a Light Hadronically Decaying Resonance Using 13 TeV pp Collision Data from the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 221802 (2020).
 31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with a displaced vertex and a muon with large impact parameter in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **102**, 032006 (2020).
 32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross-section for a Z boson in association with b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 044 (2020).
 33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **807**, 135595 (2020).
 34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Higgs bosons decaying into two tau leptons with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 051801 (2020).
 35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dijet resonances in events with an isolated charged lepton using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collision data collected by the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 151 (2020).
 36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of the associated production of a top quark and a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 124 (2020).
 37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson in the $H \rightarrow \tau\tau$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **805**, 135426 (2020).
 38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ process via vector-boson fusion production using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 108 (2020). [erratum: *JHEP* **01**, 145 (2021)]
 39. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of soft-drop jet observables in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **101**, 052007 (2020).
 40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of isolated-photon plus two-jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 179

- (2020).
41. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 072001 (2020).
 42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the transverse momentum distribution of Drell–Yan lepton pairs in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 616 (2020).
 43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for electroweak production of supersymmetric particles with compressed mass spectra in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 052005 (2020).
 44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV decaying into displaced hadronic jets in the ATLAS inner detector and muon spectrometer,” *Phys. Rev. D* **101**, 052013 (2020).
 45. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct stau production in events with two hadronic τ -leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 032009 (2020).
 46. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $Z(\rightarrow \ell^+\ell^-)\gamma$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 054 (2020).
 47. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the azimuthal anisotropy of charged-particle production in $Xe + Xe$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **101**, 024906 (2020).
 48. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS data quality operations and performance for 2015–2018 data-taking,” *JINST* **15**, P04003 (2020).
 49. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections for single diffractive dissociation in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS ALFA spectrometer,” *JHEP* **02**, 042 (2020). [erratum: *JHEP* **10**, 182 (2020).]
 50. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum and process dependent azimuthal anisotropies in $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV $p+Pb$ collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 73 (2020).
 51. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ Z boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured by the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **802**, 135262 (2020).
 52. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for electroweak production of two jets in association with a $Z\gamma$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **803**, 135341 (2020).
 53. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section and lepton differential distributions in $e\mu$ dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 528 (2020).
 54. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in mass distributions of jet pairs using 139 fb $^{-1}$ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 145 (2020).
 55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of jet calibration and energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1104 (2020).
 56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of J/ψ production in association with a W^{had} boson with pp data at 8 TeV,” *JHEP* **01**, 095 (2020).
 57. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson decays $H \rightarrow ee$ and $H \rightarrow e\mu$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **801**, 135148 (2020).
 58. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using 139 fb $^{-1}$ of data collected with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 046 (2020).
 59. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb $^{-1}$ of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **101**, 012002 (2020).
 60. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS

- detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 082301 (2020).
61. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV and decaying into collimated leptons or light hadrons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 450 (2020).
 62. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of electron and photon triggers in ATLAS during LHC Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 47 (2020).
 63. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral currents in processes with one top quark and a photon using 81 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **800**, 135082 (2020).
 64. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of charginos and sleptons decaying into final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 123 (2020).
 65. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, 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**, 1028 (2019) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **80**, 1092 (2020).]
 66. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $bbl\nu l\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **801**, 135145 (2020).
 67. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, 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 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **100**, 064901 (2019) [erratum: *Phys. Rev. C* **101**, 059903 (2020).]
 68. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for displaced vertices of oppositely charged leptons from decays of long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **801**, 135114 (2020).
 69. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for lepton-flavour-violating decays of the Higgs boson in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **800**, 135069 (2020).
 70. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral Higgs bosons produced in association with b -quarks and decaying into b -quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **102**, 032004 (2020).
 71. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, 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) [erratum: *JHEP* **06**, 042 (2020).]
 72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of long-range two-particle azimuthal correlations in Z -boson tagged pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 64 (2020).
 73. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for Higgs boson pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **800**, 135103 (2020).
 74. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Magnetic Monopoles and Stable High-Electric-Charge Objects in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 031802 (2020).
 75. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fluctuations of anisotropic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 051 (2020).
 76. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair spin correlations in the $e\mu$ channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV using pp collisions in the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 754 (2020).
 77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections and W^+/W^- cross-section ratios for W boson production in association with jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 077 (2018) [erratum: *JHEP* **10**, 048 (2020).]
 78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of top quark pair differential cross-sections in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **94**, 092003 (2016) [addendum: *Phys. Rev. D* **101**, 119901 (2020).]
 79. T. Iida, *et al.*, “The energy calibration system for CANDLES using (n,γ) reaction”, *Nucl. Instr. Meth.* A986, 164727(2021).
 80. B. T. Khai *et al.* (T.Iida), “A Study on Energy Resolution of CANDLES Detector”, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*

Vol 68, Issue 3, Page 368-378 (2021).

81. S. Umehara *et al.* (T. Iida), “Search for neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca -CANDLES-”, *Journal of Physics: Conference Series*/1342/p.012049 (2020).
82. T. Iida, Y. Kibe and Y. Kondo, “Development of water scintillator for a future large-scale neutrino experiment”, 2019 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Med. Imag. Conf. Proc. (NSS/MIC), pp. 1-3 (2020).
83. T. Iida, *et al.*, “R&D of new high-performance scintillator including double beta decay nuclei”, 2019 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Med. Imag. Conf. Proc. (NSS/MIC), pp. 1-3 (2020).
84. S. Hirose [ATLAS SCT Group], “The operational experience, challenges and performance of the ATLAS Semiconductor Tracker during LHC Run 2,” *PoS Vertex2019*, 005 (2020) doi:10.22323/1.373.0005.
85. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, Laplacians on Fuzzy Riemann Surfaces, arXiv:2103.09967 [hep-th]
86. H. Adachi, G. Ishiki, K. Saito and T. Matsumoto, Matrix regularization for Riemann surfaces with magnetic fluxes, *Phys. Rev. D* 101 (2020) 10, 106009 [arXiv:2002.02993 [hep-th]]
87. G. Ishiki and T. Matsumoto, Diffeomorphisms and approximate invariants on fuzzy sphere, *PoS CORFU2019* (2020) 193.
88. H. Watanabe, G. Bergner, N. Bodendorfer, S. S. Funai, M. Hanada, E. Rinaldi, A. Schäfer, and P. Vranas, Partial deconfinement at strong coupling on the lattice, *JHEP* 02 (2021) 004 [arXiv:2005.04103 [hep-th]].

〈著書・総説等〉

1. 飯田崇史, 尾崎秀義, 石徹白晃治, 「ニュートリノは神の粒子か? — 神岡地下 1000m で進む $0\nu\beta\beta$ 発見への挑戦 —」, *高エネルギーニューズ* Vol.39 No.3 99-109 ページ (2020).

〈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, 2021 年 2 月

1. 石井 雄太: ターゲット空間分割によるエンタングルメント・エントロピーの定式化, 2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)
2. 新津 優弘: 開弦場の運動方程式の厳密解, 2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)
3. 吉川 浩史: 行列模型を用いた M 理論のローレンツ共変な定式化, 2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)
4. 前川 群: COBAND 実験のためのロケット搭載型遠赤外光学素子の設計開発, 2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)

〈研究成果発表〉 光量子計測器開発部門プロジェクトにおける成果と重複するものは、光量子計測器開発部門報告で掲載されています。

[国際会議]

1. Nobuyuki Ishibashi, “SFT for noncritical strings revisited”, (招待講演) Workshop on fundamental aspects of string theory (online, June 1-12 2020, ICTP-SAIFR, Sao Paulo, Brazil)
2. Hiromasa Watanabe, “Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice”, KEK Theory Workshop 2020 (online, Dec. 15 - 18, 2020)
3. Hiromasa Watanabe, “Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice”, Strings and Fields 2020 (online, Nov. 16 - 20, 2020)
4. Hiromasa Watanabe, “Partial deconfinement for some bosonic matrix models”, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (online, Aug. 4 - 7, 2020)

[国内学会・研究会]

1. 吉田拓生: COBAND 実験のための遠赤外光源開発, 宇宙史研究センター 2020 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2020 年 6 月 15 日), オンライン (招待講演)
2. 廣瀬茂輝: LHC-Run2 全データを用いたヒッグス粒子解析と来年度開始予定の Run3 準備状況, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
3. 山内大輝: LHC-ATLAS 実験でのブーストしたトップクォーク事象を用いた荷電ヒッグス粒子探索手法の開発, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
4. 若狭玲那: LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるセミレプトニック終状態を用いた弱ボソン散乱過程の断面積測定, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
5. 山根綾太: COBAND 実験遠赤外線光学系における集光器と反射防止膜設計, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
6. 前川群: COBAND 実験のための光学系設計開発 IV, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
7. 山根綾太: COBAND 実験遠赤外線光学系における集光器と反射防止膜設計 II, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン

8. 前川群：COBAND 実験のためのロケット搭載型遠赤外光学素子の設計開発，筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 23 日)，オンライン
9. 山根綾太：COBAND 実験遠赤外線光学系における集光器と反射防止膜設計，筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 23 日)，オンライン
10. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験，第 3 回観測ロケットシンポジウム，JAXA/ISAS(2021 年 3 月 24-25 日)，オンライン
11. 山内大輝：LHC-ATLAS 実験におけるトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日)，オンライン
12. Takashi Iida, 「(ポスター発表) Water-based liquid scintillator using fluorochemical surfactant」, 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2020 (2020 年 12 月 21-22 日)，オンライン
13. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 松本高興, 「ベクトルスピノル場を用いたテンソル場の行列正則化」, 日本物理学会第 2020 年秋季大会 (オンライン開催, 2020 年 9 月 14 日-17 日) (一般講演)
14. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 菅野聡, 松本高興, 「ファジー空間上のラプラス演算子」, 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン開催, 2021 年 3 月 12 日-15 日) (一般講演)
15. 渡辺展正, 「Partial deconfinement of matrix model with fundamental matters」, 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン開催, 2021 年 3 月 12 日-15 日) (一般講演)
16. H. Watanabe, G. Bergner, N. Bodendorfer, S. S. Funai, M. Hanada, E. Rinaldi, A. Schäfer, P. Vranas, and M. Knaggs, 「Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン開催, 2020 年 9 月 14 日-17 日) (一般講演)
17. 渡辺展正, 「Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice」, 素粒子若手オンライン研究会 (オンライン開催, 2020 年 8 月 26 日-28 日) (一般講演)
18. 渡辺展正, 「Partial deconfinement for some bosonic matrix models」, 熱場の量子論とその応用 2020 (オンライン開催, 2020 年 8 月 24 日-26 日) (一般講演)

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 渡辺展正, 「素粒子若手オンライン研究会」世話人 (2020 年 8 月 26 日 - 28 日) オンライン開催 参加登録者数: 241 人 (うち学生 161 人, スタッフ・PD 80 人) 世話人: 奥村傑, 阿部慶彦, 藤原素子, 渡辺展正

〈受賞〉

1. 飯田崇史: 東北大学金属材料研究所「第 8 回研究部共同利用・共同研究若手萌芽研究最優秀賞」, 2020 年 10 月 6 日

〈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. 石橋延幸: 日本物理学会誌編集委員長
2. 石橋延幸: 日本物理学会理事
3. 石橋延幸: PTEP 編集委員
4. 佐藤構二, 飯田崇史, 武内勇司: 高エネルギー物理学研究者会議事務局
代表: 佐藤構二, 飯田崇史 書記担当: 佐藤構二, 飯田崇史, 武内勇司 奨励賞担当: 飯田崇史

〈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 - 2020 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) (2020 年度)
2. 基盤研究 (C) 「ニュートリノ崩壊光子検出器較正用超低エネルギー光子パルス照射システムの開発」2016-2020 年度, 研究代表者: 吉田拓生
650 千円 (直接経費: 500 千円, 間接経費: 150 千円)(2020 年度)
3. 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
4,030 千円 (直接経費 3,100 千円, 間接経費 930 千円) (2020 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) (2020 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
910 千円 (直接経費 700 千円, 間接経費 210 千円)(2020 年度)
6. 科学研究費 基盤研究 (C) 「行列モデル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

1,040 千円 (直接経費 800 千円, 間接経費 240 千円)(2020 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 教授)

構成教員

金谷 和至 (数理物質系物理学域 特命教授)

三明 康郎 (数理物質系物理学域 特命教授)

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)

轟木 貴人 (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)

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

蔵増 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・延興放射線研究室 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・ブルックヘブン国立研究所の轟木貴人氏が、助教として2020年5月から着任した。海外教育研究ユニット招致PI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・ブルックヘブン国立研究所 (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) CERN-LHC, BNL-RHIC, J-PARC における高温・高密度クォーク核物質 QGP の研究

LHC-ALICE 実験における荷電ジェット生成の粒子多重度依存性の測定

LHC ALICE 実験において、陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 13$ TeV における荷電粒子のジェット測定を行い、その粒子多重度依存性を調べた。測定した横運動量領域は $5 < p_T < 140$ GeV/c である。ジェットの再構成には anti- k_T アルゴリズムを用い、ジェット分解能パラメータ R は 0.2-0.7、擬ラピディティ領域は $|\eta| < 0.9 - R$ の範囲で測定した。得られた実験データを LO, NLO 摂動 QCD 計算と比較した。その結果、NLO 摂動 QCD 計算と概ね良い一致が見られたが、低い横運動量領域では、NLO 摂動 QCD 計算でもデータを再現しないことが分かった (POWHEG+PYTHIA8, 図 33)。

またミニマム・バイアス事象、すなわち粒子多重度による事象選択を行わない条件での測定に加えて、今回新たに、前方方向の粒子検出器 (V0) を使った、粒子多重度毎のジェット収量を測定した。その結果、ジェットの収量は、高い粒子多重度事象ではミニマム・バイアス事象に比べて高く、低い粒子多重度事象では低くなることがわかった。ミニマム・バイアス事象に規格化されたジェット収量は、(規格化された) 生成荷電粒子数とともに増加し、その増加の仕方 (傾き) は 1 より大きいことがわかった。またこれらの結果は、ジェットの横運動量とジェット分解能にほとんど寄らないこともわかった (図 34)。今後、実験とデータとの詳細な比較により、多重パートン散乱 (Multi-Parton Interaction, MPI) の影響等、高粒子多重度事象でのジェット生成機構が明らかになることが期待される。本研究は、現在、ALICE 実験内での論文提案が承認され、投稿論文の内部レビューが進んでいる。

LHC-ALICE 実験における heavy flavour 生成の測定

チャームクォークやボトムクォークなどの重いクォークは衝突初期のハードな散乱で主に生成され、その生成は量子色力学 (QCD) により理解されてきた。そのため高エネルギー原子核衝突実験で重い

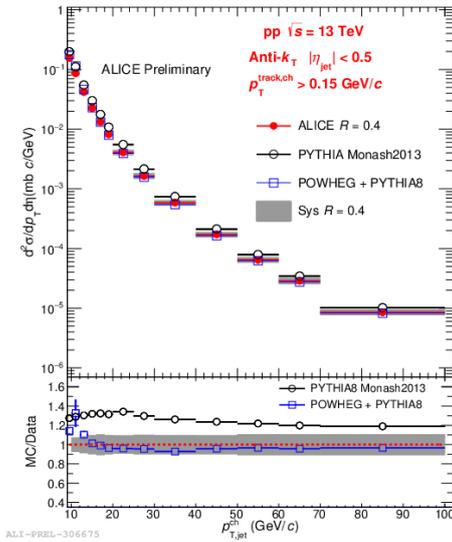


図 33 陽子・陽子 $\sqrt{s} = 13$ TeV 衝突における荷電ジェットの横運動量分布と理論モデル ($R=0.4$)。

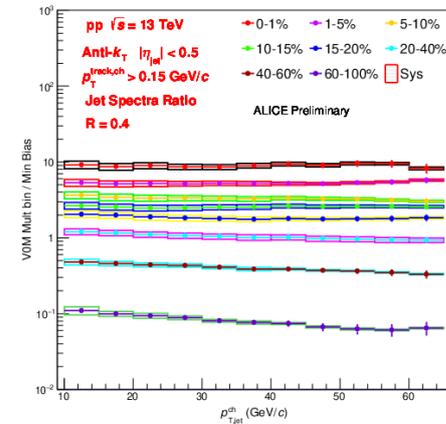


図 34 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 13$ TeV, $R=0.4$ における荷電ジェットの横運動量分布の比。分母はミニマム・バイアス事象のジェット収量、分子は粒子多重度毎のジェットの収量。

クォークを測定することにより、QGP 中でのパートン運動力学や性質が明らかにできると期待されている。また QCD の予言によるとパートンは QGP 中でカラー荷、質量などに依存してエネルギーを失うことが予言されており [3]、重いクォークを用いたエネルギー損失の研究は高温高密度下での QCD 検証という点においても重要な役割を果たす。我々のグループは D 中間子や B 中間子から崩壊してくる電子を測定することにより、その生成量が強く抑制されていることを発見し [4]、さらなるエネルギー損失機構の解明のために方位角異方性の強度 (v_2) の測定を行っている。

近年小さい衝突系である陽子-陽子衝突や、陽子-鉛衝突での高粒子多重度事象においても、リッジ構造や有限の v_2 など、重イオン衝突と同様の結果が得られている。これらの現象は未だ理論的に解明されておらず、小さい衝突系における高粒子多重度事象での粒子生成過程の解明が重要である。ALICE では、図 35 に示すように陽子-陽子 13 TeV において重いクォーク起源電子生成の粒子多重度依存性が測定された。この現象は高粒子多重度事象におけるパートン再結合モデル (color reconnection model [6]) により説明がなされており、さらなる理解のためにはパートンレベルでの理解が必要であると考えられている。そこで我々のグループでは、クォークレベルでの重クォーク生成の粒子多重度依存性の解明のために、陽子-陽子 13 TeV における重いクォーク起源ジェットの測定を行っている。また、同じ小さい衝突系である陽子-鉛 5.02 TeV において、重いクォーク起源電子をチャームクォーク起源の電子とボトムクォーク起源の電子に分けて測定することで質量依存性や異なる衝突系での比較を通して、より詳細な理解を目指している。一方で小さい衝突系で QGP が生成された場合、鉛-鉛衝突同様に重いクォークのエネルギー損失効果が実験的に測定されるはずである。しかしながら、我々のグループが行った陽子-鉛衝突における重いクォーク由来電子の生成量測定ではそのような効果は確認できなかった [5]。現在はより詳細な検証を行うために重いクォーク起源ジェットの測定を陽子-鉛衝突でも行っている。図 36 は重いクォーク起源ジェットの生成断面積をその広がり (R) を変えて測定し、その生成断

面積比を陽子-陽子衝突と陽子-鉛衝突で比較したものである。衝突において QGP が生成された場合、ジェットの広がりに変化が現れることが予想されているが、そのような効果は測定されなかった。この結果は ALICE 実験で承認され、現在投稿論文を準備中である。

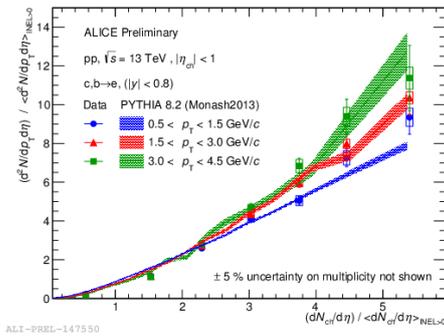


図 35 陽子-陽子衝突 13TeV における重いクォーク起源電子生成の粒子多重度依存性

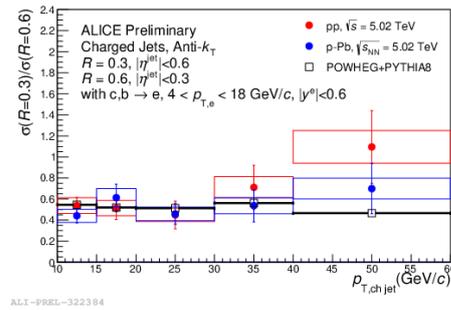


図 36 p-Pb 衝突 5.02TeV における重いクォーク起源のジェット生成の R 依存性

LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ 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

高エネルギーの陽子・陽子衝突、および原子核（陽子）・原子核衝突において、高い横運動量を持つハドロンの横運動量分布を測定することにより、初期パートンのハード散乱を起源に持つ粒子生成機構を調べることができる。一般にハード散乱によるハドロン生成は、摂動 QCD(pQCD) 計算によって良く記述できることが分かっている。摂動 QCD 計算では、(1) パarton分布関数 (PDF)、(2) 破砕関数 (FF)、(3) QCD 散乱断面積、の3項の寄与として分離できるが、このうち PDF, FF については非摂動論的效果が入るため理論計算が難しい。そのため、PDF, FF の決定には、様々な衝突エネルギーにおける実験データを用いて求める必要がある。

そこでハード散乱によるハドロン生成機構の理解するためには、ハドロンの破砕関数の実験的測定が不可欠となる。破砕関数の測定は、ジェットとハドロンの両方を同時に測定することで可能となる。ALICE 実験では、 $\sqrt{s} = 5.02\text{TeV}$ 陽子・陽子衝突における中性中間子 (π^0, η) の測定行なった。条件として、ジェットを要求した場合（ジェット内でのハドロン生成）と、ジェットを要求しない場合 [7](inclusive) のそれぞれについて測定を行なった (図 37)。その結果、 π^0/η 比は、ジェットの要求の有無で異なることが分かり、特に低い横運動量領域 (p_T) でのジェット内の π^0/η 比は、ジェットを要求しない場合より低くなり、高い p_T 領域では、両者はほぼ一致することが分かった。より精度良く π^0, η 中間子の破砕関数を決定するためには、高統計データを用いることが有効である。そこで我々のグループでは、電磁カロリメータ・トリガーかつ、高統計データセットを用いた測定を進めている。高統計データとして $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ を使い、 η/π^0 の測定をジェット内とジェットを要求しない場合で求め、検出器効果等の補正、系統誤差の決定を行なった。現在、最終結果に向けて解析が進行中である。

RHIC-STAR 実験での固定標的モード衝突における集団運動と 2 粒子 HBT 相関

第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) に先立って行った RHIC-STAR 実験における固定

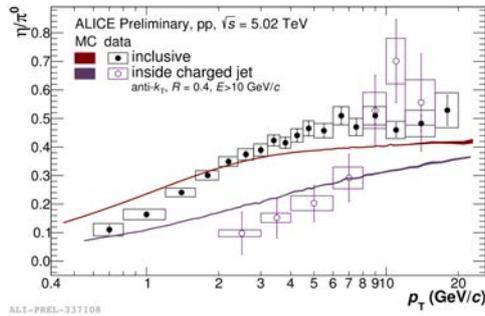


図 37 陽子・陽子 $\sqrt{s} = 5.02\text{TeV}$ における η/π^0 比 (ALICE)

標的実験のテスト的測定の結果を示す [8]。正味陽子の指向的方位角異方性 v_1 の傾きに観測された非単調な振る舞い、特に、20 GeV 付近の極小点は、高密度核物質の状態方程式の変化や、QCD 相図の 1 次相転移や臨界点の兆候である事が期待されている。1 核子数あたりに規格化した指向的方位角異方性 v_1 のラピディティーに対する傾きの衝突ビームエネルギー依存性を図 38 (左) に表している。重心系 3-5 GeV 領域での固定標的実験モードによる金原子核同士の測定を行い、これまで 7-40 GeV において行ってきた衝突実験モードによる測定をさらに低いエネルギー領域へ拡張し、その v_1 の傾きの増大を観測し、また核子数によるスケージング、つまりの軽い原子核の核子融合模型による生成過程を確認した。左図内に挿入した結果は、BES-I 実験における陽子と重陽子の v_1 の傾きを表す [9]。図 38 (右) には、2 粒子 HBT 相関解析により得られた 3 次元粒子発生源の R_{out} (奥行き) と R_{side} (幅) の差分を表し、これは粒子放出持続時間を意味する。20GeV にある持続時間の極大値は、同じく 1 次相転移や臨界点の兆候である事が期待される。

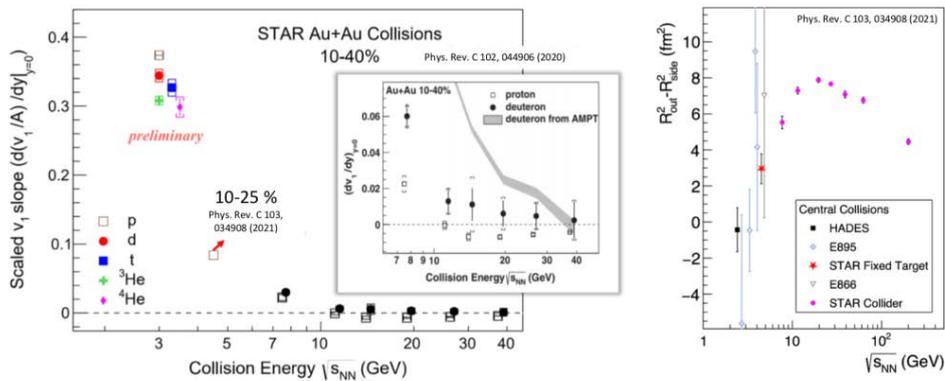


図 38 指向的方位角異方性 v_1 の傾きの衝突ビームエネルギー依存性 (左)、2 粒子 HBT 相関解析による粒子発生源の粒子放出持続時間の衝突ビームエネルギー依存性 (右)

ビームエネルギー走査実験による臨界点探索

第 1 期ビームエネルギー走査実験 (BES-I 実験) の期間に収集した実験データを用いた、正味陽子数分布の高次揺らぎに関する最終結果を公表した。電荷数やバリオン数などの保存量の揺らぎを観測するこ

とにより、QCD 相図の臨界点付近で期待される高温・高密度衝突系の相関長の急激な変化や相転移などによる状態の変化による信号を探索した。特に、高次揺らぎがその変化に敏感であると期待されるが、図 39 (右) に示したように、正味陽子数分布の尖度を表す 4 次キュムランの衝突エネルギーに対する非単調な依存性を観測した [10]。この振る舞いは、臨界点付近で期待される極小・極大を持つ振動パターンに酷似しており、現在収集中の第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) による高統計、及び系統的な測定によりその傾向を確認する予定である。

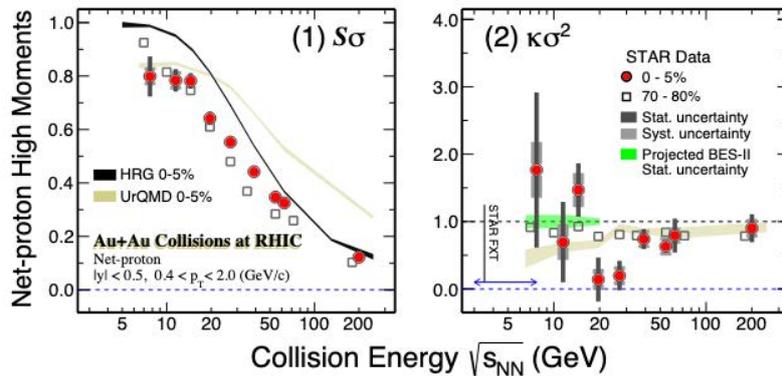


図 39 正味陽子数分布の 3 次揺らぎの衝突ビームエネルギー依存性 (左)、4 次揺らぎの衝突ビームエネルギー依存性 (右)

陽子・陽子衝突における正味陽子数分布の高次揺らぎ

QCD 相構造を実験的に理解するため、RHIC-STAR 実験では第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) が行われており、近年、Au+Au 衝突で中心衝突における正味陽子数分布の高次揺らぎの結果が注目されている。特に 4 次揺らぎの衝突エネルギーに対する非単調な振る舞いは、相転移付近における QCD 臨界点のシグナルを示唆する理論予測と定性的に一致する [10]。さらに、200 GeV における Au+Au 衝突で観測された負の 6 次揺らぎは、格子 QCD で予測されている低 μ_B 領域の滑らかなクロスオーバー相転移と関連している可能性がある。本研究では、Au+Au 衝突に対する物理的なベースラインを決定するため、200 GeV における $p+p$ 衝突で正味陽子数分布のキュムラントを測定し、2012 年のデータを用い、 n 次のキュムラント C_n ($n \leq 6$) における粒子多重度依存性を測定し、キュムラント比 C_4/C_2 、 C_5/C_1 、 C_6/C_2 を Au+Au 衝突と比較した結果を図 40 に示した。2 つのデータセットの比較結果では、 $p+p$ 衝突の平均値が Au+Au 衝突の粒子多重度依存性と滑らかにつながる。さらに C_5/C_1 と C_6/C_2 において $p+p$ 衝突が高い粒子多重度においても正の値を示していることが Au+Au 衝突の中心衝突で見られる負の値と対称的である。

高次揺らぎに対するパイラップ補正

RHIC の第 1 期ビームエネルギー走査実験 (BES-I 実験) で測定された正味陽子数分布の 4 次キュムラント比は $7.7 \leq \sqrt{s_{NN}} < 20$ GeV で非単調的に振舞っており、QCD 臨界点のシグナルではないかと言われている [10]。現在、 $\sqrt{s_{NN}} \leq 7.7$ GeV における固定標の実験が進行中であり、臨界点の存在領域にさらなる制限がかけられることが期待される。一方、固定標的型実験において問題になるのがパイ

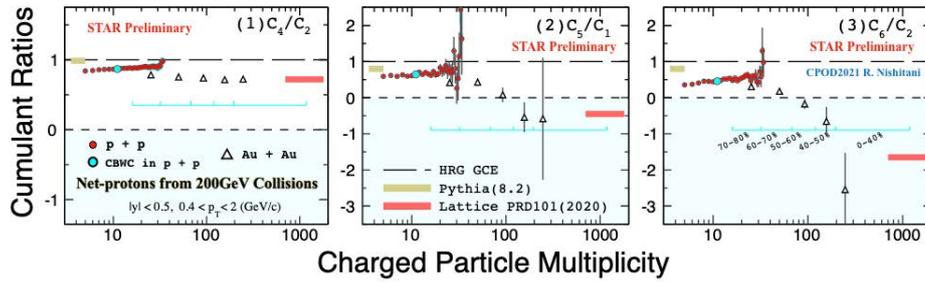


図 40 200 GeV $p+p$ 衝突と Au+Au 衝突における正味陽子数のキュムラント比 C_4/C_2 、 C_5/C_1 、 C_6/C_2 の粒子多重度依存性

ルアップ事象である。衝突型実験と比較して重イオンの衝突頻度が桁違いに高く、複数の衝突事象が重なって測定されてしまう確率が、無視できないほど大きくなる。

我々はパイルアップ事象に対する高次キュムラントの補正手法を新たに考案した [13]。パイルアップ事象を含まない真の粒子多重度分布を決定することにより、低粒子多重度事象から再帰的に補正を行う。図 41 は数値シミュレーションにおける補正前後のキュムラントを中心衝突度の関数として比較したものである。パイルアップ事象により、中心衝突においてキュムラントの値が増大することがわかるが、我々が考案した手法を適用することで、真のキュムラントへ補正することが可能である。

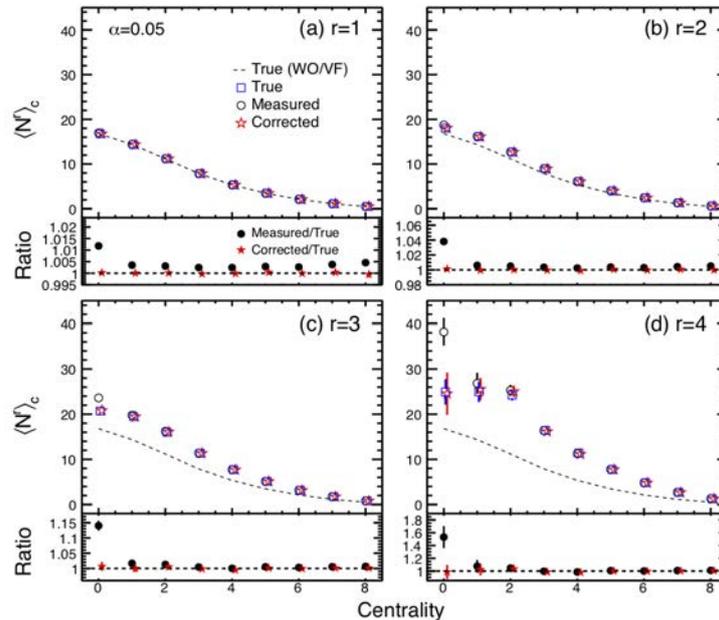


図 41 数値シミュレーションにおけるキュムラントの中心衝突度依存性。青四角がパイルアップ事象を含まない結果、黒丸がパイルアップ事象を含む結果である。黒丸に補正を適用したものが赤星である。

三粒子および Ω 粒子のグローバル偏極

原子核衝突におけるグローバル偏極は、初期角運動量と生成粒子のスピンとのスピン軌道相互作用に

よって生じる。パリティ非保存の弱い相互作用を介して崩壊するハイペロン粒子を用いることで偏極測定が可能となる。これまでに STAR 実験では Λ 粒子のグローバル偏極が観測され、原子核衝突における高速渦の生成が判明した。 Λ 粒子の偏極のエネルギー依存性は流体モデルや輸送計算などで再現できる一方、局所渦など理論モデルでは説明できない実験結果が複数報告されている。現在、実験理論双方での議論が続いており、これら疑問を解明するためにも異なる粒子種、特に異なるスピンをもつ粒子の偏極データが期待されている。本研究では、STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金原子核衝突における Ξ (スピン 1/2) と Ω (スピン 3/2) のグローバル偏極測定を行った。(図 42)

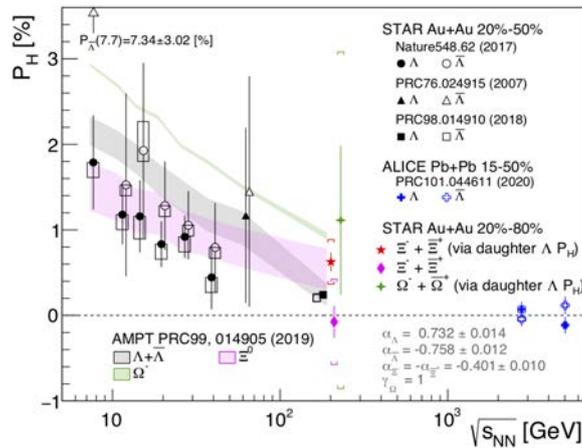


図 42 グローバル偏極の衝突エネルギー依存性。バンド線は輸送モデルの計算である。

Ξ 粒子の偏極測定には、 Ξ から崩壊する Λ の方位角分布を調べる方法と崩壊 Λ 自身の偏極を調べる方法の2つを用いた。これら独立した2つの結果を組みわせると、 Ξ 粒子の偏極 P_{Ξ} は $\langle P_{\Xi} \rangle \approx 0.47 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.23(\text{syst.})\%$ と測定された。 2σ 程度の有意性で正の偏極であることが判明し、原子核衝突における渦描像を支持する結果となった。本結果は、 Ξ 粒子が Λ 粒子よりも大きな偏極であることを示唆しており、輸送モデル [16] とも定性的に一致している。スピン 3/2 の Ω 粒子についても崩壊 Λ 粒子の偏極から測定し、 $P_{\Omega} = 1.11 \pm 0.87(\text{stat.}) \pm 1.97(\text{syst.})\%$ となった。ただし、崩壊 Λ の偏極を Ω 粒子偏極に変換する際に、未測定の崩壊パラメータ γ_{Ω} に起因する不確実性が残る（経験的に $\gamma_{\Omega} \approx \pm 1$ と推測され、本研究では $\gamma = +1$ を仮定）。現状の結果では有意な偏極が見られていないが、今後の測定では γ_{Ω} の制約が可能となる。これらの結果は Physical Review Letters へ出版された [17]。今後は高統計データの解析により、より高精度な Ξ および Ω 粒子の偏極を行う。

固定標的型金 + 金衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV における Λ 粒子のグローバル偏極

原子核衝突実験において、非中心衝突事象では2つの原子核によって運ばれる初期の軌道角運動量を保存するため、生成される系は回転運動を示す。これにより生成粒子はスピン軌道相互作用によって偏極されるはずである。これまでに RHIC-STAR 実験では $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ から 200 GeV にかけて様々なエネルギーで測定が行われた [18, 14, 15]。これらの測定によりグローバル偏極は衝突エネルギーが低くなるとともに値が大きくなる傾向が観測された。一方で理論計算によると系の軌道角運動量方向の角速度はエネルギーが低くなるとともに大きくなるが、ある値を境に急激に小さくなると報告されている

[19]。そのため低エネルギー領域における詳細なグローバル偏極の測定が必要とされている。そこで RHIC-STAR 実験では $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV において Λ 粒子のグローバル偏極の測定がされた。図 43 は Λ 粒子のグローバル偏極の衝突依存性である。その結果有限なグローバル偏極のシグナルが観測された。また衝突エネルギーに対しては $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV に関してもこれまでと同様に、エネルギーの低下とともに値が上がり続ける傾向が観測された。グローバル偏極は磁場などの寄与によって粒子と反粒子間で差が生じると考えられている。そこで高統計なデータを用いて反ラムダ粒子のグローバル偏極を測定し、ラムダ粒子との差から磁場などの寄与を見積もることが期待される。また現在 STAR 実験では第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) が行われており、アップグレードされた検出器を用いて低いエネルギーにおいて高統計なデータが取得されている。これにより低い衝突エネルギーの広範囲領域における詳細な測定が期待されている。

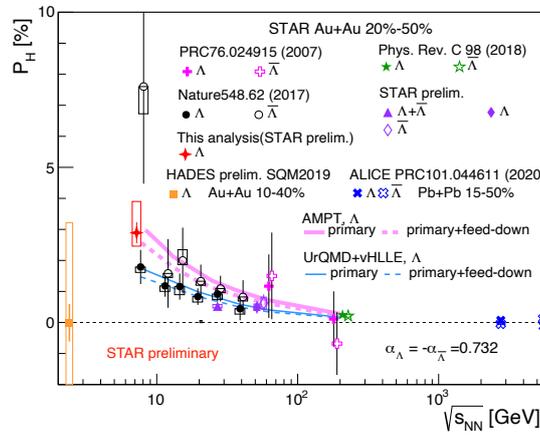


図 43 固定標的実験を含む Λ 粒子の偏極の衝突エネルギー依存性

RHIC-STAR 実験におけるバリオン相関 Λ - Λ と Ξ - Ξ 相関関数測定

バリオン相関については、未だ実験的にも理論的にも理解されていないことが多い。ハイペロン-ハイペロン (Y - Y) の相関を測定することは H -dibaryon をはじめとするエキゾチックハドロンを知ることを目的とした研究において、重要度の高い測定である。バリオン間束縛状態を調べるにおいて、2 粒子相関法を用いた femtoscopy という測定方法が用いられる。測定された相関関数に Ledniky-Lyuboshitz フィット [20] を行うことで散乱パラメータ等を求め、束縛状態の有無を探る。 Λ - Λ 相関関数に関しては、STAR 実験で 2015 年に発表された先行研究があるが、統計誤差が大きい [21]。 Ξ 粒子に関する束縛状態については、未だ理論的に研究途上であり、attractive な相関が予想されているが、束縛状態を作るには十分に強くはないのではとされている [22, 23]。

今回、先行研究と比較しておよそ 4 倍の高統計データでの測定が可能になった。また、かつて Ξ - Ξ 相関関数が測定されたことはなく、今回が世界初測定となった。図 44 は Λ - Λ 相関関数である。スムーズな anti-correlation が観測された。STAR 実験の先行研究結果と系統誤差の範囲で一致した結果が得られた。高い相対運動量 Q_{inv} において residual な成分があることがわかった。次に、図 45 が Ξ - Ξ 相関関数である。明瞭な anti-correlation が測定された。これらの結果は、今後 feed-down 補正、運動量分解能の補正等を施し、最終的な相関の大きさを求める必要がある。

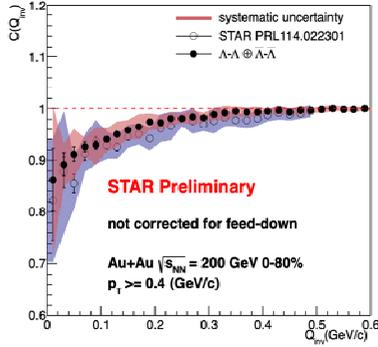


図 44 Λ 粒子の相関関数

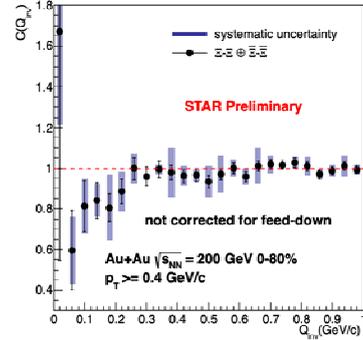


図 45 Ξ 粒子の相関関数

Charged particle flow and identical pions HBT in $\sqrt{s_{NN}} = 27.0$ GeV Au+Au collisions at RHIC-STAR experiment

Femtoscopic/HBT studies of identical pions provides a direct tool to measure the space-time dimensional information of the homogeneity region of the fireball, produced in the heavy-ion collisions. In the femtoscopic studies, generally two particle correlation functions are studied to get various source parameters in 1-dimension and 3-dimensions depending on the constructed two particle correlation function. The main source of correlations between identical pion-pion pairs are Bose-Einstein correlations and Coulomb correlation (needed to correct for it to get real parameters). The study of correlation function w.r.t. different bins of Ψ_1 (first order event plane angle) provides various odd source parameters using which the tilt angle of the source can be extracted. In the current pion HBT studies at 27 GeV, the correlation functions has been studied in 1-dimension (Q_{inv}) and 3-dimension ($q_{out}, q_{side}, q_{long}$) for different centrality, k_T and Ψ_1 bins after applying various track and pair cuts. To get the various source parameter, fitting is being done.

The second part of the study is related to charged particle flow. In this study, $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ correlation functions are being studied for different track transverse momentum (p_{T_1}, p_{T_2}) ranges. The fitting is being done to extract various flow coefficient.

RHIC での小さい衝突系における方位角異方性 v_n の測定

高エネルギー重イオン衝突における QGP 流体生成の証拠の一つが方位角異方性 v_n の観測であり、今後の課題として流体力学計算の適用限界や多重パートン相互作用の評価が挙げられる。最近の RHIC-PHENIX 実験での p +Au、 d +Au、及び ^3He +Au 衝突における測定では、 v_n が衝突初期形状に対するスケールリングや流体力学計算との一致を示し、荷電粒子多重度 $dN_{ch}/d\eta = 13$ 程度の小さい系での流体生成が示唆された [24]。現在小さい系での v_n の更なる理解を目指した測定が、RHIC 加速器の PHENIX と STAR 両実験にて進められている。

図 46(左) に p +Au 衝突における中心ラピディティ領域での v_2 の最新の測定結果を示す。粒子多重度が大きく、より流体成分が強い後方領域を利用した PHENIX の測定 (図中 Nat. Phys.) [24] は横運動

量 $p_T = 2 \text{ GeV}/c$ で $v_2 = 0.1$ 程度の値を示す。一方、粒子多重度が小さくジェットの影響がより大きい中心領域や前方領域を使用した STAR や PHENIX の測定 (図中 3×2PC) は $p_T = 2 \text{ GeV}/c$ で $v_2 = 0.17$ 程度のより大きい値を示し、 v_2 の値が測定方法により 70% 程度の幅を持つことが確認された。次に、図 46(右) に $p+\text{Au}$ 衝突における中心ラピディティ領域での v_3 の最新の測定結果を示す。後方領域を利用した PHENIX の測定や STAR の測定による v_3 は正の値を示すが、前方領域を含めた PHENIX 測定では虚数の値を示すことが判明した。これは前方領域でのジェットの寄与が流体的な発展を圧倒し、既存の v_n 測定手法の適用限界を超えたためと考えられる。これらの測定から、小さい系における流体発展由来の v_n の信号は小さく、ジェット等の背景事象に測定が大きな影響を受けることが判明した。今後小さい系における v_n の統一的な理解を目指すために、測定におけるジェット成分の見積もりとその分離手法の確立が重要である。

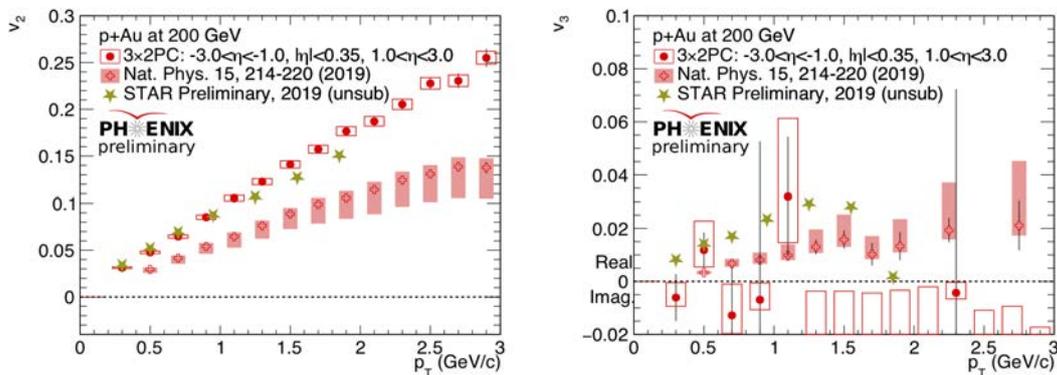


図 46 200GeV 陽子+金原子核衝突における荷電粒子 v_2 及び v_3 の横運動量依存性

J-PARC E16 実験に向けた Multi-gap Resistive Plate Chamber の研究開発

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 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC)の導入を検討している。

E16 実験の実験環境から高イベントレート及び 2nd level trigger の待ち時間に対応できるデータ収集系が要求されている。そのため、今回の Run0 実験では FPGA を用いた Tapped Delay Line 方式の TDC を採用した。この TDC を利用したデータ収集系では MRPC の信号の leading edge と trailing edge の時刻情報を測定することができ、leading edge と trailing edge の時間差 (Time Over Threshold) により信号の波高を分析し、解析に利用している。今回の Run0a 実験では LEPS 実験用に関与された MRPC を利用して E16 実験環境下における動作試験および時間分解能評価を行った。また、2021 年 11 月に E16 実験用に大きさ等を最適化した MRPC を SPring-8 にて製作した。SPring-8 の LEPS 実験施設のビームラインを利用して製作した MRPC の時間分解能と検出効率の性能評価試験を行い、結果として $79 \pm 1 \text{ ps}$ の時間分解能を得ることができた (図 47)。

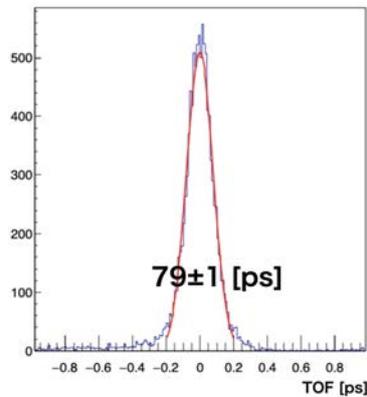


図 47 製作した MRPC の時間分解能評価

ALICE 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 ($3.4 < \eta < 5.8$) に電磁カロリメータおよびハドロンカロリメータを新たに設置し (図 48)、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、(1) 未だ実験的証拠が得られていない、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、(2) 小さな x 領域の原子核内グルーオン・分布関数の世界最高精度測定、を主な目的としている。2025-2027 年の長期 LHC 停止期間中に本検出器をインストールし、2027 年後半に (LHC Run-4) に最初の物理測定を行う計画である。

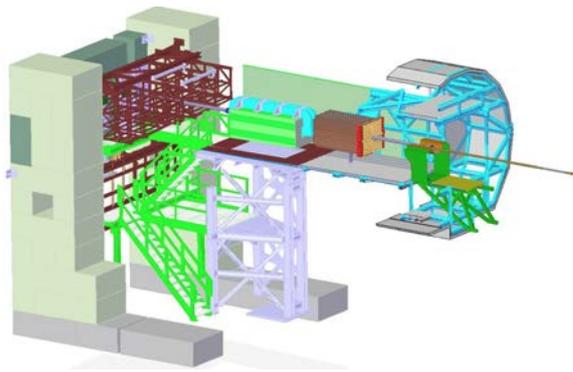


図 48 FoCal 検出器の外観。中央部に見える直方体状のものが FoCal。右側に衝突点がある。

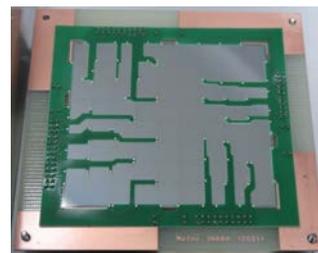


図 49 ELPH テストビーム実験に用いた p 型シリコンセンサー (8x9 タイプ)

以下、2020 年度の活動について報告する。まず昨年度策定した FoCal 実験提案書 (Letter of Intent) [25] の審査と承認が行われた。最初に ALICE 実験内での審査が行われ、承認された (4 月)。その後、本提案は LHCC (Large Hadron Collider Committee) で審査され、承認された (6 月)。LHCC の承認を受けて、FoCal 実験は TDR (Technical Design Report) 策定に向けて最終デザインを決定する段階

に移行した。

日本グループは、FoCal の主要部である「FoCal-E pad」の主担当であり、本プロジェクトを主導している。FoCal-E pad に用いる p 型シリコンセンサとその読み出し方法について議論するため、国際研究集会「Mini-workshop on ALICE FoCal and continuous readout electronics」を開催した(4月)。また p 型シリコンセンサを新たに製作し(図 49)、赤外光レーザーとソースメーターを使用し、動的特性や I-V 特性等を測定した。2月、東北大学・電子光理学研究センターにおいて、本シリコンセンサーに電子ビームを照射し、評価実験を行った。その結果、最小電離粒子 MIP のシグナルが確認された。その後、宇宙線を使ったテストを行い、MIP シグナルを測定し、所定の性能を有していることを確認した。中條は FoCal プロジェクトを代表して、ALICE 実験内で現状を報告した(3月)。また初期の FoCal 試作機について、その結果を論文にまとめ、Nucl. Inst. and Methods A 誌に投稿し、掲載された [26]。

理化学研究所が FoCal プロジェクト推進のため、ALICE アソシエイトメンバーとして再登録することが承認された(11月)。また佐賀大学も ALICE フルメンバーとして加入し(3月)、FoCal 後段の読み出し開発に参加する予定である。

ALICE FoCal Simulation

The initial simulations for the FoCal detector performance were done with an ideal geometrical setup and published in the LoI [25]. The implementation of the realistic geometry and the impact on the physics performance is crucial for the success of the FoCal project. One of the main concern is arising from the dead space between the silicon sensors which are necessary to include the guard rings around each main sensor. There are also additional mechanical constraints which has to be included in the real detector geometry. Fig. 50 shows the signal to background from the idealistic simulation from $p_T > 2 \text{ GeV}/c$. The inclusion of the realistic model slightly reduces the signal to background ratios, shown in Fig. 51. From these results we can conclude that the modifications in the geometrical setup from its ideal configuration is not changing the performance of the detector and we can achieve the physics results we seek.

In addition to the full geometry simulation, we also constructed a standalone mode simulation based on GEANT4. The standalone simulation is constructed in the same specifications as the final prototype testbeam planned in 2021 September-October, see in Fig. 52. The detector would consist in total of 18 PAD layers, 2 PIX layers and a capillary tube HCal detector behind it. The advantage of the standalone simulation is the quick response to any geometrical or mechanical constraints for the upcoming testbeam. This simulation would also allow us quickly evaluate the performance of the final prototype.

ELPH testbeam for ALICE FoCal

The first p-type silicon sensors were tested at the ELPH (Research Center for Electron Photon Science) beam facility in Sendai at Tohoku University. The facility provided positron beam at 800 MeV energy. We had few sensors to test, namely (1) 2x2 sensor including a small calibration cell in one PAD, (2) the full size 9x8 sensor and (3) monitoring photo-diode. In our case, we used the SRS APV25 readout unit for the (1) and (2) options, and a amplifier and CAEN digitizer for the

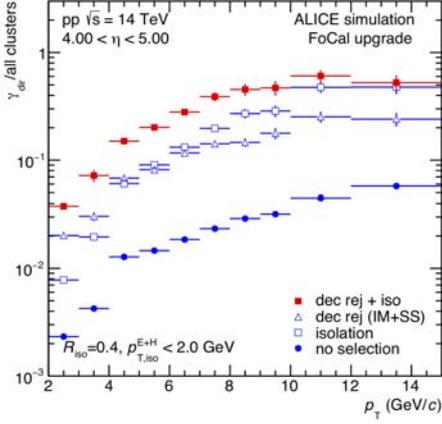


Figure 50 The signal to background ratio in the ideal simulation for the FoCal geometry.

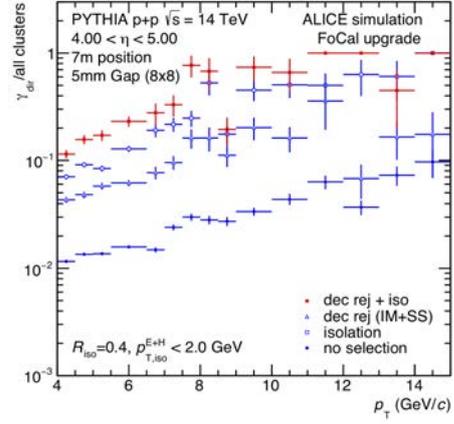


Figure 51 The same performance with the realistic FoCal geometry.

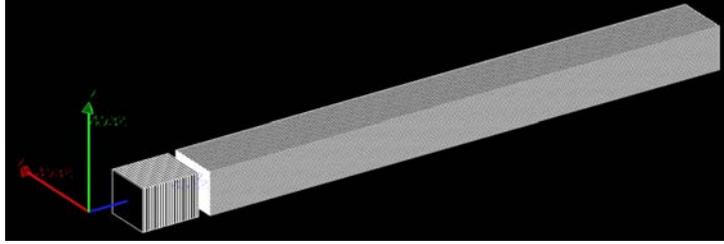


Figure 52 The Geant4 setup of the final FoCal prototype detector geometry.

(3) case.

The first test was to scan the silicon response as a function of the applied bias voltage. The peaks from the minimum ionizing particles (MIPs) were fitted with a Landau function and the most probable value (mpv) and the sigmas are shown in Fig. 53. We can observe a flat plateau between 200V and 800V and at lower and higher voltages the observation of the MIP peak is affected by the noise levels. We also tested the final design of the full sensor, containing 9x8 PAD for the final detector, however, the APV25 readout was connected only to quarter of the sensor. The results in Fig. 54 show the separation of the pedestal and MIP peaks in each PADs separately.

Lastly, we also tested the monitor PD in the beam with a CAEN readout unit. The amplifier and the shaper were located 50 and 100 cm away from the silicon sensor. This amplified and shaped response was then read out by the CAEN unit as shown for almost 600k events in Fig. 55. Due to the distance between the amplifier and the sensor, the readout is largely affected by the noise picked up in the longer lines. Therefore, we can clearly see the signal, however, the sigma (or spread) of the signal is too large in order to constraint MIP peak position.

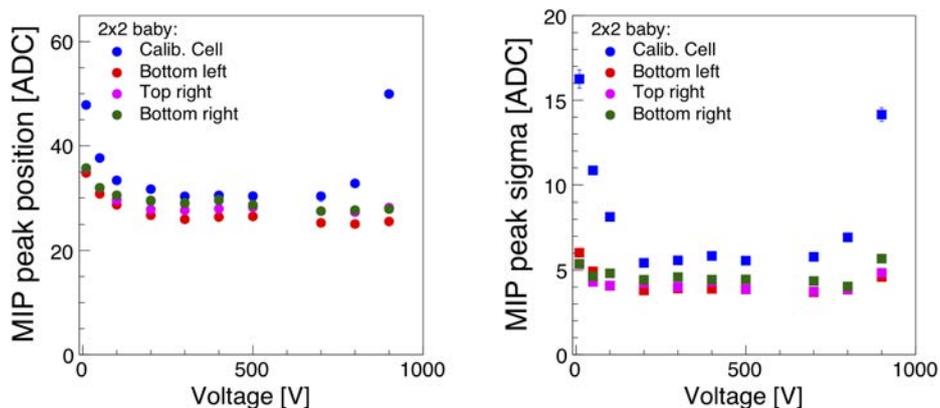


図 53 The voltage scan results on the different pads for the 2x2 baby Silicon sensor. The MIP peaks were fitted with a Landau function and the left panels show the MPV values while the right panels shows the sigma values in a function of the applied bias voltage.

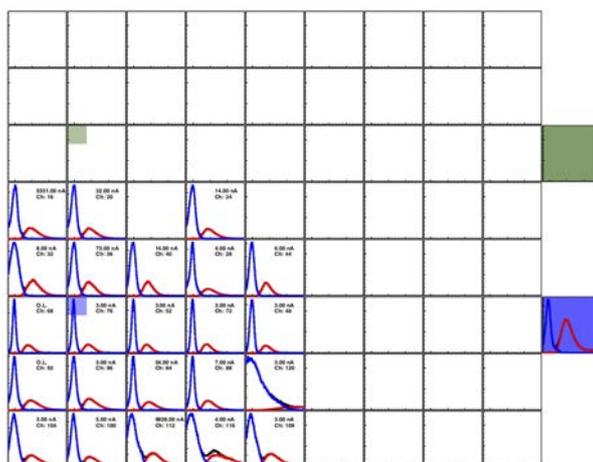


図 54 The ADC distributions of the full sensor readout in the geometrical representation of the sensor. The blue line shows the pedestal distribution, the red line is the MIP response of the sensor.

(2) 理化学研究所 RIBF、筑波大加速器施設における宇宙元素合成の研究

稀少 RI リングでの Ni 領域の質量測定

自然界に存在する元素のうち、鉄より重い元素の約半数の元素は、r プロセスと呼ばれる早い中性子捕獲過程で生成されたと考えられている。しかしながら、r プロセスは、その起源などまだ未解明の点が多い。我々は、r プロセス解明を目指し、r プロセスを決める物理量の中で質量に注目し、理化学研究所の稀少 RI リング (R3) において、r プロセスに関与すると考えられている中性子過剰不安定核の質量測定に取り組んでいる。2020 年度は、R3 のキッカー磁石のアップグレードを行い、マシンスタディを行った。

これまでの R3 のキッカー磁石の磁場波形は図 56(a) の黒線に示したように正弦波に近い形をしてお

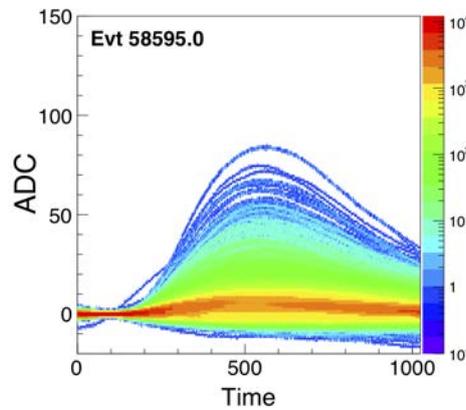


図 55 The results of the monitor PD with the CAEN readout unit in the function of the timestamps.

り、入射する粒子のタイミングによりキック量が変わるという問題があった。以前、 ^{78}Kr ビームで確認した際の結果が図 56(a) の黒丸で示されている。今回は、3 台あるユニットにキャパシターを付け波形をずらして重ねることにより、フラットトップを作ることを試みた。キッカー磁石に印加する電流波形から予想したキッカー磁石の磁場波形が図 56(b) の青線で示されている。この磁場波形を確かめるためにマシスタディを行った。 ^{238}U の一次ビームから、約 165MeV/u の ^{75}Ga を生成し、R3 に入射した。キッカー磁石直後のプラスティックシンチレーターで ^{75}Ga のイベントを測定した。図 56(b) にキッカー磁石印加のトリガーのタイミングを変えた時のイベント量を示した (青丸)。イベント量は、500ns から 600ns でほぼ一定を示し、約 100ns のフラットトップが形成できたことが確認できた。今後は、このキッカー磁石波形を使って質量測定を行う予定である。

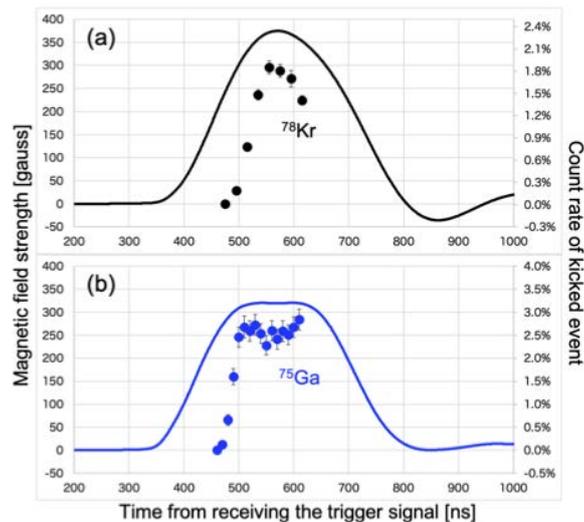


図 56 (a) これまでのキッカー磁石の磁場波形 (黒線) と生成量の測定結果。(b) 今回のキッカー磁石の磁場波形 (青線) と生成量の測定結果

回転磁場による不安定核 ^{29}P の核磁気モーメントの符号の測定

我々は、不安定核の核磁気モーメントの符号の測定のための回転磁場を発生させるための高周波系を開発してきた [27]。2020 年度は、不安定核 ^{29}P の核磁気モーメントの符号を決定した。我々のシステムでは、回転磁場を発生させるために交差コイルを使うが、交差コイル間に位相差をつけるために、二つの高周波系の間ケーブルディレイを入れている。実験は、筑波大学 6 MV タンデム加速器で行った。12MeV まで加速した偏極陽子ビームを Si 標的に照射し、偏極した ^{29}P を生成した。静磁場の方向は下向きで、1.647kG に設定し、高周波は、この磁場のラーモア周波数を含む、 $3.10 \pm 0.05\text{MHz}$ に設定した。この周波数は、320ns の周期に相当する。オフラインの測定で、ケーブルディレイを 80ns にしたときに、右回りの回転磁場が生成することがわかっている。測定された β -NMR エフェクトのケーブルディレイ依存性を図 57 に示した。この図から、50ns ディレイを入れたときに、 β -NMR エフェクトが消えたことがわかる。核磁気モーメントの符号が正であれば、静磁場が下向きで右回りの回転磁場で NMR エフェクトが消えるので、今回の結果から、 ^{29}P の核磁気モーメントの符号は正であることがわかった。正の符号は、単一粒子モデルからの予測と一致している。今後は、 ^{25}Al など、核磁気モーメントの絶対値は測定されているが、符号が決定されていない不安定核の核磁気モーメントの符号決定を行っていく。

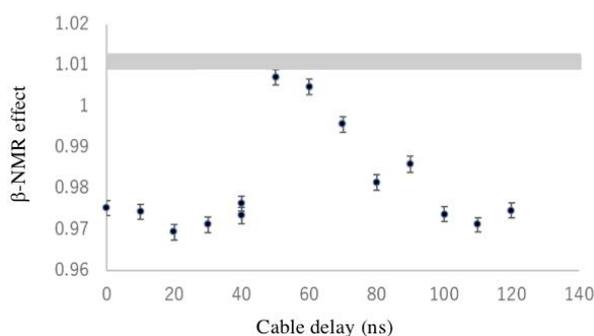


図 57 ^{29}P に対する β -NMR エフェクトのケーブルディレイ依存性。灰色のハッチは、高周波オフでのエフェクトを示す。

稀少 RI リングで用いる位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の開発

稀少 RI リングを利用した不安定核の精密質量測定にとって、輸送するビームの質 (位置や角度等) を最適化することは、リングへの入射および出射効率だけでなく質量精度 (運動量の補正に位置情報を使う) の向上につながる。現在、炭素薄膜と 2 枚の Micro Channel Plate (MCP) によって構成された位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の開発を進めている。図 58 に BE-MCP90 の構造を示す。イオンビームが炭素薄膜を通過する時に発生する二次電子を、磁場 (B) と電場 (E) によって前後の MCP へと輸送し検出する仕組みである。MCP は薄膜に対して 90 度傾いている。BE-MCP90 は、イオンビームが薄膜へ入射する位置 (x 軸方向) と前後に発生した二次電子が MCP に到達するまでの飛行時間の差に相関があることを利用する。BE-MCP90 は、物質厚が小さい (薄膜のみ) ことが特徴であり、我々のグループが開発した飛行時間検出器 (BE-MCP) [28] を応用し位置敏感型に改良したものである。位置分解能が磁場に依存することから、2020 年度は磁場を変化させた時の性能評価を行った。実験は放射線医学総合研究所の HIMAC で行った。核子あたり 200 MeV の Kr ビームを BE-MCP90 に

照射し、磁場を 36, 49, 60 Gauss と変えて測定を行った。測定からいずれの磁場においても位置分解能は σ 1.7 mm だった。これは位置分解能が MCP の時間分解能や磁場の不均一性に起因しているためと予想される。今後は、これらをシミュレーション等を用いて調べるとともに、MCP の検出範囲を広げた評価を行う予定である。

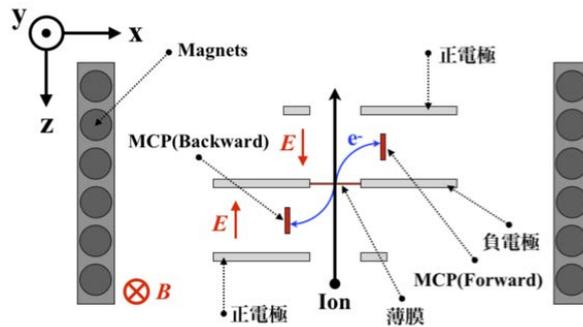


図 58 位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の構造。

^{30}P の核磁気モーメント測定に向けた最適条件の検討

核磁気モーメント (μ) は原子核の核構造を反映した物理量であるため、これを実験的に測定することは大変重要である。特に、鏡映核の μ を測定することが出来ると軌道角運動量期待値とスピン角運動量期待値を計算することが可能である。我々は自己鏡映核であり実験的に測定されていない ^{30}P の μ を、 β 線放出の非対称性を利用した核磁気共鳴法 (β -NMR 法) により測定しようと考えている。本研究では μ が測定できていない ^{30}P の代わりに、原子番号が同じで標的中の超微細相互作用が同じだと考えられ、既に μ が測定できている ^{29}P を用いて、ビームエネルギーと標的について最適条件の検討を行った。

まず、 $p + \text{nat. Si}$ 反応による生成量のビームエネルギー依存性を解析した。ビームエネルギーを 6、8、10、12 MeV と変化させたところ、ビームエネルギーの上昇に伴って ^{29}P の生成量は増加した。次に、 ^{29}P の核スピン偏極に比例する β -NMR エフェクトのビームエネルギー依存性を確認した。それぞれの結果を示したのが図 59 で、横軸がビームエネルギー、左縦軸が生成量、右縦軸が β -NMR エフェクトである。図 59 では β -NMR エフェクトの大きなビームエネルギー依存性が無いことが分かる。以上から、 ^{30}P の μ 測定は 12 MeV のビームエネルギーで行うことが最適であると結論付けた。最後に、 β -NMR エフェクトの標的依存性を確認した。 nat. Si を含む標的として、半導体 Si、 SiO_2 、 SiC の 3 つを使用したところ、半導体 Si とその他の標的の間で有意な β -NMR エフェクトの大きさの差がみられた。この結果から、ビーム標的としては半導体 Si を使用するのが最適だと結論付けた。 SiO_2 は切り出し面が (2-1-10) と (0001) の 2 種類を用いて測定を行った。これは標的内の対称性によって超微細相互作用が変わりうるからであり、今後は標的内の対称性を検討したうえで測定を行う。

マイクロビームを用いた透過 ERDA による水素深さ分布測定法の開発

筑波大学 6 MV タンデム加速器に設置したマイクロビーム分析装置において、8 MeV の ^4He ビームを数 μm に収束させて、透過型の弾性反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis : ERDA) を用いた水素分析法の開発を進めている。7-10 MeV の ^4He イオン入射による水素原子核の反

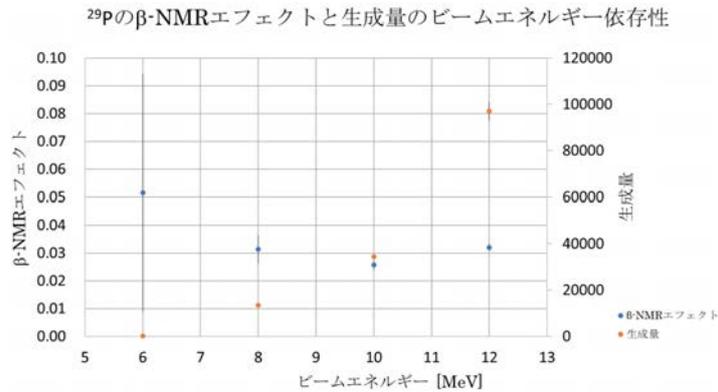


図 59 ^{29}P の β -NMR エフェクトと生成量のビームエネルギー依存性。

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 3 次元イメージング測定が可能となる。アルミニウム材料中の水素を想定して、表 5 に示すような 3 つの水素模擬試料 (S-1, S-2, S-3) を用意した。PPS [polyphenylene sulde ($\text{C}_6\text{H}_4\text{S}$) $_n$] フィルムの厚さは、 $1.35 \pm 0.05 \mu\text{m}$ であった。また、ビーム前方方向に設置した半導体検出器のアクセプタンスは 4.1° であった。測定結果と TRIM による理論計算結果を図 60 に示す。この結果より、8 MeV の ^4He ビームを用いた透過 ERDA 法による、アルミニウム材料中の水素の深さ方向測定の分解能は、 $1.5 - 4.9 \mu\text{m}$ となった [29]。

表 5 水素含有アルミニウムの模擬試料

Sample name and structure	Peak energy (MeV)	FWHM (MeV)	FWHM (μm)	Δz (μm)
S-1: PPS/Al(50 μm)	4.25	0.130	1.81	1.59
S-2: Al(10 μm)/PPS/Al(50 μm)	3.31	0.160	1.78	1.56
S-3: Al(20 μm)/PPS/Al(50 μm)	2.14	0.202	1.68	1.45

加速器質量分析法を用いた放射性ヨウ素 129 測定におけるバックグラウンド

長半減期放射性ヨウ素 129 (^{129}I : 半減期 1,570 万年) は、人為起源および自然起源により地球環境中に極微量に存在している核種である。ヨウ素同位体比 ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$) の測定は、地殻、大気、海洋などの様々な研究分野において利用されている。筑波大学加速器質量分析装置 (AMS) では、ヨウ化銀 (AgI) のターゲットから、スパッタリングで I^- を引き出し、5 MV で I^{5+} を 30 MeV まで加速している。同位体比の低い試料を測定する場合、バックグラウンドを如何に下げることが重要となる。筑波大学 AMS の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ のバックグラウンド測定では、米国 DeepWater 社の Old iodine 試料 ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \sim 1-2 \times 10^{-14}$) から作製したヨウ化銀 (試薬ブランク) を用いている。 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ のバックグラウンドに寄与する要因としては、試料調製で添加する ^{127}I キャリアー、試料調製を行う部屋の ^{129}I レベル、測定中のメモリー効果などがある。図 61 に、試薬ブランクの 5 分 \times 5 回測定、または 3 分 \times 11 回測定による、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ のバックグラウンドの平均値を示す。2018 年から 2019 年にかけて、福島事故起源の試料測

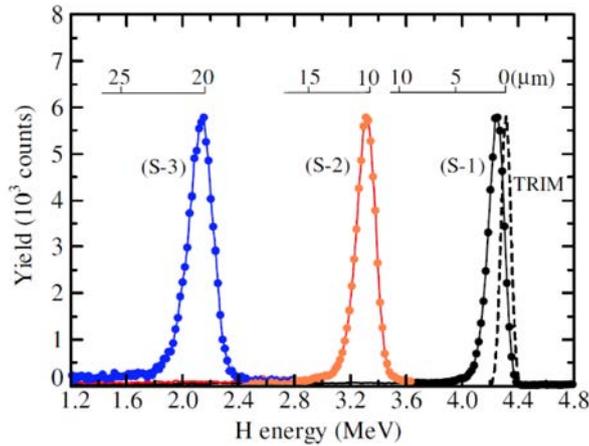


図 60 8 MeV-⁴He ビームによる透過 ERDA を用いた S-1, S-2, S-3 の反跳水素粒子の測定結果と 0° 方向反跳水素の TRIM 計算結果。半導体検出器のアクセプタンスは 4.1° である。

定などによりバックグラウンドの測定値が上昇した。しかし、試料作製過程の対策の結果などにより、2020 年度のバックグラウンドは ¹²⁹I/¹²⁷I ~ 2 × 10⁻¹⁴ となり、10⁻¹⁴ 台の前半の測定が実現できるようになった [30]。

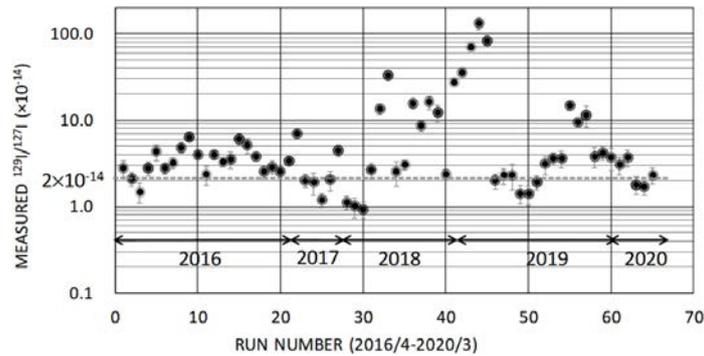


図 61 ¹²⁹I/¹²⁷I のバックグラウンド測定の平均値の変化

(3) 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研究

Gradient flow に基づく SFtX 法を用いた有限温度 QCD の研究

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、従来の方法では、5種類の演算子の非自明なくりこみと混合を非摂動的に決定するという、複雑なくりこみ操作を行わなければ意味のある評価が出来なかった。

谷口、金谷らは、九州大学 鈴木博教授、大阪大学 北澤正清助教、新潟大学 江尻信司准教授、広島大学 梅田貴士准教授らと、Gradient flow（勾配流）に基づいて鈴木博らにより開発された **SFtX** 法 (small flow-time expansion method) 応用して、これらの課題を克服した大きなブレイクスルーを目指している。Gradient flow とは、仮想的な時間パラメータ t (flow-time) を導入して、作用の勾配で与えられる発展方程式（フロー方程式）により場の量を変形させる理論的手法である。この発展方程式は一種の拡散方程式になっており、 $t > 0$ までフローさせた結果は、元の場の量を $\sqrt{8t}$ の物理的領域で準化 (smear) させたものと解釈することができる。さらに、フローさせた場で作る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ことが、Lüscher と Weisz により証明された。SFtX 法は、Gradient flow 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。連続理論で何らかの物理量を非摂動的に評価しようとすると、通常は、その物理量を格子理論で定義し、格子上で評価された値を連続極限まで外挿 ($a \rightarrow 0$) するが、数値的なくりこみに加えて、格子上で重要な対称性が壊されている場合にはそれによる不要な演算子との混合を数値的に除去する必要がある、十分な精度を出すためにはしばしば重い計算となる。SFtX 法では、フローさせた演算子が有限であることを利用して、対応する演算子を格子上で計算することにより、くりこみ操作や混合の除去無しに直接評価する。ただし、フローさせた演算子は求める物理量そのものではないので、格子の結果を、連続極限 ($a \rightarrow 0$) とフロー時間ゼロ極限 ($t \rightarrow 0$) に2重外挿する。

SFtX はどんな物理量にも使うことができるので、格子化で並進対称性が陽に壊されるためにこれまで扱いが難しかったエネルギー運動量テンソルの格子計算に、最初に応用された。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。

我々は、動的クォークを含む QCD への応用の第一段階として、2016-2017 年度に u,d クォークが現実よりやや重い場合の $N_f = 2 + 1$ QCD の研究を実行した。エネルギー運動量テンソルの対角成分から計算した状態方程式が、従来の方法による結果を良く再現することを示し、さらに、カイラル感受率の disconnected 部分がクロスオーバー温度でピークを示すことを Wilson 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、ここでシミュレーションした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。

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、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、及び、SFtX 法の更なる改良に向けた研究を推進している。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系統的に遂行している。2020年度には、以下の研究成果が得られた：

SFtX 法の改良

SFtX 法では、格子上で測った $t > 0$ のフローさせた演算子の結果を、連続極限 ($a \rightarrow 0$) とフロー時間ゼロ極限 ($t \rightarrow 0$) に2重外挿する。ここで、 $t/a^2 \sim 0$ 領域は格子化誤差が大きいので、それを避けながら2重外挿する必要がある。従って、格子が粗い、もしくは格子化誤差が大きい演算子の場合には、外挿に必要な線形領域が不明確になる可能性がある。これらの場合に SFtX 法を応用するためには、なんらかの改善が要求される。論文1では、マッチング係数におけるくりこみスケールと摂動高次項の効果を研究した。

マッチング係数とは、フローさせた演算子と求めるくりこまれた物理量とを結びつける係数である。SFtX 法では、物理量を、格子上で測った $t > 0$ のフローさせた演算子にマッチング係数を掛けたものを組み合わせてあらわし、その2重外挿を実行する。マッチング係数は、QCD を含む漸近自由な理論では、 t が大きくなければ摂動計算することができる。SFtX 法では、摂動であらかじめわかっている t 依存性をマッチング係数に取り込むことで、 $t \rightarrow 0$ 外挿が滑らかになるように改良している。実際、我々の u,d クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCD の研究 (格子間隔 0.07fm) では、マッチング係数のおかげで、 $t \rightarrow 0$ 外挿を数値的に可能とする線形領域が実現した。他方、現実のクォーク質量での $N_f = 2 + 1$ QCD の研究 (格子間隔 0.09fm) や、u,d クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCD で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、 $t \rightarrow 0$ 外挿を行うための線形領域が十分明確でなくなるといった現象を経験した。

マッチング係数を摂動計算するときのくりこみスケール μ は、摂動展開が破綻しない限り、どんな値を取っても良く、 $t \rightarrow 0$ 極限の最終的な物理量は μ のとりかたに依存しないはずである。通常 μ としては、フローさせた演算子の自然なスケールの一つである、フローによる smearing スケール $\mu_d = 1/\sqrt{8t}$ が採用されてきた。上に述べたように、 μ_d と同程度ならば、原理的にどんな μ をとっても良いはずである。しかし実際は、摂動展開を有限次で切っているので、摂動展開の質は、 μ をどう取るかで影響を受ける。特に、SFtX 法で $t \rightarrow 0$ 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。

論文1では、Harlander らが最近の摂動の高次計算で提案した $\mu_0 = 1/\sqrt{2e^{\gamma_E} t}$ (γ_E はオイラー数) の効果を調べた。数値的には $\mu_0 \simeq 1.5\mu_d$ なので、 μ_0 スケールは、摂動領域をより大きな t まで拡大し、 t が大きな領域で $t \rightarrow 0$ 外挿のシグナルを改善してくれる可能性がある。

図 62 に、u,d クォークが現実より重い $N_f = 2 + 1$ QCD におけるエントロピー密度 (左図) と ud クォークのカイラル感受率 (右図) の $t \rightarrow 0$ 外挿を示す。緑が μ_d スケール、青が μ_0 スケールの結果である。 $t \rightarrow 0$ 極限の結果はどちらもコンシステントだが、 μ_0 スケールにより線形シグナルが改善されていることがわかる。現実のクォーク質量での $N_f = 2 + 1$ QCD での試験研究で、 μ_d スケールでは $t \rightarrow 0$ 外挿が不定な場合でも、 μ_0 スケールにより線形シグナルが劇的に改善され、SFtX 法の安定性と適用範囲が大きく改善されることを確認した。

論文1では、マッチング係数における2ループ項の効果や、2ループ計算で使われた運動方程式の影響も研究したが、我々の研究している $N_f = 2 + 1$ QCD では SFtX 法の改良には大きくは寄与しないらしいことがわかったので、ここでは省略する。

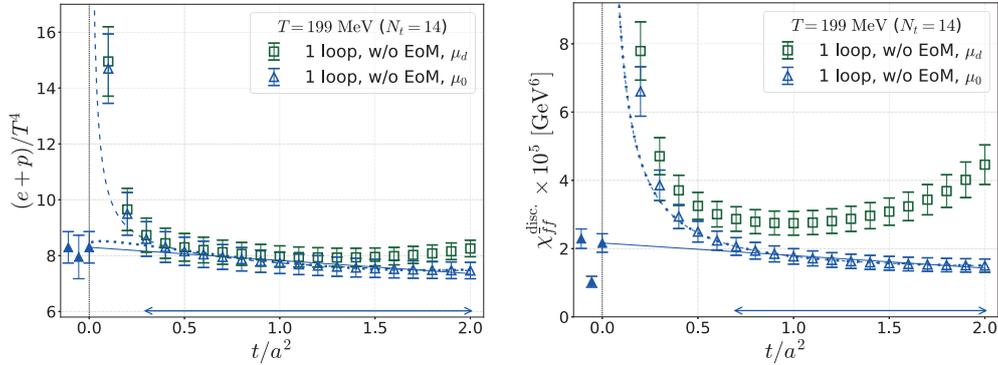


図 62 マッチング係数におけるくりこみスケールの効果。ud クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCD でのエントロピー密度 (左図) と ud クォークのカイラル感受率 (右図)。横軸はフロー時間で、直線 (点線、ダッシュ線) は、 μ_0 スケールを用いた $t \rightarrow 0$ 線形外挿 (非線形外挿、linear+log 外挿) で、下の矢印がフィット領域。 $t \sim 0$ 近傍のシンボルは、右から、線形外挿、非線形外挿、linear+log 外挿によるエントロピー密度 (左図) と ud クォークのカイラル感受率 (右図) の外挿結果。(論文 1)

クエンチ QCD の潜熱と SFtX 法における 2 重外挿の順序依存性の研究

論文 3 では、SFtX 法を応用して、クエンチ QCD (SU(3) Yang-Mills 理論) の有限温度 1 次相転移点における潜熱と圧力ギャップ Δp を研究した。1 次相転移点では、共存する 2 相の動的平衡から $\Delta p = 0$ となるはずで、その数値的確認は結果の信頼性の良い指標とされてきた。また、クエンチ QCD では様々な格子間隔を系統的に計算できるので、上で議論した、 $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の 2 重外挿における極限操作の順番の問題を試験した。SFtX 法における $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の 2 重外挿では、格子化誤差が大きい $t/a^2 \sim 0$ 領域のデータを取り除いて外挿する必要がある。そして、この $t/a^2 \sim 0$ 領域の格子化誤差が正しく取り除かれているならば、2 つの外挿の順序によらず同じ結果が得られると期待される。

論文 3 では、3 つの格子間隔 ($N_t = 8, 12, 16$ に対応する $a = 1/(N_t T_c)$)、2 つの空間体積 ($N_s/N_t = 6, 8$ に対応する $V = (N_s a)^3 = (N_s/N_t)^3/T_c^3$) でクエンチ QCD シミュレーションを実行し、我々が開発した再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせた手法を使って臨界点 $T = T_c$ に調整した。そして、臨界点直上で、SFtX 法を使って臨界点における潜熱と Δp を測定した。

図 63 の左図に、 μ_0 スケールを使った潜熱と圧力ギャップ Δp の結果を示す。この図から、(a) $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の極限操作の順番を変えても結果が一致すること、および、(b) Δp がゼロとコンシステントであることが確認される。これにより、連続極限における潜熱を精密で信頼性が高く測定することに成功した。同時に、図 63 の右図に示したように、潜熱の結果に空間体積依存性確認されるので、より大きな空間体積での追試が望まれる。

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

これらの研究を進展させ、クォーク質量を現実のクォーク質量 (物理点) に調整した $N_f = 2 + 1$ QCD の熱力学研究を推進している。ゼロ温度配位として PACS-CS Collaboration が生成したものを活用し、それと同じ格子間隔 $a \simeq 0.09\text{fm}$ で有限温度シミュレーションを実行している。物理点の配位生成には大きな計算が要求されるので、様々な計算機資源を動員して系統的な大規模シミュレーションを系統的に遂行している。この物理点シミュレーションでも、上で紹介した SFtX 法の改良が重要な役割を

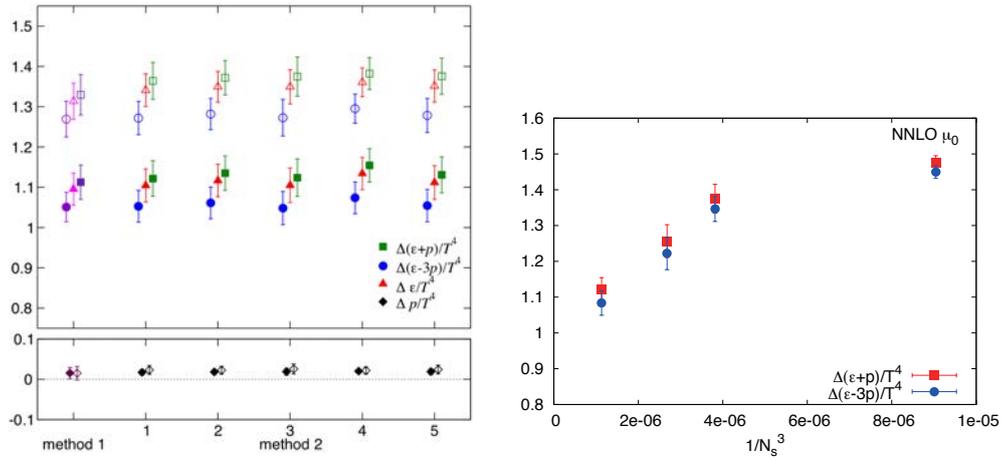


図 63 クエンチ近似 QCD の潜熱と圧力ギャップに関して $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の 2 重外挿を行った最終結果。左図： $t \rightarrow 0$ を先に実行する”method 1”と $a \rightarrow 0$ を先に実行する ”method 2” の結果の比較 (method 2 では、さらに $t \rightarrow 0$ 外挿のフィット・レンジをいくつか比較)。filled symbols はアスペクト比 $N_s/N_t = 8$ 、open symbols は $N_s/N_t = 6$ に相当する空間体積での結果。右図： $N_t = 12$ 格子における潜熱の空間体積依存性。method 1 による結果。(論文 3)

果たすと期待される。

これまでに得た様々な物理量の挙動から、 $T \simeq 122\text{--}146$ 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が、まだ統計が十分ではなく、明確な結論を得るためには $T \leq 146$ MeV の低温領域で更なる統計が必要である。我々の Wilson クォークによる相転移温度は、スタガード型クォークによる先行結果より低い可能性があるが、相転移温度の精密な評価は実験的・現象論的にも重要である。現在そのための低温領域の配位生成を集中的に進めており、その中間結果を各種会議で報告した(国際会議 1, 国内会議 4,7,8,9,10,11)。

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ている。(国内会議 2)

また、SFtX 法を 2 点関数に拡大して、カイラル感受率の connected 部分と $U(1)_A$ 感受率の評価を行った。u,d クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCD では、カイラル感受率の disconnected 部分と違って、connected 部分や全カイラル感受率は QCD 相転移にそれほど敏感では無いことがわかった。これは u,d クォークが重いことによる影響と考えられるので、u,d クォークを物理点まで軽くした $N_f = 2 + 1$ QCD でも検証する必要がある。また、 $U(1)_A$ 感受率の結果から、QCD 相転移温度では $U(1)_A$ 対称性がまだ回復していないことを示唆する中間結果を得た。(国内会議 5,12)

SFtX 法による ゼロ温度カイラル物理量の研究

SFtX 法により、通常の方法では格子化に伴う対称性の破れのために評価が難しい物理量も直接非摂動的に評価できる可能性が拓かれた。有限温度の物理量だけでなく、ゼロ温度物理量にも、格子による非摂動的評価が望まれる物理量は多く存在する。

谷口、鈴木遊、金谷は、九州大学 鈴木博教授と共同で、SFtX 法のゼロ温度物理量への応用として、B 中間子バッグパラメータ B_K を SFtX 法で計算するために必要なマッチング係数の摂動計算を行った： B_K は、CP 対称性の破れを $K_0-\bar{K}_0$ 振動実験から抽出する上で鍵となる量で、その非摂動論的評価は極めて重要であるが、格子上のカイラル対称性の破れのために通常の方法では複雑なくりこみと混合の解消が要求される。我々は、SFtX 法をクォーク 4 点関数の評価に拡張して、 B_K などの評価に必要なマッチング係数を計算した。(論文 2)

参考文献

- [1] ALICE Collaboration, Phys. Rev. D **100**, 092004 (2019)
- [2] ALICE Collaboration, Phys. Rev. C **101**, 034911 (2020)
- [3] S. Wicks, W. Horowitz, M. Djordjevic, M. Gyulassy, Nucl. Phys. A. 783 (2007), pp. 493-496
- [4] ALICE Collaboration, Phys.Lett.B 804 (2020) 135377
- [5] ALICE Collaboration, JHEP 02 (2020) 077
- [6] Jesper R. Christiansen, et. al., JHEP 08 (2015) 003
- [7] ALICE Collaboration, EPJ C 78, 263.
- [8] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 103, 034908 (2021)
- [9] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 102, 044906 (2020)
- [10] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 126, 092301 (2021)
- [11] Y. Aoki, et al., Nature 443, 675 (2006)
- [12] A. Bazavov et al, Phys. Rev. D 95, 054504 (2017)
- [13] T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, Nucl. Instrum. Meth. A 984, 164632 (2020)
- [14] STAR Collaboration, Nature 548, 62 (2017)
- [15] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 98, 014910 (2018)
- [16] D.-X. Wei, W.-T. Deng, and X.-G. Huang, Phys. Rev. C 99, 014905 (2019)
- [17] J. Adam et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. 126, 162301 (2021)
- [18] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 76 024915 (2007)
- [19] X.G Deng et al, Phys. Rev. C 101 6, 064908 (2020)
- [20] R. Lednicky, V. L. Lyuboshitz, Sov. J. Nucl. Phys. 35, 770 (1982)
- [21] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 114, 022301 (2015)
- [22] J. Haidenbauer et al., Eur. Phys. J. A 51, 17 (2015)
- [23] T. Doi et al., EPJ Web Conf. 175, 05009 (2018)
- [24] PHENIX Collaboration, Nature Phys. 15, 214-220 (2019)
- [25] ALICE Collaboration, ALICE-PUBLIC-2019-005, <http://cds.cern.ch/record/2696471>
- [26] T. Awes et al., Nucl. Instrum. Meth. A **988**, 164796 (2021)
- [27] D. Nagae et al., Hyperfine Interact. 220, 65 (2013)
- [28] S. Suzuki et al., NIM A 965, 163807 (2020)
- [29] A. Yamazaki, K. Sasa et al., AIP Advances 9, 105111 (2019)
- [30] M. Matsumura, K. Sasa et al., Analytical Sciences, 36, 631-636 (2020)

<論文>

1. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), $N_f = 2 + 1$ QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients, Phys. Rev. D 102, No.1, ref.014510, pp.1-25 (2020) , DOI:10.1103/PhysRevD.102.014510, 10.1103/PhysRevD.102.059903
2. Asobu Suzuki, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow, Phys. Rev. D 102, No.3, ref.034508, pp.1-13 (2020) , DOI:10.1103/PhysRevD.102.034508
3. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Latent heat and pressure gap at the first order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, ref.013B08, pp.1-26 (2021) , DOI:10.1093/ptep/ptaa184
4. Centrality dependence of J/ψ and $\psi(2S)$ production and nuclear modification in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **02**, 002 (2021)

5. Pion-kaon femtoscopy and the lifetime of the hadronic phase in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **813**, 136030 (2021)
6. Production of ω mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Eur. Phys. J. C* **80**, no.12, 1130 (2020)
7. Elliptic and triangular flow of (anti)deuterons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Rev. C* **102**, no.5, 055203 (2020)
8. J/ψ elliptic and triangular flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **10**, 141 (2020)
9. Constraining the Chiral Magnetic Effect with charge-dependent azimuthal correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **09**, 160 (2020)
10. Measurement of isolated photon-hadron correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV pp and p -Pb collisions, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Rev. C* **102**, no.4, 044908 (2020)
11. Dielectron production in proton-proton and proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Rev. C* **102**, no.5, 055204 (2020)
12. Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Nature* **588**, 232-238 (2020)
13. Transverse-momentum and event-shape dependence of D-meson flow harmonics in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **813**, 136054 (2021)
14. First measurement of quarkonium polarization in nuclear collisions at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **815**, 136146 (2021)
15. Z-boson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **09**, 076 (2020)
16. Production of light-flavor hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Eur. Phys. J. C* **81**, no.3, 256 (2021)
17. Multiplicity dependence of J/ψ production at midrapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **810**, 135758 (2020)
18. Measurement of the low-energy antideuteron inelastic cross section, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Rev. Lett.* **125**, no.16, 162001 (2020)
19. J/ψ production as a function of charged-particle multiplicity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **09**, 162 (2020)
20. Search for a common baryon source in high-multiplicity pp collisions at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **811**, 135849 (2020)
21. Measurement of nuclear effects on $\psi(2S)$ production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **07**, 237 (2020)
22. (Anti-)deuteron production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Eur. Phys. J. C* **80**, no.9, 889 (2020)
23. Multiplicity dependence of π , K, and p production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Eur. Phys. J. C* **80**, no.8, 693 (2020)
24. Coherent photoproduction of ρ^0 vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **06**, 035 (2020)
25. Linear and non-linear flow modes of charged hadrons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **05**, 085 (2020)
26. Non-linear flow modes of identified particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **06**, 147 (2020)
27. Production of (anti-) ^3He and (anti-) ^3H in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Rev. C* **101**, no.4, 044906 (2020)
28. Centrality and transverse momentum dependence of inclusive J/ψ production at midrapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **805**, 135434 (2020)
29. Underlying Event properties in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *JHEP* **04**, 192 (2020)
30. Longitudinal and azimuthal evolution of two-particle transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Lett. B* **804**, 135375 (2020)
31. 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, S. Acharya et al., *JHEP* **02**, 077 (2020)
32. Probing the effects of strong electromagnetic fields with charge-dependent directed flow in Pb-Pb collisions at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) 2, 022301
33. Jet-hadron correlations measured relative to the second order event plane in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV,

- ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.6, 064901 (2020)
34. Multiplicity dependence of $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **807**, 135501 (2020)
 35. Measurement of spin-orbital angular momentum interactions in relativistic heavy-ion collisions, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. Lett. **125**, no.1, 012301 (2020)
 36. Y production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **806**, 135486 (2020)
 37. Global baryon number conservation encoded in net-proton fluctuations measured in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **807**, 135564 (2020)
 38. $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ production at midrapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **102**, no.2, 024912 (2020)
 39. Measurement of the (anti-) ^3He elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **805**, 135414 (2020)
 40. Production of charged pions, kaons, and (anti-)protons in Pb-Pb and inelastic pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.4, 044907 (2020)
 41. Global polarization of $\Lambda\bar{\Lambda}$ hyperons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.4, 044611 (2020)
 42. Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in polarized proton collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Mohamed Abdallah et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 9, L091103
 43. Global Polarization of Ξ and Ω Hyperons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 16, 162301
 44. Measurement of transverse single-spin asymmetries of π^0 and electromagnetic jets at forward rapidity in 200 and 500 GeV transversely polarized proton-proton collisions, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 9, 092009
 45. Comparison of transverse single-spin asymmetries for forward π^0 production in polarized pp, pAl and pAu collisions at nucleon pair c.m. energy $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 7, 072005
 46. Measurements of W and Z/ γ^* cross sections and their ratios in p+p collisions at RHIC, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 1, 012001
 47. Flow and interferometry results from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C **103** (2021) 3, 034908
 48. Beam-energy dependence of the directed flow of deuterons in Au+Au collisions, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C **102** (2020) 4, 044906
 49. Measurement of inclusive J/ ψ polarization in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV by the STAR experiment, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **102** (2020) 9, 092009
 50. Investigation of the linear and mode-coupled flow harmonics in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Lett. B **809** (2020) 135728
 51. Measurement of inclusive charged-particle jet production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C **102** (2020) 5, 054913
 52. Measurement of the central exclusive production of charged particle pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV with the STAR detector at RHIC, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., JHEP **07** (2020) 07, 178
 53. Results on total and elastic cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Lett. B **808** (2020) 135663
 54. Measurement of groomed jet substructure observables in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV with STAR, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Lett. B **811** (2020) 135846
 55. Beam energy dependence of net- Λ fluctuations measured by the STAR experiment at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C **102** (2020) 2, 024903
 56. Nonmonotonic Energy Dependence of Net-Proton Number Fluctuations, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 9, 092301
 57. Underlying event measurements in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at RHIC, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **101** (2020) 5, 052004
 58. Measurement of D0-meson + hadron two-dimensional angular correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C **102** (2020) 1, 014905
 59. Methods for a blind analysis of isobar data collected by the STAR collaboration, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Nucl. Sci. Tech. **32** (2021) 5, 48
 60. First measurement of Λ_c baryon production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. Lett. **124** (2020) 17, 172301

61. Bulk properties of the system formed in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=14.5$ GeV at the BNL STAR detector, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., *Phys. Rev. C* 101 (2020) 2, 024905
62. Beam-energy dependence of identified two-particle angular correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ -200 GeV Au+Au collisions, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., *Phys. Rev. C* 101 (2020) 1, 014916
63. Measurement of away-side broadening with self-subtraction of flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., *Chin. Phys. C* 44 (2020) 104001
64. Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=7.7, 11.5, 19.6, 27,$ and 39 GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., *Phys. Rev. C* 102 (2020) 3, 034909
65. Transverse single-spin asymmetries of midrapidity π^0 and η mesons in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. D* 103 (2021) 5, 052009
66. Transverse momentum dependent forward neutron single spin asymmetries in transversely polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. D* 103 (2021) 3, 032007
67. Production of π^0 and η mesons in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}=192$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. C* 102 (2020) 6, 064905
68. Production of b,bbar at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. D* 102 (2020) 9, 092002
69. Polarization and cross section of midrapidity J/ ψ production in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. D* 102 (2020) 7, 072008
70. Measurement of jet-medium interactions via direct photon-hadron correlations in Au+Au and d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. C* 102 (2020) 5, 054910
71. Measurement of charged pion double spin asymmetries at midrapidity in longitudinally polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. D* 102 (2020) 3, 032001
72. 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
73. Measurement of J/ ψ at forward and backward rapidity in p+p, p+Al, p+Au, and 3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., *Phys. Rev. C* 102 (2020) 1, 014902
74. Nuclear-modification factor of charged hadrons at forward and backward rapidity in p+Al and p+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, PHENIX Collaboration, C. Aidala et al., *Phys. Rev. C* 101 (2020) 3, 034910
75. Pileup corrections on higher-order cumulants, Toshihiro Nonaka, Masakiyo Kitazawa, ShinIchi Esumi, *Nucl. Instrum. Meth. A* 984 (2020) 164632
76. Reconstructing particle number distributions with convoluting volume fluctuations, ShinIchi Esumi, Kana Nakagawa, Toshihiro Nonaka, *Nucl. Instrum. Meth. A* 987 (2021) 164802
77. Mapping the Phases of Quantum Chromodynamics with Beam Energy Scan, Adam Bzdak, Shinichi Esumi, Volker Koch, Jinfeng Liao, Mikhail Stephanov et al., *Phys. Rept.* 853 (2020) 1-87
78. Design and performance of a silicon-tungsten calorimeter prototype module and the associated readout, T. Awes, C. L. Britton, T. Chujo et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **988**, 164796 (2021)
79. K. Masumoto, H. Matsumura, T. Miura, G. Yoshida, A. Toyoda, H. Nakamura, K. Bessho, T. Nakabayashi, F. Nobuhara, K. Sasa, T. Moriguchi, H. Tsuchida, S. Matsuyama, M. Matsuda, A. Taniike, Evaluation of activated area in the electrostatic accelerator facilities in the reactor facility, *Radiation Protection*, 41(2) (2021) 145-150.
80. Go Yoshida, Hiroshi Matsumura, Hajime Nakamura, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Taichi Miura, Kimikazu Sasa, Tetsuaki Moriguchi, Survey Methodology for the Activation of Beamline Components in an Electrostatic Proton Accelerator, *Radiation Safety Management*, 20 (2021) 1-8. DOI: 10.12950/rsm.200813
81. Kimikazu Sasa, Maki Honda, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Aya Sakaguchi, Saori Kurita, Yukihiko Satou and Keisuke Sueki, A sensitive method for Sr-90 analysis by accelerator mass spectrometry, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 58:1 (2021) 72-79. DOI: 10.1080/00223131.2020.1801530
82. Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Hajime Nakamura, Taichi Miura, Koichi Nishikawa, Kotaro Bessho, Kimikazu Sasa, Tetsuaki Moriguchi, Fumiyoshi Nobuhara, Yoko Nagashima, Non-destructive High-Sensitivity Measurement Method for Activation Estimation in Accelerator Room Concrete, *Radiation Protection*, 2020, 40 (6), 677-682.
83. Masanori Kurosawa, Kimikazu Sasa, Satoshi Ishii, Quantitative PIXE analyses of trace Ti in single fluid inclusions in quartz from Tsushima granite, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 479, 15 September 2020, 35-41.
84. Y.X.Watanabe, M.Ahmed, Y.Hirayama, M.Mukai, J.H.Park, P.Schury, Y.Kakiguchi, S.Kimura, A.Ozawa, M.Oyaizu, M.Wada, and H.Miyatake, "Deexcitation γ -ray transitions from the long-lived $I \pi = 13/2+$ metastable state in 195Os", *PHYSICAL REVIEW C* 101, 041305(R) (2020).
85. D. Nagae, Y. Abe, S. Okada, S. Omika, K. Wakayama, S. Hosoi, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, Z. Ge, S. Naimi, F. Suzuki, N. Tadano, R. Igosawa, K. Inomata, H. Arakawa, K. Nishimuro, T. Fujii, T. Mitsui, Y.

- Yanagisawa, H. Baba, S. Michimasa, S. Ota, G. Lorusso, Yu.A. Litvinov, A. Ozawa, T. Uesaka, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, M. Wakasugi, “Development and operation of an electrostatic time-of-flight detector for the Rare RI storage Ring”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 986 (2021) 164713.
86. S. Naimi, H.F.Li, Y. Abe, Y. Yamaguchi, D. Nagae, F. Suzaki, M. Wakasugi, H. Arakawa, W. Dou, D. Hamakawa, S. Hosoi, Y. Inada, K. Inomata, D. Kajiki, T. Kobayashi, M. Sakaue, K. Yokoya, T. Yamaguchi, R. Kagesawa, D. Kamioka, T. Moriguchi, M. Mukai, A. Ozawa, S. Ota, N. Kitamura, S. Masuaoka, S. Michimasa, D. S. Ahn, H. Baba, N. Fukuda, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, C.Y. Fu, Z. Ge, S. Suzuki, Q. Wang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, G. Lorusso, and T. Uesaka, “Experimental Challenges of the First Mass Measurement Campaign at the Rare-RI Ring”, J. Phys. Conf. Ser. 1643 (2020) 012058.
 87. 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, “Measurements of total reaction cross sections for ^{17}Ne using a solid hydrogen target”, J. Phys. Conf. Ser. 1643 (2020) 012099
 88. A. Homma, M. Tanaka, M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, T. Suzuki, D. Nishimura, T. Moriguchi, D. S. Ahn, A. S. Aimaganbetov, M. Amano, H. Arakawa, S. Bagchi, K.-H. Behr, N. Burtebayev, K. Chikaato, H. Du, T. Fujii, N. Fukuda, H. Geissel, T. Hori, S. Hoshino, H. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. KENZHINA, Z. Korkulu, Ye. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurulla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, S. Ohmika, K. Ohnishi, M. Ohtake, H.J. Ong, A. Ozawa, A. Prochazka, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sugihara, T. Sumikama, S. Suzuki, H. Suzuki, H. Takeda, Y. Tanaka, Y. K. Tanaka, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, T. K. Zholdybayev, “Development of a Method to Deduce Point-proton Radii from Charge Changing Cross Sections”, JPS Conf. Proc. 32 (2020) 010032.
 89. M. Mukai, Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, S. Schiffmann, J. Ekman, M. Godefroid, P. Schury, Y. Kakiguchi, M. Oyaizu, M. Wada, S. C. Jeong, J. Y. Moon, J. H. Park, H. Ishiyama, S. Kimura, H. Ueno, M. Ahmed, A. Ozawa, H. Watanabe, S. Kanaya, and H. Miyatake, “In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of $^{196,197,198}\text{Ir}$ ”, PHYSICAL REVIEW C 102, 054307 (2020).
 90. C.Y. Fu, Y.H. Zhang, M. Wang, X.H. Zhou, Yu.A. Litvinov, K. Blaum, H.S. Xu, X. Xu, P. Shuai, Y.H. Lam, R.J. Chen, X.L. Yan, X.C. Chen, J.J. He, S. Kubono, M.Z. Sun, X.L. Tu, Y.M. Xing, Q. Zeng, X. Zhou, W.L. Zhan, S. Litvinov, G. Audi, T. Uesaka, T. Yamaguchi, A. Ozawa, B.H. Sun, Y. Sun, and F. R. Xu, “Mass measurements for the $T_z = -2$ p-shell nuclei ^{40}Ti , ^{44}Cr , ^{46}Mn , ^{48}Fe , ^{50}Co , and ^{52}Ni ”, PHYSICAL REVIEW C 102, 054311 (2020).

〈レビュー、解説・総説、書籍・著書等〉

1. 笹 公和, “難測定核種の加速器質量分析による高感度検出手法の開発”, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, 45(3) (2020) 128.
2. 中條 達也, “LHC 超前方領域で切り拓く新しい量子色力学, カラーガラス凝縮と QGP 熱化機構”, 原子核研究 第 65 巻 1 号 (2020 年 9 月)

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Kazuyuki Kanaya, “Thermodynamic observables in $(2+1)$ -flavor QCD applying the gradient-flow method”, CCS 12th international symposium 2020 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS, Tsukuba, Japan (online), 10.06, 2020)
2. G. Yoshida, H. Matsumura, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Masumoto, T. Miura, K. Sasa, T. Moriguchi, “Survey Methodology for the Activation of Beamline Components in an Electrostatic Proton Accelerator”, 14th International Conference on Radiation Shielding and 21st Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division, ICRS 14/RPSD-2020, Seattle, WA, USA, September 13-17, 2020.
3. N. Novitzky, “Probing small-x gluons with the ALICE Forward Calorimeter upgrade”, The VI th International Conference on the Initial Stages (IS2021), online, 10-15 January 2021
4. Takafumi Niida, “Global and local polarization measurements at RHIC and LHC”, INT workshop on Chirality and Criticality: Novel phenomena in HIC, May 11-22, 2020, Online (invited)
5. Takafumi Niida, “Experimental overview of spin polarization signatures”, ECT star workshop on Spin and Hydrodynamics in Relativistic Nuclear Collisions, Oct. 15-16, 2020, Online (invited)
6. Takafumi Niida, “Global polarization of hyperons from STAR experiment”, RHIC and AGS Annual Users Meeting, Oct. 22-23, 2020 (invited)
7. Takafumi Niida, “Vorticity and polarization in heavy-ion collisions”, Workshop on tracking, reconstruction and physics performance studies at FAIR and NICA, Dec. 8, 2020, Online (invited)
8. Takafumi Niida, “Vorticity and polarization of hyperons in heavy-ion collisions”, NA61/SHINE Open Seminar, Jan.

- 21, 2021, Online (invited)
9. Takafumi Niida, "Global polarization of Ξ and Ω hyperons in heavy-ion collisions", LBNL-HIT Seminar, Feb. 9, 2021, Online (invited)
 10. ShinIchi Esumi, "Centrality determination in STAR at RHIC in BES2 and Fixed-Target program", Workshop on analysis techniques for centrality determination and flow measurements at FAIR and NICA, 24 - 28 August 2020, Online (invited)
 11. ShinIchi Esumi, "Results from Beam Energy Scan Program at RHIC-STAR", the International conference on Critical Point and Onset of Deconfinement, CPOD2021, 15 - 19 March 2021, Online (invited)
 12. Risa Nishitani, "Measurements of net-proton fluctuation for p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV from the STAR experiment", the International conference on Critical Point and Onset of Deconfinement, CPOD2021, 15 - 19 March 2021, Online

[国内学会・研究会]

1. 金谷 和至, "Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the SFtX method based on the gradient flow", 理化学研究所 計算科学研究センター (R-CCS) セミナー (理化学研究所, 神戸市, 兵庫県 (online), 5.20, 2020)
2. 谷口 裕介, 金谷 和至 (Y. Taniguchi, K. Kanaya, A. Baba, S. Ejiri, 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 12 回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 7. 09, 2020)
3. 鈴木 博 (Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Takashi Umeda, Masakiyo Kitazawa), "有限温度量子色力学のダイナミクス", 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第 12 回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 7.09, 2020)
4. 金谷 和至, "Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f = 2 + 1$ QCD", 熱場の量子論とその応用 2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
5. 馬場 惇, "SFtX 法を用いたカイラル感受率の測定", 熱場の量子論とその応用 2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
6. 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, "SFtX 法を用いたカイラル感受率の測定", 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
7. 金谷 和至, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, "Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f = 2 + 1$ QCD", 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
8. 鈴木 博, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 谷口 裕介, 馬場 惇, "Small Flow time eXpansion (SFtX) 法による $2 + 1$ フレーバー QCD の熱力学", 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
9. 谷口 裕介, 金谷 和至, "勾配流法を用いたクォーク・グルオン プラズマの物性的研究", 第 7 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 10.30, 2020)
10. 鈴木 博, 金谷 和至, 谷口 裕介, 江尻 信司, 梅田 貴士, 北沢 正清, 馬場 惇, "ウィルソンフェルミオンに基づいた有限温度量子色力学の研究", 第 7 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 10.30, 2020)
11. 金谷 和至, "Gradient flow に基づく SFtX 法による物理点 QCD の熱力学特性の研究", 大阪大学サイバーメディアセンター 2020 年度公募型利用制度成果報告会 (大阪大学吹田キャンパス, 大阪府, 茨木市 (online), 3.10, 2021)
12. 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, "SFtX 法を用いた Wilson fermion の下でのカイラル感受率の測定", 日本物理学会第 76 回年次大会 (online, 3.12-15, 2021)
13. 江尻 信司, 白銀 瑞樹, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, "Small flow-time expansion 法による SU(3) 格子ゲージ理論の一次相転移点における潜熱と圧力差", 日本物理学会第 76 回年次大会 (online, 3.12-15, 2021)
14. 菅澤佳世, 三宅美沙, 多田悠馬, 堀内一穂, 大谷昂, 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, "約 100 年分のドームふじアイスコア中 10Be と 36Cl の高分解能測定による BC5480 年宇宙線イベントの調査", 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8 - 11 日.
15. 大石脩人, 村尾吉輝, 新田紀子, 土田秀次, 富田成夫, 笹公和, 平田浩一, 柴田裕実, 平野貴美, 山田圭介, 千葉敦也, 齋藤勇一, 鳴海一雅, 星野靖, "C60 クラスタライオンビーム照射による Si 表面構造の形成", 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8 - 11 日.
16. 笹 公和, 高橋 努, 松村 万寿美, "36Cl の加速器質量分析における妨害同重体 36S の除去方法の検討", 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8-11 日.
17. 笹 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, "筑波大学タンデム加速器施設の現状報告", オンライン開催, 第 17 回日本加速器学会年会, 2020 年 9 月 2 - 4 日.
18. 黒澤 正紀, 笹 公和, 石井 聡, "対馬花崗岩の流体包有物中のニッケル", 日本鉱物科学会 2020 年オンライン年会, 2020 年 9 月 16 - 17 日.
19. Shigeo Tomita, Yoko Shiina, Ruri Suganuma, Makoto Matsuda, Makoto Imai, Masao Sataka, and Kimikazu Sasa, "The threshold foil thickness for the disappearance of the vicinage effect on the convoy-electron yield", 第 21 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会, 京都大学宇治キャンパス (現地会場とオンラインのハイブリッド形式),

- 2020年12月4-5日.
20. N. Oishi, Y. Murao, N. Nitta, H. Tsuchida, S. Tomita, K. Sasa, K. Hirata, H. Shibata, Y. Hirano, K. Yamada, A. Chiba, Y. Saitoh, K. Narumi, Y. Hoshino, "Energy dependence of nanostructure formation by fast C60 cluster ion beam on Si", 第21回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会, 京都大学宇治キャンパス(現地会場とオンラインのハイブリッド形式), 2020年12月4-5日.
 21. 笹 公和, "加速器質量分析を用いた宇宙線生成核種および人為起源核種の環境動態研究", 金沢大学環日本海域環境研究センターセミナー, 金沢大学, 2020年11月17日. "Invited"
 22. 富田 成夫, 山崎 義明, 石井 聡, 笹 公和, 左高 正雄, 榎本 洋, 工藤 博, "透過 ERDA によるアルミニウム中の水素 3 次元計測", 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 - 29 日." Invited "
 23. 笹 公和, 山崎 明義, 石井 聡, 富田 成夫, 左高 正雄, 榎本 洋, 工藤 博, "構造材料用マイクロビーム装置における多元素同時分析のためのイオンビーム分析システム", 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 - 29 日.
 24. 脇山義史, 松村万寿美, 松中哲也, 平尾茂一, 笹公和, "阿武隈川における出水時の 129I の挙動", 第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会, コッラセフくしま, 2021 年 3 月 18 日.
 25. 中村 司, 山崎 信哉, 石井 聡, 富田 成夫, 左高 正雄, 榎本 洋, 工藤 博, 笹 公和, 末木 啓介, "マイクロビーム PIXE による福島第一原子力発電所事故で放出した放射性粒子の元素分布測定", 第 2 回「環境放射能」研究会, 2021 年 3 月 10 - 12 日, オンライン開催.
 26. A. Ozawa, Present status of Rare-RI Ring (R3) and mass measurements RIBF Users Meeting 2020, 2020, 9/8-10, RIKEN (On-line), (Invited).
 27. 富田 啓介, 29P の核磁気モーメントの符号測定、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14 日～17 日 (オンライン)
 28. 中條 達也、「FoCal 他前方カロリメータ」、KEK 研究会「素粒子・原子核コライダー物理の交点」、2020 年 8 月 31 日 (月) - 9 月 1 日 (火)、招待講演
 29. 中條 達也、「ALICE Forward Calorimeter (FoCal); a high granularity Si-W EMCal and HCal」、新学術「クラスター階層」第 2 回検出器ワークショップ、2020 年 12 月 25 日 (金)
 30. 中條 達也、「LHC 超前方領域で切り拓く新しい量子色力学 カラーグラス凝縮と QGP 熱化機構」、原子核実験セミナー、大阪大学、2021/1/6(水)
 31. N. Novitzky, "Experimental overview of jets and photons in heavy ion collisions", 第 38 回 Heavy Ion Cafe, 2020 年 9 月 18 日 (金), online, 招待講演
 32. 野中 俊宏、「核子当たり衝突エネルギー 200 GeV の金-金衝突において STAR 実験で初測定された正味陽子数分布の 6 次のキュムラント」(日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演)、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
 33. 新井田 貴文、「Probing QGP with flow and particle correlations」(招待講演)、日本物理学会 2020 年秋季大会、シンポジウム「揺らぎと流体的発展からみる物理の面白さ」、Sep. 15, 2020
 34. 熊岡 卓哉、「LHC-ALICE 実験における鉛-鉛衝突を用いたフルジェットの原子核効果因子 (RAA) の測定」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
 35. 須藤 悠久、「LHC-ALICE 実験 鉛 + 鉛 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV における重クォーク起源電子の楕円方位角異方性の測定」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
 36. 佐藤 優里、「RHIC-STAR 実験 Beam Energy Scan II に向けた新しい中心衝突度の決定と保存量揺らぎの測定への影響」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
 37. 大久保 孝祐、「RHIC-STAR 固定標的実験 $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV 金 + 金衝突におけるラムダの偏極の測定」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
 38. 喜屋武 奨之、「J-PARC E16 実験のための、MRPC を用いたハドロン粒子識別装置の研究開発」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
 39. 新井田 貴文、「高エネルギー原子核衝突で生成される渦と偏極」、Heavy Ion Pub, Sep. 28, 2020
 40. 野中 俊宏、「高次キュムラントに対するパイルアップ補正」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
 41. 西谷 理佐、「RHIC-STAR 実験 p+p 衝突 $\sqrt{s} = 200$ GeV における正味陽子数揺らぎの測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
 42. 大久保 孝祐、「RHIC-STAR 固定標的実験 $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV 金 + 金衝突におけるラムダのグローバル偏極の測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
 43. 一色 萌衣、「RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金 + 金衝突における Λ - Λ および Ξ - Ξ 2 粒子相関関数測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
 44. 江下 もも、「LHC-ALICE 実験 陽子-陽子衝突 13 TeV における重クォーク起源ジェット生成の粒子多重度依存性の測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
 45. 千葉 俊哉、「LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV 陽子-鉛衝突におけるボトムクォーク由来電子の粒子多重度依存性の測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日

[博士論文]

1. 馬場 惇、「Measurement of Chiral Susceptibility in Lattice QCD with Wilson Fermion using Gradient Flow」

[競争的資金]

1. 科学研究費 基盤研究 (A)、蓄積リングでの質量測定によるハロー原子核の探索、代表、小沢 顕、4,290 千円
2. 科学研究費 基盤研究 (C)、中性子星の構造解明に向けた重い中性子過剰核のスキン厚測定、代表、森口 哲朗、3,380 千円
3. 科学研究費 基盤研究 (S)、過去 1 万年間の太陽活動、分担、笹公和、1,000 千円
4. 科学研究費 基盤研究 (B)、両極アイスコアの高解像度分析による放射性ヨウ素・塩素のフォールアウト変動の解明、分担、笹公和、450 千円
5. 科学研究費 基盤研究 (A)、高解像度マルチアーカイブ分析による太陽地磁気変動史と宇宙線イベントの解明、分担、笹公和、500 千円
6. 科学研究費 挑戦的研究 (開拓)、宇宙線生成核種の分析にもとづく断層活動度の新しい評価法の開発と検証、分担、笹公和、1,000 千円
7. 科学研究費 基盤研究 (S)、LHC 超前方光子測定によるグルーオン飽和と QGP 生成起源、代表、中條達也、29,250 千円
8. 科学研究費 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)、分担、中條達也、250 千円
9. 科学研究費 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、分担、中條達也、850 千円
10. 日仏事業 TYL-FJPPL (KEK-CNRS), QGP Tomography with photons, jets, and heavy flavors、代表、中條達也、400 千円
11. 科学研究費 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、代表、江角 晋一、22,750 千円
12. 伊藤科学振興会研究助成、原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究、代表、江角晋一、1,000 千円

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)

富田 成夫 (数理物質系理工学域 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)

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を共有し、つくば地区の連携研究 TIA の筑波大学拠点として活動している。活動の詳細は部門の HP を参照のこと。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。以下では、まず、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、令和 2 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 6 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
究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して	倉知郁生 (KEK)	AIST, 筑波大 (原), 産総研, 東大

同プロジェクト (グループリーダーは連携教員の倉知) は前年度まで継続した「3D 積層技術」での成果を受けて、令和 2 年度から新たに開始したプロジェクトである。第 5 回 3 次元積層量子イメージセンサ研究会をつくば市国際会議場で、企業からを含めて 95 名の参加者を迎えて令和 3 年 2 月 24 日にリモートで開催した。

センターが主催する今年度の構成員会議では、6月は、原「4次元飛跡検出器の開発」と近藤「紫外線照射で水素法主が誘起させるホウ化水素シート」を、11月は、中村「高時間分解能検出器(LGAD)の細密電極化に関する開発」、原「ATLAS ITk ストリップ型シリコン検出器の初期量産」の講演を行った。近藤の講演は燃料水素の保存と抽出を可能にする新素材に関するもので、原、中村は時間測定を可能にする新型シリコン位置検出器の開発についてである。また、ATLAS 実験増強用センサーの現状は、筑波大学グループが製造・建設を分担しているものである。

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、生命科学用の素子を含めた一連の活動は要素として育んでできたが、施設が未整備であるためにこれら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、その重要性はコミュニティ全体から認知され、KEK 主体でビームラインの建設が開始された。本部門では SOI 技術を用いて同ビームラインに設置する高性能飛跡トラッカーを整備することに貢献していく (SOI の項を参照)

次に、以下に、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教員の活動については、該当教員の属する部門での記述も参照されたい。

HL-LHC ATLAS 実験用半導体センサーの開発 (原, 中村, (素粒子構造部門) 廣瀬)

2027 年より、LHC は瞬間ルミノシティを $7.5 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ に引き上げた高輝度運転を予定している (High-Luminosity LHC)。データ量および放射線量増加に対応するため、現行 ATLAS 検出器に対する大幅な改造が予定されており、SCT を含めた内部飛跡検出器は、すべてシリコンセンサーからなる Inner Tracker (ITk) に置き換えられる。内層 5 層は $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ (最内層のみ $25 \times 100 \mu\text{m}^2$) のピクセルセンサー、外層 4 層は約 $75 \mu\text{m}$ ピッチのストリップセンサーで構成される。合計 180 m^2 もの面積をもつ、この大型シリコン検出器は、2026 年の完成を目指していよいよ設計を固めて最終仕様センサーの性能評価を行い、実機量産を開始するフェーズに入りつつある。筑波大では、主にセンサー設計及び性能評価、量産時の品質保証などを担っている。

(1) シリコンストリップセンサーの量産

ITk 用シリコンストリップセンサー量産の中で、筑波大では KEK と共同で

- 製造元である浜松ホトニクス社の協力のもとでの、全シリコンセンサーの基礎特性測定 (quality control; QC)
- 1 cm^2 角程度の性能テスト専用小型シリコンセンサー構造を用いた、抜き取り検査による放射線耐性試験 (quality assurance; QA)

を担当する。2019 年度末には、供給予定量 (約 2 万枚) の 1/20 程度の予備量産が行われ、この中で QC および QA 手順の構築と最終確認を行った。

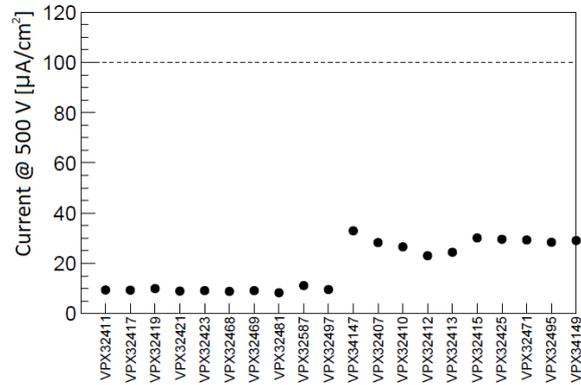


図 64 (左) ストリップセンサー QA システムの様子. センサーは恒温槽の内部に置かれ, -20°C で測定される. (中) 20 枚のテストチップに対する測定結果. ミニダイオードでの暗電流の測定例で, 点線は要求値 ($100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下) を示す. 左半分と右半分は照射量が異なり, それぞれ 1 MeV 中性子換算で $5.1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ と $1.6 \times 10^{15}/\text{cm}^2$.

QC については, 2019 年度中に予備量産品全 318 枚すべての測定を完了し, 良好な結果が得られていた. この時の知見から測定手順に対する詳細な検討を行い, 必要な改善を適用した. これらをまとめた報告書とともに, ATLAS 実験グループ内部で審査が行われた結果, 日本グループが QC サイトとして認定された.

QA については, 2019 年度中に基礎的な部分は完成していた, テスト用シリコンセンサー構造 (テストチップ, 8 mm 角ミニダイオード, 10 mm 角ミニストリップセンサー) 測定装置に対して, さらに自動化などの改良を加え, 必要最小限の操作で, 安定してミスなく系統的な測定を可能とした (図 64 左). この装置を用い, 660 kGy のガンマ線照射を行ったテストチップおよびミニダイオードのストリップ間特性や暗電流・静電容量特性などを評価し, 他に同測定を分担する世界 4 機関と合致する測定結果が得られることを確認した. この結果にもとづき, 筑波大はテストチップおよびミニダイオード評価サイトとして認定された (ミニセンサーについては 2019 年度に認定済み). また, 7 月及び 10 月には東北大学サイリックにおいて, テスト用センサーに対する 1 MeV 中性子換算で最大 $1.6 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ (HL-LHC ATLAS における予想線量の 1.5 倍) の陽子線照射を行い, 2020 年 2 月照射分も合わせて約 40 枚のテストセンサーの放射線損傷を評価した. この中で, 特に陽子照射をしたサンプルの場合, バルク損傷による大きな暗電流の影響が大きい中で微小なストリップ間電流を測定しなければならず, これまでに ATLAS 実験グループ内で策定されていた手順では測定が不安定になることがわかった. 筑波大が中心となって測定方法の改良を考案・実証し, この新しい測定手順が実験グループ内でも承認された.

2021 年 2 月に行われた外部審査員を含めた本量産準備状況レビュー (production readiness review; PRR) において, 本量産に向けたシリコンストリップセンサー QC, QA および受け入れ準備状況が審査され, ここでの議論をもとに, シリコンストリップセンサーの本量産がついに承認された. 2021 年 7 月より, 約 3.8 ヶ年にわたるセンサー量産が開始される予定である.

(2) シリコンピクセルセンサー性能評価

ITk シリコンピクセル検出器については, 日本グループ (筑波大の他 KEK など 8 大学・研究機関が参加) がモジュール製造までを担当する. 2019 年度末に, フェルミ国立加速器研究所において実機仕様に近いクワッドモジュールを用いたビームテストを実施したが, 2020 年度にはその解析を進めた. 本実験に用いたク

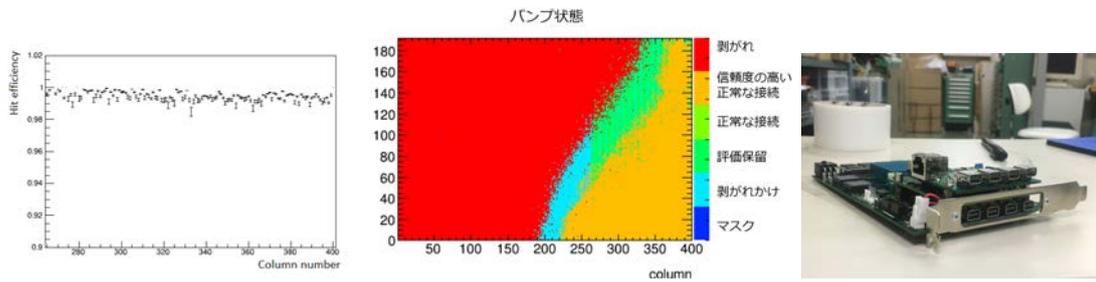


図 65 (左) ITk ピクセルウッドモジュールのビームテストで測定したヒット検出効率。(中) バンプ状態分類結果の一例。これは大きなバンプ剥がれがあったサンプルで、赤色で示された領域で剥がれが検出されている。(右) ITkpixv1 モジュール信号読み出し用に製作した読み出し信号処理ボード。

ウッドモジュールは、約 4 cm 角のシリコンピクセルセンサーに、約 1×2 cm 角の信号読み出し用集積回路 RD53A をバンプボンディングにより貼り合わせた構造となっているが、その全面において概ね 99% 以上の高い荷電粒子飛跡検出効率を確認した (図 65 左)。さらに、センサー中央の特殊構造を持つピクセルに関してより詳細な解析を行った。この部分は隣接する RD53A 同士の干渉を防ぐため、ピクセルサイズを 100 μm 幅に広げることでスペースを確保し、さらに信号読み出し用アルミ電極に隣接ピクセル上を通過させる構造になっている。したがって、この部分におけるクロストークの増加が懸念されたのであるが、本研究によりクロストークによる位置分解能の悪化は無視できるほど小さいことを確認した。この研究の中で、中央部ピクセルにおいて信号が正しく検出されない部分があることを同定した。これについて製造元と協議し、最終版では設計の微修正により改善されることとなった。

モジュール製造工程の中で、筑波大は主にセンサーと集積回路をバンプボンディングによって貼り合わせるフリップチップ工程の品質評価を行った。図 65 中に評価例を示す。この評価に用いた RD53A は、性能比較のため 3 つの異なる信号処理回路を搭載しており、それぞれの回路間の影響があることがわかっている。これに対し、各回路の最適なパラメータ設定を効率的に探し出し、さらにテスト入力電荷およびベータ線に対する応答性をうまく利用して、バンプボンディングが剥がれている部分を特定する手法を開発した。本研究で得られた手法を用いて合計 17 モジュールのフリップチップ品質を評価し、最終設計レビュー (final design review; FDR) で報告した。この結果、国内企業の一社がフリップチップ実施企業として認定され、日本国内で一貫したモジュール製造体制を確立することができた。

今後、実機用集積回路 ITkpix を用いた最終仕様ピクセルモジュールを試作し、ピクセルセンサーを含めた性能確認を行う。2020 年度に、その信号読み出しのためのシステム構築を開始した (図 65 右)。今後、試作モジュールの信号読み出し試験を行い、ピクセルセンサー FDR に向けて性能評価を実施していく。

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 検出器としては 1.3 mm 角のパッドタイプのものが HL-LHC 実験用に ATLAS に採用された。飛

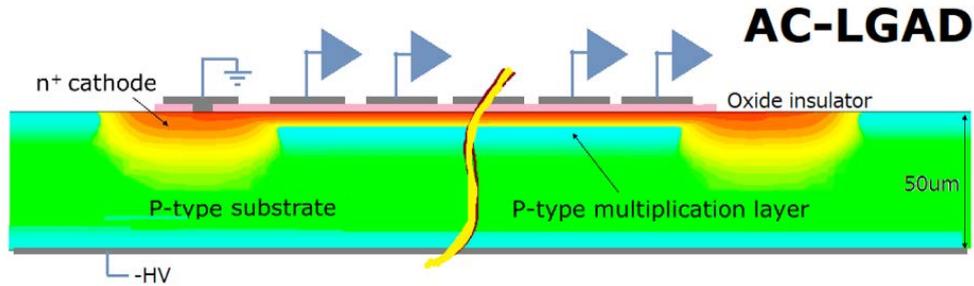


図 66 AC-LGAD 構造の概念図. 一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る.

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る. 2019 年は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 66 に AC-LGAD の概念図を示す. 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. 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し, 2020 年度に主として β 線を用いて実際の評価を進めた. また, 放射線耐性に関しても東北大 CYRIC で陽子線を照射して評価した.

電極細分化は $80 \mu\text{m}$ のピッチに分割したストリップ型検出器で評価した. 図 67 は, 通過する β 線に対して, 最大波高のストリップで規格化した隣接ストリップ電極での波高値の分布を示す. 隣接電極で平均して 65%, さらに隣では約 50% に減少する. この特性は電荷の広がりから位置情報を得る良い指標となるが, 広がりすぎると高粒子密度では使えなくなる. 図の右は, 図左の電荷の広がりを指数関数でフィットしたときの広がりのパラメータを n^{++} 電極の抵抗値の依存性として示した. A タイプは従来の LGAD (DC-LGAD) での抵抗値と等しく, 右に B \rightarrow E に従い抵抗は大きくなる. 予想通りに n^{++} 濃度が低い右ほど電荷の広がり小さい結果となった. 図には酸化膜厚を小さくし AC 電極との結合を増やしたサンプル (b 型) の結果も示している. 結合容量の大きな b サンプルは, わずかながらも広がり小さく抑えられる.

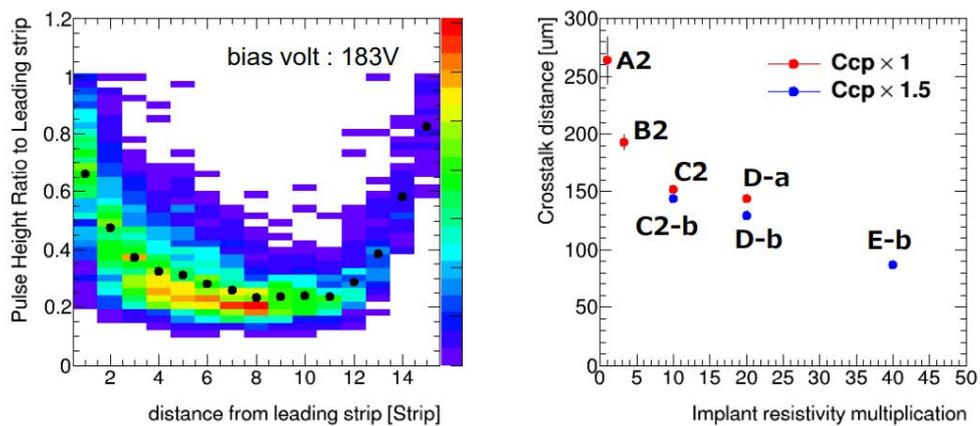


図 67 ストリップ型 LGAD での信号の広がりの評価. (左) 通過する β 線に対して, 最大波高のストリップで規格化した隣接ストリップ電極での波高値の分布. (右) 異なる n^{++} 濃度 (A-D) と酸化膜厚 (a,b) 条件での信号の広がりの依存性.

この電荷の広がり、境界部に β 線が入射したためのものか信号の広がり起因するものかは判定できない。テストビームによる詳細な評価を計画している。

将来の加速器実験で用いるには放射線耐性は不可欠な評価要素である。CYRIC では $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までの陽子線照射をした。図 68 には、C 2 タイプのサンプルに対し未照射、 $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ および $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ での電流-電圧特性を示す。アバランシェ増幅を開始することで電流が増幅するが、照射後も増幅機構が保たれている。

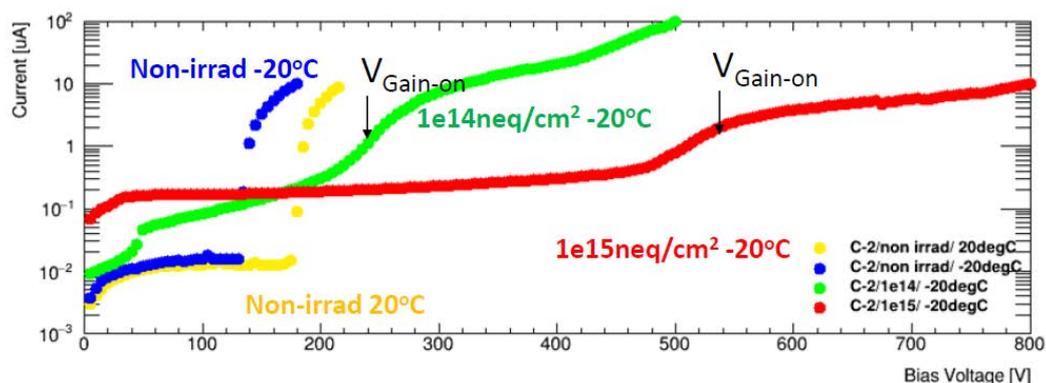


図 68 未照射および陽子線照射後の電流-電圧特性。未照射 (-20°C) では 140 V でアバランシェ増幅が始まる。照射後は増幅の開始電圧が上昇するが LGAD としての増幅機能は保たれている。

2020 年度は、前年度に試作した A-C 型の評価結果を受け、 n^{++} 電極濃度を低くした D, E 型と酸化膜厚を小さくした b 型を再試作した。まずは AC-LGAD がセンサーとして機能することが実証でき、さらに評価を重ねた結果、電荷の広がりとしては満足できるサンプル (E) を試作できたことは大きな成果である。一方で D, E 型の放射線耐性の評価は実施していないのでこれから行う。

本研究は日米技術協力の枠組み (代表 中村) で、米国のフェルミ研究所, LBL 研究所, UCSC 大学との連携で開発研究を推進している。センサーの基本部分の開発研究が大きく進み、今後はセンサー設計の詳細検討にくわえて、読出しのエレクトロニクスを海外と協力して開発していく。

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した素子である。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 $0.20 \mu\text{m}$ 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 年度から、PDD をもつセンサーの放射線耐性を評価している。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 3 D 積層した SOFIST4 の試作に成功した。2020 年度は TIA かけはしの新たなテーマとして「究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して」を開始した。

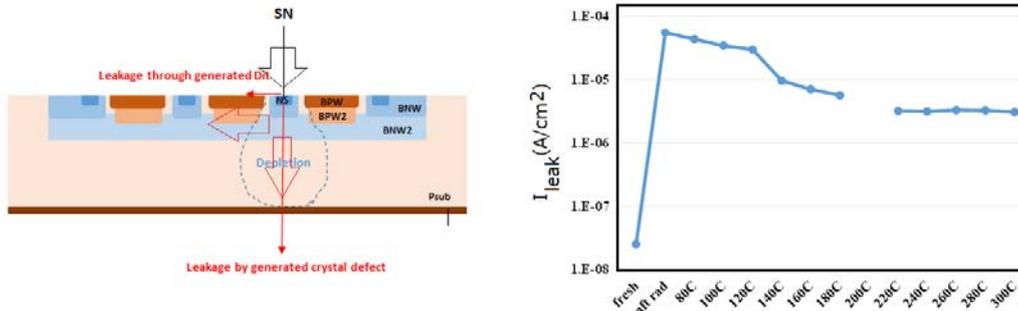


図 69 (左) PDD 構造をもつセンサーの放射線による暗電流成分増加に対する寄与、(右) 1×10^{14} neq/cm² の陽子線照射を行った PDD ピクセルセンサーの初期暗電流と照射後の等時間間隔アニーリング測定での暗電流の変化。

(1) PDD 構造をもつセンサーの放射線損傷の基礎研究 (原, 倉知)

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、同時に SOI 回路に対して裏面に加えるバイアス電圧からの影響 (バックバイアス効果) を抑える機能がある。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もある。2019 年度は PDD 構造をもつセンサーの ⁶⁰Co γ 線照射試験を行ったが、2020 年度は CYRIC での陽子照射を行った。⁶⁰Co γ 線照射でも陽子照射でも比較的大きな暗電流が発生したが、暗電流は図 69 に示すように、バルク部損傷による効果と界面の損傷による効果に大別でき、前者は陽子線照射で特有な効果である。そこで、2つの効果を分離評価できるようなテスト素子を用い、さらに照射後に温度を加えた後の暗電流測定を温度を増加させながら繰り返す測定 (等時間間隔アニーリング測定) を行った (図 69 右)。温度を加えることで界面損傷の効果は消失するが、照射直後の暗電流値は最終的に 9 割が消失するのでこれが界面損傷の寄与と推定できる。MOS-FET の動作原理から、このデータを定量的解析し両者の効果を分離評価した。結果は論文としてまとめる。

(2) KEK AR-TB に用いるトラッカー開発 (原)

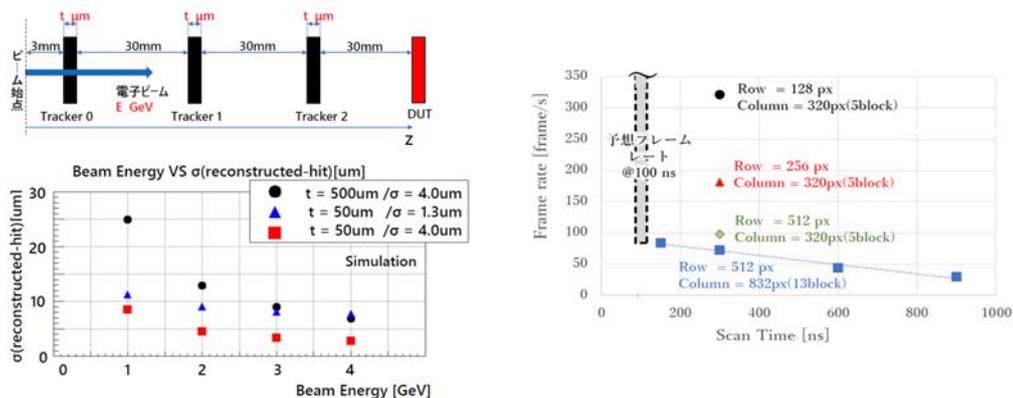


図 70 (左) GEANT 4 シミュレーションで DUT 位置でのトラッカー飛跡の位置分解能を電子のエネルギーの関数として評価した。(右) 現有のシステムで計測したデータ収集レート

SOI ピクセルセンサーの特筆できる利点は高位置分解能と低物質量化である。KEK では TRISTAN の入射蓄積リングに最大 5 GeV の電子ビームを用いたビームラインを整備中で、これは世界的にはドイツ DESY 研究所のラインに匹敵する電子テストビームラインとなる。このエネルギー領域の電子はクーロン多重散乱の影響を受けやすく、SOI ピクセルを用いることで同ビームラインの性能を最大限発揮できるトラッカーが実現できる。図 70 は GEANT4 シミュレーションにより、3 枚の SOI ピクセル検出器で達成できる DUT 位置での位置分解能を示す。シミュレーションではピクセルサイズが $17\ \mu\text{m}$ 角の INTPIX 4 を想定し、センサー厚は 500 と $50\ \mu\text{m}$ 、またセンサー内での拡散効果をパラメータにしている。4 GeV では $7\ \mu\text{m}$ もしくは薄くすること $3\ \mu\text{m}$ も期待できる。

このシミュレーション結果を受け、INTPIX 4 の改良版である INTPIX 4 NA 用のボードを設計試作し、読みだし試験を行った。今後は現センサー (300 μm 厚) でのビーム試験と薄型化のための研究を進める。高速読み出しのための FPGA ボードの改良も行っていく。

福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミュオンによる観測(原・金)

ミュオン粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュオン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 (ミュオンラジオグラフィ法)。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。

2020 年には 2 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が圧力容器の下部に堆積している) が PTEP から出版された。

COBAND 実験 遠赤外域光検出器の開発(金, 武内)

COBAND 実験は、当センター素粒子構造研究部門を中心とする国際共同プロジェクトであり、現在観測値として与えられているニュートリノ寿命下限値 10^{12} 年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を探索する実験を計画中である。

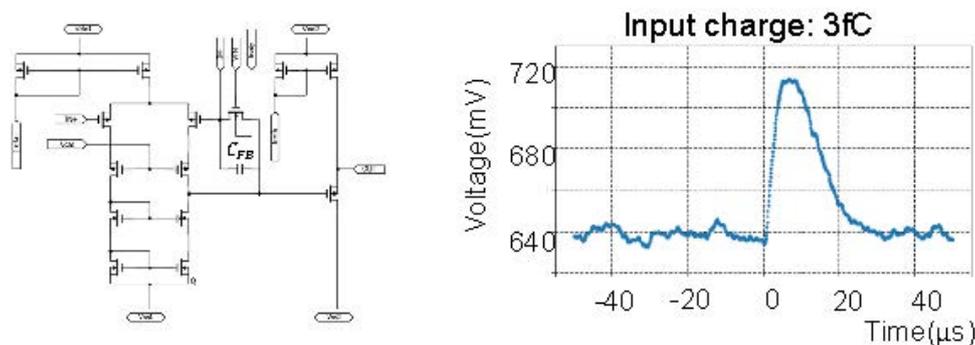


図 71 SOI 技術を用いて製作された 60 fF の容量性負帰還を持つ差動増幅回路による電荷積分型増幅器と 3 fC のテスト電荷入力に対する出力。

我々のグループでは、光子計測器開発部門の光検出器開発プロジェクトの一つとして、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 $\Delta = 1.55\ \text{meV}$, $T_c = 9.23\ \text{K}$) を検出体、アルミニウム ($\Delta = 0.172\ \text{meV}$, $T_c = 1.20\ \text{K}$) 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ハフニウムを超伝導体とし

て用いた Hf-STJ ($\Delta = 20 \mu\text{eV}$, $T_c = 0.165 \text{ K}$) を光検出器の候補として研究開発を続けている。

Nb/Al-STJ 素子については、産総研 CRAVITY との共同研究によって、漏れ電流の少ない素子の開発が行われ、要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した。しかしながら、冷凍機内の極低温ステージ上の 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、 0.4mV 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 ($E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$) に対する期待される出力電荷は、約 $250 e$ (0.04 fC)、(c) STJ からの信号の待数数は数 μ 秒と比較的速く、対して STJ 自身の静電容量は、数十 pF ~数 nF と大きい、という理由によりこの実現は極めてチャレンジングと言える。

そこで、我々のグループでは信号読出系として KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。これまでの研究成果として、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いたソース接地増幅回路の比較的簡単な増幅器の試作、及び極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号を同じ極低温ステージ上での増幅読出に成功等がある。また、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって実現された低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器を試作し、極低温での動作及び STJ 信号の電荷読出し試験等に成功している。2020 年度における成果としては、この電荷積分型増幅器の負帰還容量を従来の 300 fF から 60 fF に変更した高利得増幅回路の動作を確認した (図 71)。しかし、実測により入力インピーダンスが想定よりも一桁大きく、STJ からの電荷信号が増幅器にほとんど伝達されていないことが明らかになり、差動増幅回路部の開ループ利得及び利得帯域幅積を一桁以上改善することが必要であることが判明し、今後の課題とされた。

また、Hf-STJ の開発においては、韓国 IBS のグループとの共同研究によって X 線単一光子に対する応答を無冷媒断熱消磁冷凍機を用いて測定し、Hf-STJ として世界で初めて ^{55}Fe からの X 線域単一光子に対する応答信号を分解能 6.7% で確認することに成功し、この成果について、論文執筆のための測定データ解析を進めている (図 72)。

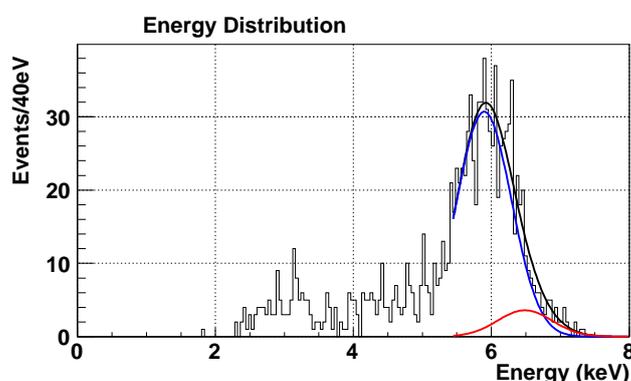


図 72 $200 \mu\text{m}$ 角の Hf-STJ に冷凍機内で ^{55}Fe からの X 線を照射し得られた X 線単一光子に対するエネルギー分布。 ^{55}Fe の $K\alpha, K\beta$ のエネルギー比及び強度比は既知として、分布から 5.9 keV のエネルギーに対して分解能 6.7% を得た。

COBAND 実験の詳細は素粒子構造部門の章に記述されている。

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、幾つかの問題点を特定し、2020 年 1 月には販売前の Eiger-1M を試験利用した。しかしながら 2020 年度は Covid-19 の影響で SPring-8 の共同利用が停止され、特筆できる成果は挙げられていない。

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。現在、実験成果の投稿論文の査読結果に対応中である。

(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。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。研究成果は Chemistry Letters の優秀論文に選定され (図 73)、また、いくつかの企業との共同研究の開始した。筑波大学 2020 年の Best Faculty Member にも選出された。

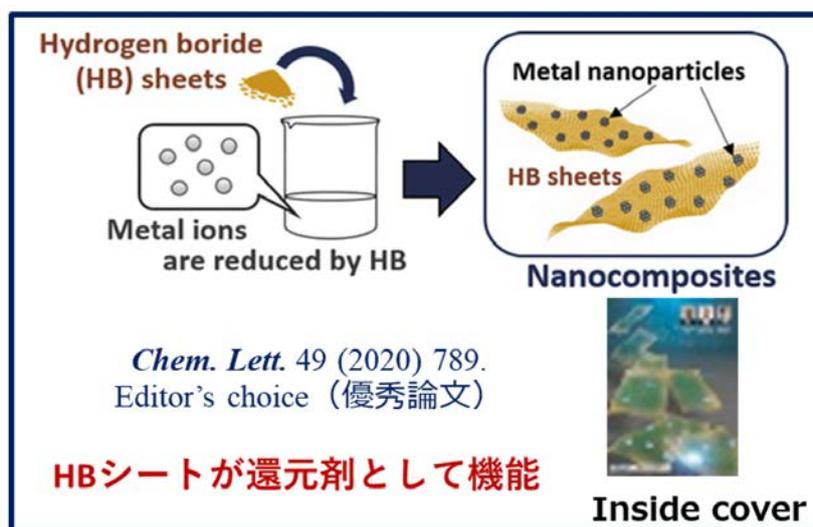


図 73 ホウ化水素シートが還元剤として機能することを示した論文は優秀論文に選定された。

〈論文〉

1. K. Sato, *et al.*, (K. Hara, K. Onaru, D. Harada, S. Wada), “Characteristics of silicon strip sensor irradiated up to a proton fluence of 10^{17} n_{eq}/cm²”, Nucl. Inst. Meth. A982 (2019) 164507.
2. H. Murayama, *et al.*, (K. Hara, H. Yamauchi, R. Abe, S. Iwanami, K. Watanabe, Y. Okada), “Development of monolithic SOI pixel sensors capable of fine measurements of space and time”, Nucl. Inst. Meth. A982 (2019) 164417.
3. K. Hara, *et al.* (D. Harada, K. Onaru, K. Sato, S. Wada), “Charge collection study with the ATLAS ITk prototype silicon stripsensors ATLAS17LS”, Nucl. Inst. Meth. A982 (2019) 164422. (国際共同研究) .
4. M. Mikesikova, *et al.* (K. Hara, K. Onaru, K. Sato, S. Wada), “Electrical characterization of surface properties of the ATLAS17LS sensors after neutron, proton and gamma irradiation”, Nucl. Inst. Meth. A982 (2019) 164456. (国際共同研究) .
5. J. Fernandez-Tejero, *et al.* (K. Hara, S. Wada), “Humidity Sensitivity of Large Area Silicon Sensors: Study and Implications”, Nucl. Inst. Meth. A982 (2019) 164406. (国際共同研究)
6. H. Fujii, *et al.* (K. Hara, S.H. Kim), “Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography”, PTEP Vol. 2020, Issue 4, Apr 2020, 043C02.
7. H. Fujii, *et al.* (K. Hara, S.H. Kim), “Investigation of the status of Unit 2 nuclear reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography”, PTEP Vol. 2021, Issue 2, Feb 2021, 023C01.
8. S. Wada, *et al.* (K. Onaru, K. Hara), “Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector,” PoS **Vertex2019**, 057 (2020) doi:10.22323/1.373.0057.

〈国際会議の実施〉

1. 29th Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020), online, October 5-8, 2020, Organizing Committee Chair: Kazuhiko Hara

〈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]

1. Kazuhiko Hara, “Welcome and Introduction to VERTEX2020”,
29th Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020), online, October 5-8, 2020. (招待講演)
2. Koji Nakamura, “First prototype of finely segmented HPK AC-LGAD detectors”,
29th Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020), online, October 5-8, 2020. (招待講演)
3. Takashi Iida, “Lecture on Neutrino-less double beta decay”,
Vietnam School on Neutrinos (VSON) 2020 @Online, Dec. 12 - Dec. 17, 2020 (招待講演)

[国内学会]

1. 原和彦：4次元飛跡検出器の開発,
宇宙史研究センター 2020年度第1回構成員会議・成果報告&交流会 (2020年6月15日), オンライン (招待講演)
2. 近藤剛弘：紫外線照射で水素放出が誘起されるホウ化水素シート,
宇宙史研究センター 2020年度第1回構成員会議・成果報告&交流会 (2020年6月15日), オンライン (招待講演)
3. 齊藤功太：HL-LHC ATLAS で用いるストリップ型シリコンセンサーの品質管理および品質保証システムの構築とデータ解析,
日本物理学会 2020年秋季大会 (2020年9月14-17日), オンライン (一般講演)
4. 佐藤勝哉：HL-LHC ATLAS 内部飛跡検出器アップグレードに向けたクワッド型ピクセルセンサーのテストビームを用いた性能評価,
日本物理学会 2020年秋季大会 (2020年9月14-17日), オンライン (一般講演)
5. 植田樹：高時間分解能半導体検出器 (LGAD) に関する基礎研究と性能評価,
日本物理学会 2020年秋季大会 (2020年9月14-17日), オンライン (一般講演)
6. 浅野千紗：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 V,
日本物理学会 2020年秋季大会 (2020年9月14-17日), オンライン (一般講演)
7. 原和彦：ATLAS ITk ストリップ型シリコン検出器の初期量産,
宇宙史研究センター 2020年度第2回構成員会議・成果報告&交流会 (2020年11月30日), オンライン (招待講演)
8. 中村浩二：高時間分解能検出器 (LGAD) の電極細密化に関する研究,
宇宙史研究センター 2020年度第2回構成員会議・成果報告&交流会 (2020年11月30日), オンライン (招待講演)
9. 武内勇司：COBAND プロジェクトにおける STJ 信号読出のための極低温 SOI 増幅器の開発,
宇宙史研究センター 2020年度第2回構成員会議・成果報告&交流会 (2020年11月30日), オンライン (招待講演)
10. 熊倉泰成：HL-LHC ATLAS ピクセル検出器におけるバンパ接合評価試験手法の比較,
日本物理学会第76回年次大会 (2021年3月12-15日), オンライン (一般講演)
11. 齊藤功太：HL-LHC ATLAS で用いるストリップ型シリコンセンサー品質保証システムの構築,

- 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン (一般講演)
12. 石井達也: HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの試験量産中の品質保証測定の結果, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン (一般講演)
 13. 中原瑛衣子: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XII, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン (一般講演)
 14. 北彩友海: 新型 LGAD 飛跡検出器 (ACLGAD) の信号とクロストークの評価とシミュレーションによる動作原理の検証, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン (一般講演)
 15. 植田樹: 新型 LGAD 飛跡検出器 (ACLGAD) の増幅層の放射線耐性に関する研究, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン (一般講演)
 16. 鈴木尚紀: SOI ピクセル検出器による KEK テストビームライン AR-TB 用テレスコープシステム構築, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン (一般講演)
 17. 中原瑛衣子: COBAND 実験に向けた極低温高利得電荷積分型前置増幅器の性能評価, 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 23 日), オンライン (一般講演)
 18. 武内勇司: Study of HF-STJ for single X-ray photon detector, 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン (一般講演)
 19. 中村浩二: D development of an AC-LGAD sensor with fine time and spatial resolutions 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン (一般講演)
 20. Shigeki Hirose: Production of ATLAS ITK silicon detectors - Japanese Contribution 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン (一般講演)
 21. Hisanori Suzuki: Development of a telescope system based on SOI pixel technology for the KEK test beamline AR-TB 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン (一般講演)
 22. 原和彦: 素粒子実験でのシリコン検出器 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン (一般講演)
 23. 植田 樹: 新型 LGAD 飛跡検出器 (ACLGAD) の細密化と放射線耐性に関する研究 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン (一般講演)
 24. 斉藤 功太: HL-LHC ATLAS 実験用ストリップ型シリコンセンサー本生産に向けた品質保証システムの改良 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン (一般講演)
 25. 石井達也: HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの試験量産中の品質保証に関する測定 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン (一般講演)
 26. 熊倉泰成: 読み出し試験および形状測定による HL-LHC ATLAS シリコンピクセル検出器のパンプ接合品質評価 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン (一般講演)
 27. 村田仁慈: HL-LHC ATLAS 実験用 pixel センサーの量産に向けた品質テストの体制 筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン (一般講演)

〈競争的資金〉

1. 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 2,500 千円, 間接経費 750 千円) (2020 年度)
2. 科学研究費 基盤研究 (B) 「超伝導体素子による極低閾値検出器開発と sub-GeV 領域暗黒物質探索への展開」 2020-2022 年度, 研究代表者: 武内勇司, 6,370 千円 (直接経費: 4,900 千円, 間接経費: 1,470 千円) (2020 年度)
3. TIA かけはし 「究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して」, 2020 年度, 研究分担者: 原和彦, 100 千円 (2020 年度)
4. 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 (2020 年度)
5. 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 (2020 年度)
6. 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 (2020 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, 2021 年 2 月

1. 佐藤 勝哉: HL-LHC ATLAS 実験に向けたクアッド型ピクセルセンサーの性能評価, 2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)
2. 中原瑛衣子: COBAND 実験に向けた極低温高利得電荷積分型前置増幅器の性能評価, 2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)

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〕
〔教理物質系部局細則第4号〕

改正 平成30年教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事
- (2) 研究活動等の評価に関する事
- (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) 事業計画に関する事
- (2) 予算に関する事
- (3) 施設の管理に関する事
- (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74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74 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)	(選取肢が「その他」の場合など) 追記事項
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	¥183,000	国立極地研究所研究集会
教授	久野成夫		共同研究	国立天文台共同開発研究	南極30cm望遠鏡用500GHz帯広帯域2SB受信機の開発	¥2,600,000	
助教	橋本拓也		科研費補助金・学術研究助成金	研究活動スタート支援	成層圏赤外線天文台で暴く近傍銀河の電離光子放射メカニズム	¥1,100,000	
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	¥8,000,000	
教授	愛川史彦	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	吉田拓生		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(C)	ニュートリノ崩壊光子検出器較正用超低エネルギー光子ハルス照射システムの開発	¥650,000	
教授	石橋延幸		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(C)	超弦の場の理論を用いた超弦理論のダイナミクス研究	¥910,000	
准教授	伊教香郎		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(C)	行列模型による超弦理論の非摂動的定式化の研究	¥1,040,000	
准教授	武内勇司		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(B)	超伝導体素子による極低温検出器開発とsub-GeV領域暗黒物質探索への展開	¥17,680,000	
助教	飯田崇史		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(B)	大発光量無機シンチレータで目指す宇宙史研究	¥4,030,000	
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	基礎研究(A)	蓄積リングの質量測定によるハロー原子核の探索	¥4,290,000	
助教	森口哲朗		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(C)	中性子星の構造解明に向けた重い中性子過剰核のスピン厚測定	¥3,380,000	
准教授	笹公和	三宅美沙	科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(S)	過去1万年間の太陽活動	¥1,000,000	
准教授	笹公和	松嶋浩之	科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(B)	高極アイスコアの高解像度分析による放射性ヨウ素・塩素のフォーリアルアウト変動の解明	¥450,000	
准教授	笹公和	堀内 一穂	科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(B)	高解像度マルチアーカイブ分析による太陽地磁気変動と宇宙線イベントの解明	¥500,000	
准教授	笹公和	松四 雄騎	科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的研究(開拓)	宇宙線生成核種の分析にもとづく断層活動度の新しい評価法の開発と検証	¥1,000,000	
講師	中條達也		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(S)	LHC 超前方光子測定によるグルーオン飽和とQGP生成起源	¥29,250,000	
講師	中條達也	杉立徹	科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(B)	LHC鉛原子核衝突:フォトンで探る極初期状態(initial stage)	¥250,000	
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	¥850,000	
講師	中條達也		共同研究	TYL-FJPPPL 日仏事業(KEK-CNRS)	QGP Tomography with photons, jets, and heavy flavors	¥400,000	
教授	江角晋一		科研費補助金・学術研究助成金	基礎研究(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	¥22,750,000	
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	原和彦	原和彦	科研費補助金・学術研究助成金	2019年度 基礎研究(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	¥3,250,000	間接経費¥750,000を含む
准教授	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	原和彦	倉知郁夫	その他	TIAかけはし	究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して	¥100,000	

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	追記事項
講師	中條達也	CERN欧州原子核研究機構(スイス)		2007-	LHC-ALICE実験、フロー・HF・ジェット研究	
教授	江角晋一	BNLブルックヘブン国立研究所(スイス)		2016-	RHIC-STAR実験、臨界点探索・QCD相構造研究	
准教授	原和彦	Marie-Hélène Genest (LAL)	2500 ユーロ	2019-2020	Looking for dark-sector long-lived particles with ATLAS	FJPPPL
准教授	原和彦	Vitaliy Fadeev et al. (USCS/CERN/others)		2005-	Construction of Strip Detector for HL-LHC ATLAS Itk	ATLAS
准教授	原和彦/ 中村浩二(KEK)	Reisaburo Tanaka (LAL)	¥250,000	2019-	New Challenge for Internal Pixel Tracker construction (2019-2024)	FJPPPL

17 各種受賞等

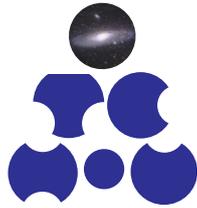
職名	構成員名	(共同の場合) 共同受賞者名	賞名	受賞課題・受賞論文名	受賞年・月・日	団体名	団体規模等	賞の位置付け・格等	追記事項
助教	飯田崇史		研究部共同利用・共同研究第9回若手萌芽研究最優秀賞	二重ベータ崩壊探索用シンチレータ結晶の新規開発	2020.10.6	東北大学金属材料研究所	http://simt.www.ty.tohoku.ac.jp/research/rde/news-20201006.html	東北大学金属材料研究所は共同利用研究の促進のため、若手萌芽研究の採択課題の中から優れた成果を上げた課題を、研究部共同利用・共同研究若手萌芽研究最優秀賞として表彰している。	
その他	奈良誠大		第25回大気科学討論会学生優秀発表賞	超伝導サブミリ波リム放射サウンド(SMILES)の広範囲観測による塩化水素の鉛直分布プロファイルの妥当性検証	2020.11.13	日本大気化学会		優秀な研究成果発表を行った学生会員を、日本大気化学会として表彰する賞である。	本研究は、笠井容員教授の指導のもとに行われたものである。

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	追記事項
助教	橋本拓也	小島崇史ら国際研究チーム	プレスリリース	国立天文台と東京大学などの国際研究チームのすばる望遠鏡の大規模データと機械学習に基づく新手法を適用した研究のプレスリリース。「今の宇宙に残された、形成初期の銀河を発見-すばる望遠鏡と機械学習で銀河の酸素量の世界記録を更新」	2020.8.1	http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/9187/
助教	橋本拓也	小島崇史ら国際研究チーム	日本経済新聞	国立天文台と東京大学などの国際研究チームのすばる望遠鏡の大規模データと機械学習に基づく新手法を適用した研究記事が掲載。「赤ちゃん銀河を発見、年齢1000万年」	2020.8.1	https://www.nikkei.com/article/DGXMZO62146030R30C20A7000000/

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
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 -
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 -
その他	佐藤構二, 飯田崇史	事務局代表	高エネルギー物理学研究者会議	2020年度
准教授	原和彦	International Advisory Committee	Vertex2020	2012-
准教授	原和彦	NSS Topic Convenor	IEEE NSS	2019-2020
准教授	原和彦	MG委員	TIA光子計測	2018-



筑波大学 数理物質系
宇宙史研究センター

Tomonaga Center for the History of the Universe
(TCHoU)

〒305-8571

茨城県つくば市天王台 1-1-1

URL: <https://tchou.tomonaga.tsukuba.ac.jp/>

email: TCHoU@tchou.tomonaga.tsukuba.ac.jp

phone: 029-853-3724

fax: 029-853-6305