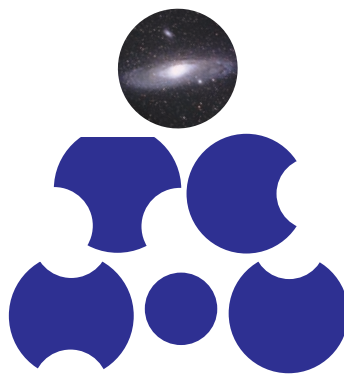


筑波大学 数理物質系
宇宙史研究センター

2022 年度
活動報告書



宇宙史研究センター

2023 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指し、素粒子構造研究部門、クォーク・核物質研究部門、南極天文学研究部門、光量子計測器開発部門の 4 部門が精力的に研究を行っています。

素粒子構造研究部門では、主に（１）ビーム衝突型の高エネルギー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、の三つの研究を進めています。クォーク・核物質研究部門では、主に（１）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、（２）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、（３）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、の三つの研究を進めています。南極天文学研究部門では、（１）テラヘルツ天文学の開拓を目指した南極天文学の推進、（２）既存の装置による星形成、銀河の形成・進化の観測的研究、を進めています。光量子計測器開発部門では、超電導検出器、SOI 技術、LGAD 検出器を軸とした光量子計測器開発を推進しています。

各部門が、それぞれ重要なプロジェクトを推進するとともに、部門間の交流や連携も年々強まってきており、分野をまたいだ共同研究も始まっています。今後、さらにそれらを発展させていくとともに、宇宙での生命誕生の謎まで含めた宇宙史の理解のために、化学分野、生命分野などとの連携も視野に、より学際的に体制の強化を図っていきたいと思っています。

この報告書は、宇宙史研究センターの、2022 年度の活動実績をまとめたものです。昨年度に続き、2022 年度も新型コロナウイルスのため難しい状況でしたが、センター構成員の努力によって得られた成果をご覧くださいだけですと幸いです。

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。

2023 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	宇宙史研究センターについて	3
1.1	設置の経緯	3
1.2	研究目的	3
1.3	朝永センターの名称について	4
1.4	宇宙史研究センターの構成	5
1.5	宇宙史研究センターの運営体制	6
1.6	宇宙史研究センターの活動スペース	7
2	2022 年度活動概要	8
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	13
5	各種会議	15
5.1	構成員会議	15
5.2	運営協議会	16
5.3	運営委員会	18
6	研究集会・セミナー	19
6.1	Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022 「宇宙の進化と物質の起源」	19
6.2	第 31 回国際ワークショップ Vertex2022	19
6.3	国際ワークショップ ”2nd International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE”	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	筑波大学公開講座「宇宙の歴史」	23
7.2	第 13 回天文宇宙の七夕講演会	24
8	2022 年度会計報告	25

第 II 部	研究部門活動報告	26
9	南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy)	28
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)	61
12	光子計測器開発部門 (Division of Photon and Particle Detectors)	92
12.1	HL-LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発	94
12.2	LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発	97
12.3	SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発	101
第 III 部	資料	107
13	センター細則	109
14	ロゴ	111
15	競争的資金獲得状況	112
16	共同研究・受託研究	113
17	各種受賞等	113
18	新聞等報道・特記事項	114
19	学会活動・各種委員等	114

第I部

全体報告

1 宇宙史研究センターについて

1.1 設置の経緯

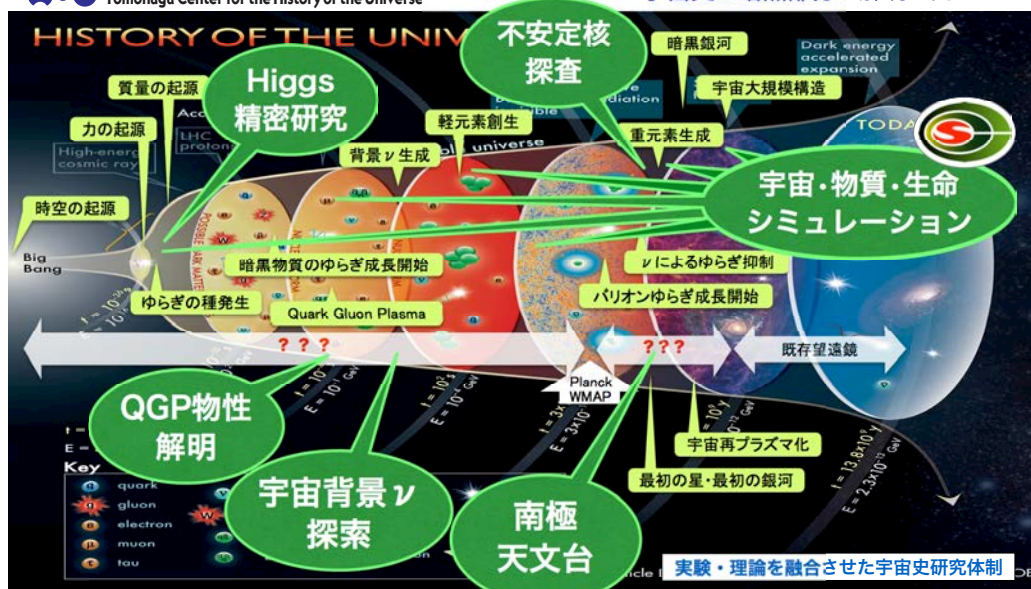
筑波大学宇宙史研究センター（Tomonaga Center for the History of the Universe: 朝永センター）は、2016年の筑波大学第3期中期計画・中期目標にむけた構想に従って2017年に行われた筑波大学数理物質系に属する二つ研究センター（学際物質科学研究センターと数理物質融合科学センター）の改組再編に基づき、数理物質融合科学センター（Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering: CiRfSE「サーフス」）の宇宙史国際研究拠点と光量子計測器開発推進室を核として、2017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

1.2 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。



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

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

図1 宇宙史研究センターの研究目的

1.3 朝永センターの名称について

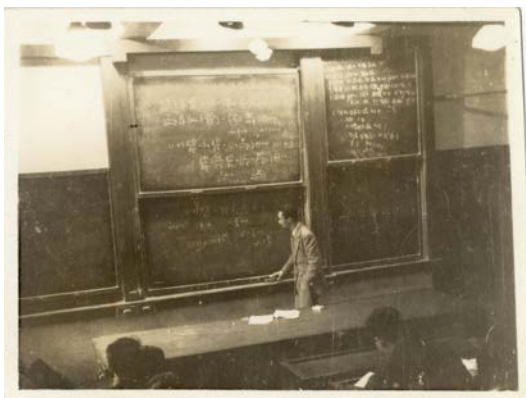


図2 朝永振一郎博士(1906-1979)。右は、東京教育大学理学部(大塚)での量子力学の講義、1960年頃。(写真:筑波大学朝永記念室蔵)

TCHoUの英語名に含まれる Tomonaga Center (朝永センター)の名称は、超多時間理論や、くりこみ理論、集団運動の理論など、現代物理学の構築、特に相対論的場の理論の基礎の構築に多大な功績を残された、ノーベル賞物理学者 朝永振一郎博士にちなんでいる(図2)。

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

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

1.4 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、1.2 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

源を探究するために、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誕生した銀河の形成・進化の過程を解明するために、南極にテラヘルツ電波望遠鏡を建造するプロジェクトを推進する。そのための観測器開発と、既存望遠鏡による宇宙観測研究を遂行する。

光子計測器開発部門 – 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。

1.5 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。

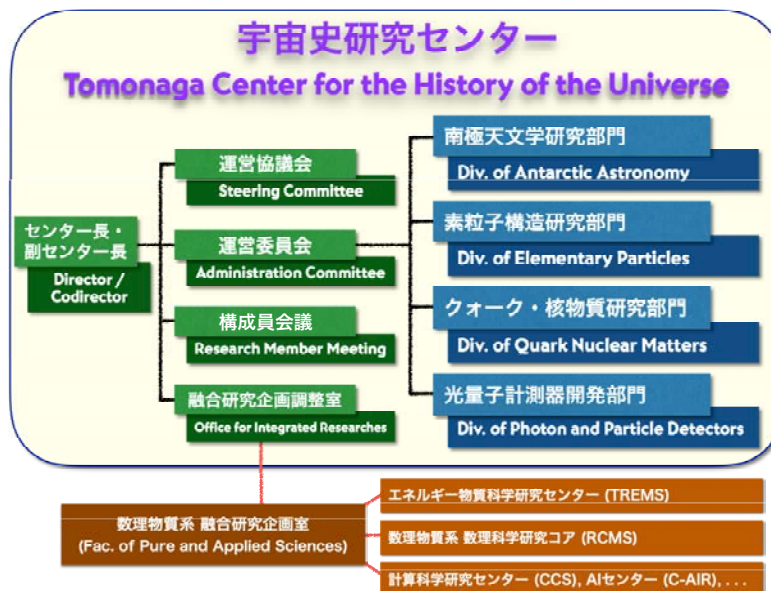


図4 宇宙史研究センターの運営体制

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。

1.6 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。

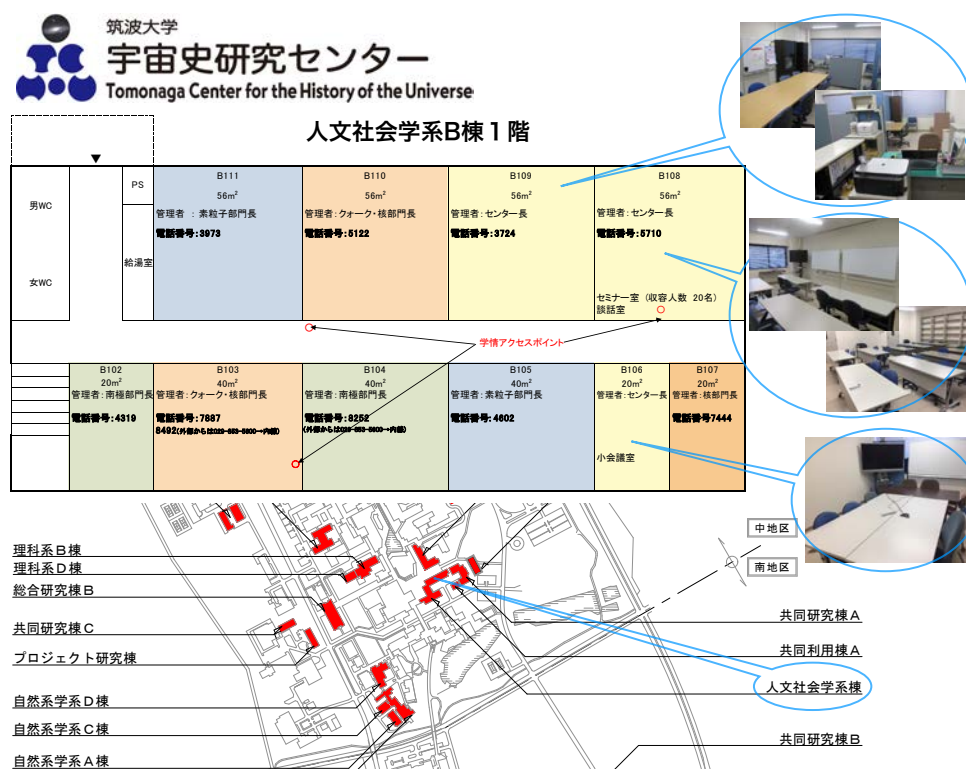


図 5 宇宙史研究センター活動スペース

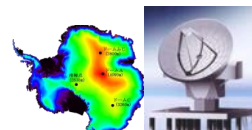
2 2022 年度活動概要

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2022年度活動概要を、以下にまとめる。

➤各研究部門の活動

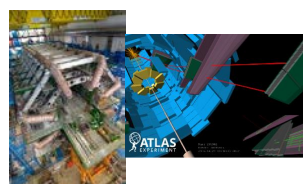
・南極天文学研究部門

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



・素粒子構造研究部門

- ・ 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

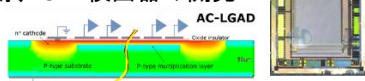


・クォーク・核物質研究部門

- ・ 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

- ・ 本多俊介 助教 2022/6/1 着任
- ・ Norbet Novitzky 助教 2022/6/30 退職
- ・ 谷口裕介 准教授 2022/7 逝去
- ・ 原 和彦 准教授（光量子検出器開発部門長） 2023/3 退官

➤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 2022年6月24日（全体報告＋10講演） ハイブリッド
 - ・ 第2回 2022年11月28日（全体報告＋12講演） ハイブリッド

➤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
 - ・ 2022年度 4/11, 5/9, 6/13, 7/4, 9/14, 10/11, 11/14, 12/19, 1/13, 2/20, 3/13

➤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 2023年3月1日 ハイブリッド

➤宇宙史セミナー

- 2022/5/27 受川 史彦(筑波大学)“CDF実験の歴史と初期の物理結果, および Wボソン検出について”
佐藤 構二 (筑波大学)“CDF実験でのWボソン質量の精密測定”
- 2022/8/1 Nu Xu (LBNL) “Recent Results from RHIC Beam Energy Scan and Future Perspectives of Physics at High Baryon Density”
- 2022/10/31 音野瑛俊(九州大学)“FASER実験の最新状況”
- 2023/2/24 永井義一(ハンガリーELTE大学)“NA61/SHINE 実験における長基線ニュートリノ実験のためのハドロン生成精密測定”
- 2023/3/8 田島 治(京都大学)“CMB++”

➤研究集会

- 2022/9/28 Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022, “Universe Evolution and Matter Origin”
 - オンライン 参加者68名
- 2022/10/24-28 第31回国際ワークショップ Vertex2022
 - 館山リゾートホテル 参加者 67名
- 2023/3/13-15 国際ワークショップ “2nd International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE” (TCHoUワークショップを兼ねる)
 - 筑波大学 参加者 67名
- TCHoHワークショップ
 - 南極天文 2023/2/28、素粒子構造 2023/3/23、光量子 2023/3/22

➤受賞など

- 2022/4 野中俊宏 助教
2022年八木浩輔クォークマターアワード(八木アワード)
「素粒子実験半導体センサーの発展とその社会貢献」
- 2022/10/14 北彩友海(修士2年)
日本物理学会学生優秀発表賞
「新型LGAD検出器(AC-LGAD)の電極細密化に関する研究」
- 2023/3/1 飯田崇史 助教
2022年度 コニカミノルタ画像科学奨励賞
「放射線粒子の色を見る！革新的シンチレーション検出器の開発」
- 2023/3/3 飯田崇史 助教
2023年 日本アイソトープ協会奨励賞
「 ^{48}Ca の極稀崩壊研究のための検出システムの高度化」

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。2022 年度当初の構成教員・連携教員を図 6 に、2023 年度当初の構成教員・連携教員を図 7 に、それぞれ示す。2022 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：橋本拓也(a)

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)

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)、浅野侑磨(a)、金 信弘(p特命)

連携教員：松浦周二(p客員:関西学院大)、吉田拓生(p:福井大)、佐藤勇二(ap:福井大)

クオーク・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)、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、Ashutosh Kumar Pandey、鈴木伸司

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(p)、武内勇司(ap)、廣瀬茂輝(a)、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)

2022/04

図 6 宇宙史研究センター構成教員・連携教員（2022/4）：a/l/ap/p はそれぞれ、助教/講師/准教授/教授を表す。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。

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



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：橋本拓也(a)、本多俊介(a)、徂徠和夫(a:CA: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)、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)、矢島秀伸(ap:CCS)

研究員：高水裕一(CCS)

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)、佐藤構二(l)、飯田崇史(a)、廣瀬茂輝(a)、
浅野侑磨(a)、金 信弘(p特命)

連携教員：松浦周二(p客員:関西学院大)、池上陽一(ap客員:KEK)、佐藤勇二(ap:福井大)

研究員：原 和彦

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)、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)、Thomas Peitzmann(p海外unitPI: Utrecht大)、

Marco van Leeuwen(p海外unitPI: Utrecht大)、Jonghan Park(a海外unit: Utrecht大)

連携教員：藏増嘉伸(p)、笹公和(ap)、森口哲朗(a)、杉立 徹(p特任:広大)、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)、

佐甲博之(pCA:原研)、齋藤武彦(p客員:理研)、山口由高(ap客員:理研)、山口貴之(ap客員:埼玉大)、

小沢恭一郎(ap客員:KEK)、稲葉 基(ap客員:筑波技大)

研究員：坂井真吾

光子計測器開発部門 部門長：小澤 顕(p)

構成教員：江角晋一(p)、武内勇司(ap)、廣瀬茂輝(a)、本多俊介(a)、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)、倉中村浩二(a:KEK)、

山田美帆(a:都立産業技術高専)

研究員：原 和彦

2023/04

図 7 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2023/4)

3.1 国際テニュアトラック教員

「国際テニュアトラック教員」とは、「国立大学法人 筑波大学 研究力強化実現構想」(2012)に基づいて筑波大学に導入された教員枠で、海外連携機関に一定期間以上派遣し、国際共同研究体制の強化を目的としている。

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。

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。

3.3 クロス・アポイントメント教員

CiRfSE 時代に、宇宙史研究の拠点形成に向けた国内連携体制を強固なものとするために、密接な共同研究を進めている連携先の教員とその所属機関と交渉し、合意が得られた 6 名についてクロス・アポイントメントの協定を結んでいる。筑波大学における業務割合は 10% である。2021 年度で契約期間が終了したが、南極天文学研究部門に徂徠和夫教授（北海道大学）が、素粒子構造研究部門に池上陽一教授（KEK）が、クォーク・核物質研究部門に山口貴之准教授（埼玉大学）、小沢恭一郎准教授（KEK）、佐甲博之教授（原研）が、2022 年 10 月からクロス・アポイントメントを再開し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ている（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。CiRfSE 時代に、南極天文学研究部門に西堀俊幸准教授（JAXA、2017 年 3 月 1 日委嘱）、笠井康子教授（情報通信研究機構、2017 年 5 月 1 日委嘱）、素粒子構造部門に松浦周二教授（関西学院大学、2017 年 11 月 1 日委嘱）、クォーク・核物質部門に秋葉康之教授（理研、2017 年 6 月 1 日委嘱）、杉立徹教授（広島大学、2017 年 6 月 1 日委嘱）、濱垣秀樹教授（長崎総合大学、2017 年 6 月 1 日委嘱）、若杉昌徳教授（理研、2017 年 6 月 1 日委嘱）がそれぞれ配置された。2021 年度には、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。2022 年度には、クォーク・核物質研究部門に筑波技術大学から稲葉 基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 2022 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–
Abderrahmane Ghimouz	クォーク・核物質研究部門	物理学域	2021/11/1–
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

1. 野中俊宏助教 2022 年八木浩輔クォークマターアワード（八木アワード）（2022/4）

クォーク・核物質研究部門の研究者の野中俊宏助教が、2022 年「八木浩輔クォークマターアワード（八木アワード）」を受賞した。野中助教は、クォーク・核物質の相図における臨界点探索において、臨界点に敏感な観測量である「保存量分布のゆらぎ」の測定・補正手法を確立し、RHIC-STAR 実験において臨界点の兆候を観測した。これらの功績が認められ、この分野を代表したプレナリー講演を 2022 年 4 月 4-10 日にポーランドで開催された国際会議 Quark Matter 2022 において行った。

2. 北彩友海（修士 2 年）日本物理学会学生優秀発表賞（2022/10）

素粒子実験研究室の北 彩友海（修士 2 年）が、2022 年秋季大会において日本物理学会学生優秀発表賞を受賞した。発表題目「新型 LGAD 検出器（AC-LGAD）の電極細密化に関する研究」によるもので、2021 年度に引き続いての受賞となった。



図 8 北彩友海（修士 2 年）日本物理学会学生優秀発表賞（2022 年 10 月 14 日）

3. 飯田崇史助教 2022 年度 コニカミノルタ画像科学奨励賞（2023/3）

素粒子構造研究部門の飯田崇史助教は、代表で進めている波長情報を用いて粒子識別を行う新しいシンチレーション検出器の研究が評価され、2022 年度のコニカミノルタ画像科学奨励賞を受賞した。

研究業績名：「放射線粒子の色を見る！革新的シンチレーション検出器の開発」

4. 飯田崇史助教 2023 年 日本アイソトープ協会奨励賞（2023/3）

素粒子構造研究部門の飯田崇史助教は、微弱な放射線の検出法の開発によって素粒子科学の発展に大きく貢献したことが評価され、2023 年 日本アイソトープ協会奨励賞を受賞した。

研究業績名：「 ^{48}Ca の極稀崩壊研究のための検出システムの高度化」

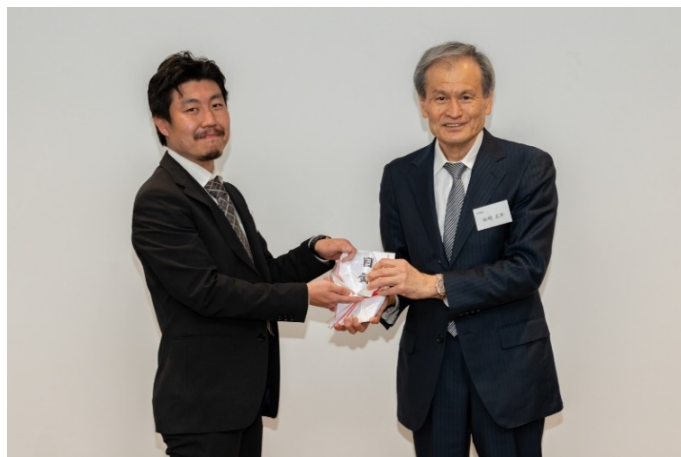


図 9 飯田崇史助教 2022 年度 コニカミノルタ画像科学奨励賞（2023 年 3 月 1 日）

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、での開催となった。

5.1.1 2022 年度第 1 回構成員会議

日時 2022 年 6 月 24 日（金）9:30–17:00

場所 自然 B114 + Online Zoom meeting

出席者 受川、江角、久野、武内、原、ほか（計 38 名）

1. 宇宙史研究センター概要（久野）
2. 2021 年度全体活動概要・2022 年度活動予定（久野）
3. 2021 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）
4. 審議・報告事項
 - 2022 年 3 月 18 日に行われた 2021 年度運営協議会について報告があった。
 - 2020 年 11 月 26 日に行われた監事監査の結果が報告された。
 - 令和 5 年度の概算要求等に向けた事業案として、「南極 10m テラヘルツ望遠鏡システム」を提案したことが報告された。
 - 筑波大学開学 50 周年記念事業として、宇宙史研究センター主催の国際記念シンポジウムが採択され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。
5. 各プロジェクト成果報告 (10 講演)
 - テンソル線り込み群による (3+1) 次元有限密度 Z_2 ゲージヒッグスモデルの研究（藏増嘉伸）
 - CMB 偏光観測実験 GroundBIRD (1)（本多俊介）
 - CMB 偏光観測実験 GroundBIRD (2)（本多俊介）
 - 行列幾何とその進展（足立宏幸）
 - 地球上で検出された短寿命 r 核 Fe-60 と Pu-244（木下哲一）
 - Study of electrode granularity for Pixel type AC-LGAD detector（中村浩二）
 - 星団形成の輻射流体シミュレーション（福島 肇）
 - COBAND 実験のための反射防止膜の開発（金 信弘）
 - Femtosopic study in high-energy heavy-ion collisions(Ashtosh Kumar Pandey)
 - ATLAS 実験の最近の結果と Run3 運転（廣瀬茂輝）

5.1.2 2022 年度第 2 回構成員会議

日時 2022 年 11 月 28 日 (月) 9:30-17:10

場所 自然 B114 + Online Zoom meeting

出席者 受川、江角、久野、武内、原、ほか (計 43 名)

1. 2022 年度前期全体活動概要・2022 年度活動予定 (久野)
2. 2022 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)
3. 審議・報告事項
 - センター期末評価が行われていることが報告された。
 - 令和 6 年度概算要求 (教育研究組織改革分) の準備が進められていることが報告された。
 - 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。
4. 各プロジェクト成果報告 (12 講演)
 - AC-LGAD 検出器の開発 (中村浩二)
 - ブラックホール降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション (朝比奈雄太)
 - 南極 30cm サブミリ波望遠鏡による銀河系内暗黒ガスの観測 (久野成夫)
 - ロケット実験 CIBER-2 による宇宙赤外線背景放射の観測 (松浦周二)
 - 非対称核物質の理解に向けた不安定核の反応断面積測定 (森口哲朗)
 - 有限温度 QCD の相構造 (大野浩史)
 - 放射光、X 線自由電子レーザーを使った物質科学研究における検出器利用の最適化 (西堀英治)
 - Vertex2022 を終えて (原 和彦)
 - ALICE FoCal プロジェクト (現状と将来) (中條達也)
 - Development of the 109-pixel NbTiN-Al hybrid MKID array for 100-GHz band astronomical observations (村山洋佑)
 - The Fokker-Planck formalism for closed strings (石橋延幸)
 - ATLAS 実験の最近の物理結果 (佐藤構二)

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。

2022 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

表 2 2022 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長	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長	武 内 勇 司	物理学	准教授
第7条第1項第3号	クォーク・核物質研究部門長	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長	原 和 彦	物理学	准教授
第7条第1項第4号	数理物質系長	服 部 利 明	物理工学	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

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 2022 年度第 1 回運営協議会

日時 2023 年 3 月 1 日（金） 10:00–12:30

場所 筑波大学人文社会学系 B 棟 108 + zoom online meeting

- 10:00–12:30
- 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）
- （非公開）運営協議員との質疑・応答

2022 年度の運営協議会を 2023 年 3 月 1 日に開催し運営協議会メンバーによる審議を行った。

センター教員から全体及び各部門の活動状況等報告後、運営協議委員とセンターの活動、予算、院生の教育、将来計画などについて議論がかわされ、宇宙史研究センターの将来について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わることまで、センターのほぼすべての活動について審議・決定する、センターの意思決定の中心機関である。2022年度の運営委員会委員名簿を表3に示す。

表3 2022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。

2022年度の開催実績は、以下のとおり：

2022年度 4/11, 5/9, 6/13, 7/4, 9/14, 10/11, 11/14, 12/19, 1/13, 2/20, 3/13

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 Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022 「宇宙の進化と物質の起源」

日時 2022 年 9 月 28 日（土） 12:15-21:10

場所 オンライン

参加者 68 名

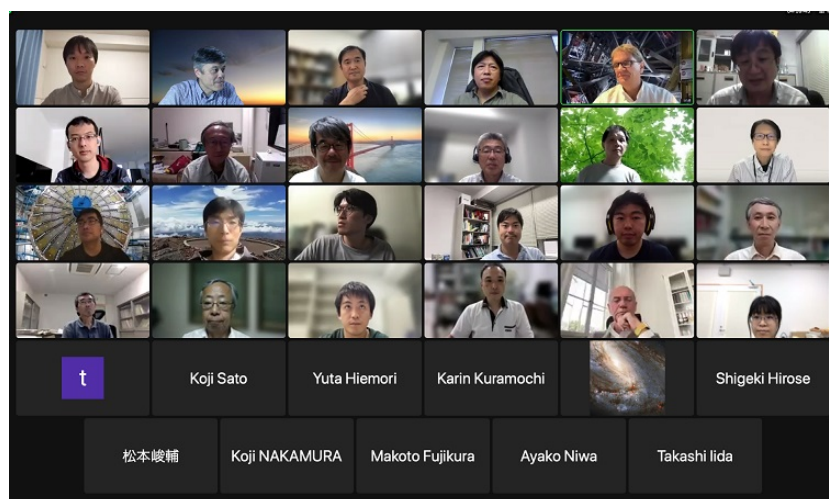


図 10 Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022 「宇宙の進化と物質の起源」

全学的に行われている Tsukuba Global Science Week (TGSW) にて、宇宙史セッション「宇宙の進化と物質の起源」（セッション番号 5-9）としてオンラインにて開催した。

南極天文学、素粒子構造、クォーク・核物質、光量子計測のそれぞれの分野における最近の研究を相互に理解し、今後の研究の進展や計画を議論するために、各分野における最先端の研究者を招待した。ヨーロッパからの講演者が多いため、土曜日の午後 1 時から夜 9 時にかけてオンラインにて行った。

6.2 第 31 回国際ワークショップ Vertex2022

日時 2022 年 10 月 24 日-28 日

場所 館山リゾートホテル（千葉県館山市）

参加者 67 名

素粒子実験における衝突点検出器の開発に関する国際ワークショップ Vertex2022 が、宇宙史研究センターの共催により開催された。宇宙史研究センター光量子計測器開発部門の原准教授は同会議の International Advisory Committee メンバーで、今回ワークショップの LOC 委員長を務めた。



図 12 国際ワークショップ ”2nd International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE”

6.5 宇宙史セミナー

宇宙史プロジェクト内での素粒子・原子核・宇宙分野間および実験・理論間の連携を深め、国際連携と分野融合を推進するために「宇宙史セミナー」を開催している。

第 1 回

日時 2022 年 5 月 27 日 (金) 13:45-15:00

場所 オンライン

講演 受川 史彦 (筑波大学)

“CDF 実験の歴史と初期の物理結果, および W ボソン検出について”

佐藤 構二 (筑波大学)

“CDF 実験での W ボソン質量の精密測定”

参加者 50 名



図 13 第 1 回 宇宙史セミナー (2022 年 5 月 27 日)

第2回

日時 2022年8月1日(月) 14:00-15:00

場所 第1エリア 1F201+ zoom

講演 Nu Xu (LBNL)

“Recent Results from RHIC Beam Energy Scan and Future Perspectives of Physics at High Baryon Density”

第3回

日時 2022年10月31日(月) 16:00-17:00

場所 自然系学系 B 棟 B118

講演 音野瑛俊 (九州大学)

“FASER 実験の最新状況”

第4回

日時 2023年2月24日(金) 13:45-15:00

場所 自然系学系 B 棟 B118

講演 永井義一 (ハンガリー ELTE 大学)

“NA61/SHINE 実験における長基線ニュートリノ実験のためのハドロン生成精密測定”

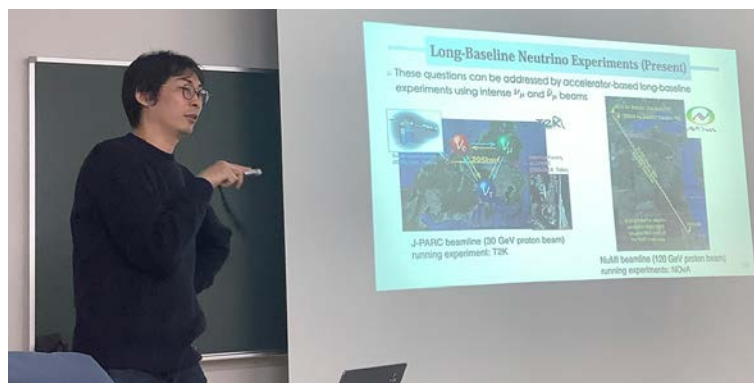


図14 第4回 宇宙史セミナー (2023年2月24日)

第5回

日時 2023年3月8日(水) 13:30-15:00

場所 自然系学系 B 棟 B118

講演 田島 治 (京都大学)

“CMB++”

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。新型コロナウイルスのため活動が制限されてきたが、少しずつ対面での活動ができるようになった。



図 15 第 5 回 宇宙史セミナー (2023 年 3 月 8 日)

7.1 筑波大学公開講座「宇宙の歴史」

日時 2022 年 5 月 28 日 (土)、29 日 (日)

場所 筑波大学春日地区 7A105 講義室

プログラム

5/28 (土) 梅村雅之 「ビッグバン宇宙論」

原 和彦 「素粒子の質量とヒッグス粒子」

武内勇司 「宇宙背景ニュートリノへの挑戦」

5/29 (日) 江角普一 「初期宇宙における Q G P 相転移」

久野成夫 「星、銀河の誕生と進化」

参加者数 26 名

高校生を対象に、138 億年の宇宙の歴史について解説した。また、筑波大学宇宙史研究センターで行われている研究についても紹介した。



図 16 筑波大学公開講座「宇宙の歴史」(2022 年 5 月 28 日)

7.2 第 13 回天文学宇宙の七夕講演会

日時 2022 年 7 月 9 日 (土) 13:30–16:30

場所 オンライン

プログラム

「数値シミュレーションで迫る超巨大ブラックホールの謎」 野村 真理子 (呉工業高等専門学校)

「宇宙の物質を電波望遠鏡で見る！ ～天文学、物理学、化学にまたがって～」 高野 秀路 (日本大学)

中学生以上の一般の聴衆を対象に、天文学宇宙物理学の最新の話題に関する講演会をオンラインで開催した。

8 2022 年度会計報告

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」および機能強化経費事業の補助金が2021年度で終了したため、大幅な収入減となることを受け、激変緩和措置として合計1,717万円が配分された。また、戦略イニシアティブ経費として400万円が配分された。

支出は、主にクロスアポイントメント教員経費などの人件費、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。

表4 2022 年度予算執行報告

2022年度 宇宙史研究センター			2023/6/27
収 入 項 目	支 出 項 目	金 額	小計/残
激変緩和	研究員 【人件費】	0	
12,174,500	クロスアポイントメント教員5名 6ヶ月 【人件費＋旅費】	3,469,816	4,663,993
5,000,000	特命教授3名 【人件費】	1,194,177	
戦略イニシアティブ	部門活動費（除く人件費） 南極天文学	6,566,241	
4,000,000	部門活動費（除く人件費） 素粒子構造	5,198,944	14,780,574
	部門活動費（除く人件費） クォーク・核物質	1,983,373	
	部門活動費 光量子	1,032,016	
	消耗品・報告書・その他	1,560,565	1,560,565
合 計	合 計		
21,174,500		21,005,132	169,368

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

橋本 拓也 (数理物質系物理学域 助教)

本多 俊介 (数理物質系物理学域 助教)

徂徠 和夫 (数理物質系物理学域 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 研究領域) 客員准教授

渡邊 祥正 (芝浦工業大学工学部 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)

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、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)、すばる、VLT、SOFIA などの光赤外望遠鏡を駆使し、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 30cm サブミリ波望遠鏡を設置し、銀河系における星間ガスの進化に関する研究を進めている。将来的には、南極内陸部に 10m 級テラヘルツ望遠鏡を建設することを目指し、そこに搭載する予定の超広視野超伝導電波カメラのプロトタイプとして野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡用 100-GHz MKID カメラの開発も進めている。

クロスアポイントメント教員の徂徠教授は、南極 30cm 望遠鏡用の広帯域分光器およびデータリダクションソフトの開発を進めた。

2022 年 6 月 1 日に本多俊介助教が着任した。

(1) 近傍銀河・銀河系の観測的研究

相互作用の初期および中期段階にある 4 つの近傍にある銀河ペアについて、星間ガスと星形成活動の関係を銀河スケールと kpc スケールの両方で調べた (論文 1)。先行研究において、これらの銀河ペアでは水素分子ガスが水素原子ガスから効率的に生成されることが示されているが (Kaneko et al. 2017)、銀河スケールのケニカット・シュミット則から、相互作用する 8 つの銀河のうち 7 つが、孤立銀河のケニカット・シュミット則と比較して 3 倍以内の星形成率であることがわかった。相互作用銀河の銀河スケールでの比星形成率 (sSFR) と星形成効率 (SFE) は、孤立銀河のものと同程度である。また、SFE とケニカット・シュミット則を kpc スケールでも調べた結果、SFE の空間分布から、SFE が局所的に上昇し、上昇した領域が非対称または中心から外れた領域であることが明らかとなった。SFE

の局所的な上昇はショックによって誘発された可能性がある。初期段階の相互作用銀河のケニカット・シュミット則のべきは 1.30 ± 0.04 であり、これは孤立銀河のべきと一致している（図 1）。この結果は、星形成により直接的に関係する高密度ガスの割合が相互作用の初期段階では変化しないことを示唆している。

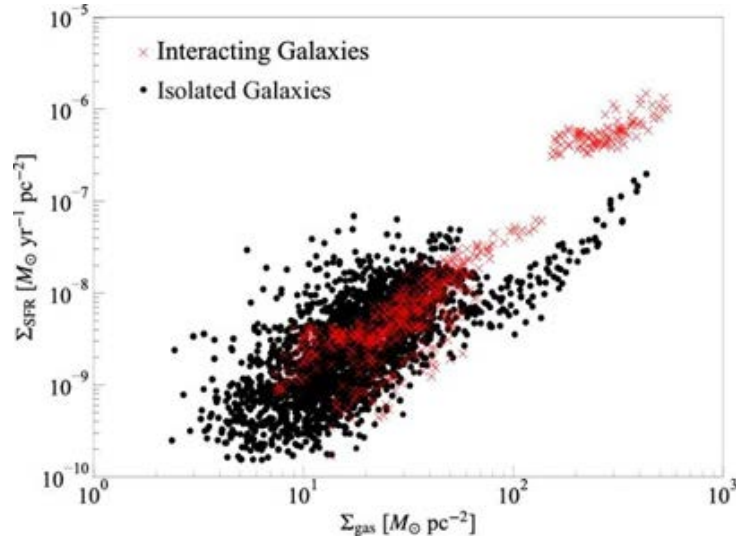


図 17 孤立銀河と相互作用銀におけるガス面密度と星形成率面密度の相関。（論文 1）

(2) SOFIA による近傍矮小銀河の性質

浦遼太氏および橋本拓也氏は、近傍宇宙にある電離光子放射天体の遠赤外線 [OIII] $88 \mu\text{m}$, [CII] $158 \mu\text{m}$ の分光に成功した（図 2）。Herschel Dwarf Galaxy Survey などの近傍銀河のサーベイデータも組み合わせ、世界で初めて電離光子脱出率と遠赤外線輝線光度比の関係を観測的に確立した。本研究は、国際誌 *Astrophysical Journal* (ApJ; インパクトファクター 5.5) へ掲載された (Ura, Hashimoto, Inoue et al. 2023, ApJ, 948, 3)。今後、橋本氏が推進している遠方銀河の多波長データを用いた研究の重要な土台として、多数の引用が期待されている。浦氏は、さらに本研究成果によって 2022 年度筑波大学理工学群長賞（修士論文 3）および 2022 年度国立天文台野辺山電波観測所特別公開最優秀ポスター賞を受賞した。

(3) 野辺山 45 m 鏡用超伝導電波カメラの開発

極低温下での大型アレイ化を得意とする超伝導検出器 MKID を搭載した電波カメラの開発を進めている。昨年度に引き続き、野辺山 45 m 望遠鏡に搭載した MKID 電波カメラを用いて天文観測を実施した。また、昨年度から観測に用いている 109 ピクセルのアンテナ結合型 Al-NbTiN ハイブリッド MKID の研究開発の成果は博士論文としてまとめられた（博士論文 1）。今年の観測では、昨年同様の惑星に加えて、星形成領域の観測にも挑戦し、先行研究と一致する強度・形状の観測に成功した（図 3、国内学会 31、学士論文 1）。また、ビーム形状の詳細な評価のため、点源とみなせる高輝度クエーサー 3C273 も観測して、惑星の結果と合わせてビーム形状の評価を行った。設計値の 17.3 秒角とおおよそ一致することを確認できた（国内学会 32）。2022 年 9 月には、野辺山観測所から国立天文台先端

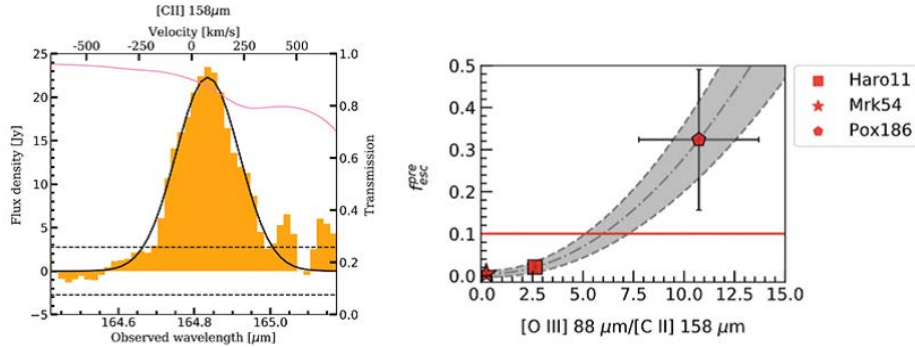


図 18 左パネルは、近傍宇宙にある電離光子放射天体 Mrk 54 のデータ。右パネルは、世界で初めて [OIII]88μm/[CII]158μm 光度比と電離光子脱出率を関係づけたもの。

技術センターの実験室へと MKID 電波カメラを送り返して、photon-noise-limited を達成するべく検出器設計の更なる最適化を進行中である。

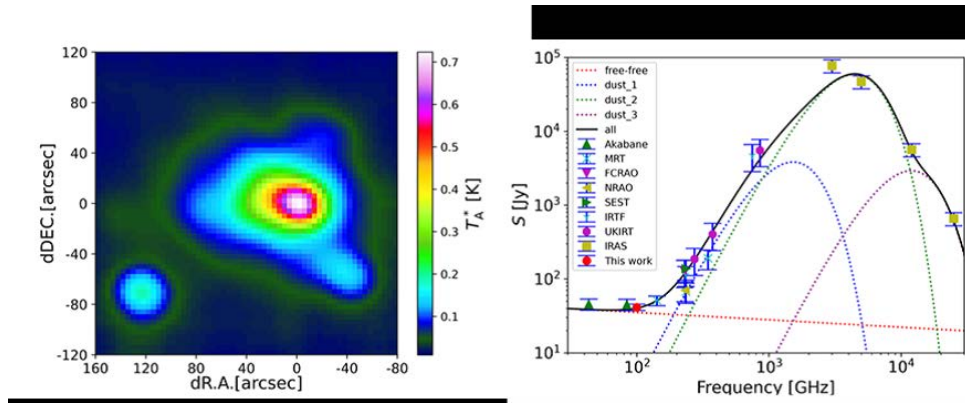


図 19 2022 年に観測した星形成領域 W49A のマップと強度。先行研究と一致する観測結果を得ることができた。

(4) 南極天文学の推進

30cm サブミリ波望遠鏡を南極内陸部の新ドームふじ基地に設置し $\text{CO}(J=4-3)$ と $[\text{CI}](^3P_1-^3P_0)$ 輝線の同時観測による銀河面サーベイを行う提案が、国立極地研究所の一般研究観測として採択され、2023 年度から本格的に南極天文を開始することになった。それに向けて装置開発を進めている。受信機の広帯域化は、国立天文台先端技術センターと関西学院大学との共同研究で進めている。ALMA 用に開発された広帯域ミキサーを搭載し、2 輝線同時観測を実現させる（学士論文 2）。帯域 2.5GHz の新分光計の立ち上げは、北海道大学と共同で進めている。光学ポインティングシステムの立ち上げは、JAXA の協力のもと光学ポインティング用望遠鏡と電波望遠鏡の光軸のずれの測定を行った（図 4、修士論文 1、4）。また、30cm 望遠鏡の制御ボックス、モーター、ベアリングなどの更新を行った。南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡計画について、日本学術会議の未来の学術振興構想「学術の中長期研究戦略」に「南極テラヘルツ望遠鏡による南極天文学の開拓と銀河進化の解明及び宇宙論パラメータの決定」として提案した。同提案は、宇宙電波懇談会からの推薦を受け、日本学術会議天文学・宇宙物理学

分科会から「未来の学術振興構想」へ推薦されている。



図 20 JAXA での測定の様子（修士論文 1）。

〈査読付き論文〉

1. Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., “Properties of molecular gas in galaxies in early and mid stages of Interaction. III. Resolved Kennicutt-Schmidt law”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 2, pp.343-363 (2022)
2. Nagai, M., Murayama, Y., Nitta, T., Suzuki, R., Hikawa, R., Miyazawa, H., Noji, R., Kiuchi, H., Sekimoto, Y., Matsuo, H., Shan, H., Naruse, M., Noguchi, H., Kuno, N., Monfardini, A., Macias-Perez, J., Goupy, J., Calvo, M., Catalano, A., “Configuration of Probe Tones for MKID Readout with Frequency Sweeping Scheme”, Journal of Low Temperature Physics volume 209, pp.677-685 (2022)
3. Harikane, Yuichi., Inoue, Akio. K., Mawatari, Ken., Hashimoto, Takuya., Yamanaka, Satoshi., et al., “A Search for H-Dropout Lyman Break Galaxies at $z=12-16$ ”, The Astrophysical Journal, Volume 929, Issue 1, id.1, 15 pp. (2022)
4. Tokuoka, Tsuyoshi., Inoue, Akio. K., Hashimoto, Takuya., Ellis, Richard. S., Laporte, Nicolas., et al., “Possible Systematic Rotation in the Mature Stellar Population of a $z = 9.1$ Galaxy”, The Astrophysical Journal Letters, Volume 933, Issue 1, id. L19, 7 pp. (2022)
5. Akins, Hollis. B., Fujimoto, Seiji., Finlator, Kristian., Watson, Darach., Knudsen, Kirsten. K., et al., (Hashimoto, Takuya.8 番目), “ALMA Reveals Extended Cool Gas and Hot Ionized Outflows in a Typical Star-forming Galaxy at $z = 7.13$ ”, The Astrophysical Journal, Volume 934, Issue 1, id.64, 17 pp. (2022)
6. Sugahara, Yuma., Inoue, Akio. K., Fudamoto, Yoshinobu., Hashimoto, Takuya., Harikane, Yuichi., Yamanaka, Satoshi., “Bridging Optical and Far-infrared Emission-line Diagrams of Galaxies from Local to the Epoch of Reionization: Characteristic High [O III] $88 \mu\text{m}$ /SFR at $z > 6$ ”, The Astrophysical Journal, Volume 935, Issue 2, id.119, 19 pp. (2022)
7. Fukuchi, Hikaru., Ichikawa, Kohei., Akiyama, Masayuki., Ricci, Claudio., Chon, Sunmyon., et al., (Hashimoto, Takuya.8 番目), “H1821+643: The Most X-Ray and Infrared Luminous Active Galactic Nucleus (AGN) in the Swift/BAT Survey in the Process of Rapid Stellar and Supermassive Black Hole Mass Assembly”, The Astrophysical Journal, Volume 940, Issue 1, id.7, 15 pp. (2022)
8. Ono, Yoshiaki., Fujimoto, Seiji., Harikane, Yuichi., Ouchi, Masami., Vallini, Livia., et al., (Hashimoto, Takuya.12 番目), “ALMA Observations of CO Emission from Luminous Lyman-break Galaxies at $z = 6.0293 - 6.2037$ ”, The Astrophysical Journal, Volume 941, Issue 1, id.74, 19 pp. (2022)
9. Ren, Yi. W., Fudamoto, Yoshinobu., Inoue, Akio. K., Sugahara, Yuma., Tokuoka, Tsuyoshi., et al., (Hashimoto, Takuya.10 番目), “Updated Measurements of [O III] $88 \mu\text{m}$, [C II] $158 \mu\text{m}$, and Dust Continuum Emission from a

- $z = 7.2$ Galaxy”, The Astrophysical Journal, Volume 945, Issue 1, id.69, 13 pp. (2023)
10. Shunsuke Honda, Yosuke Murayama, Tomu Nitta, Makoto Nagai, Hiromu Miyazawa, Ryohei Noji, Pranshu Mandal, Nario Kuno, Hiroshi Matsuo, Yutaro Sekimoto, and Naomasa Nakai, “Development and Commissioning of 100 GHz Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) Camera at the Nobeyama 45 m Telescope”, URSI Radio Science Letters Volume 4 (2022)
 11. S. Kotaka, S. Adachi, R. Fujinaka, S. Honda, H. Nakata, Y. Seino, Y. Sueno, T. Sumida, J. Suzuki, O. Tajima, and S. Takeichi (DOSUE-RR Collaboration), “Search for Dark Photon Dark Matter in the Mass Range $74 - 110 \mu\text{eV}$ with a Cryogenic Millimeter-Wave Receiver”, Phys. Rev. Lett. 130, 071805, 2023

〈学位論文〉

[博士論文]

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 村山洋佑：Development of 109-pixel MKID arrays for the 100-GHz band continuum camera
2. さい 光遠：Study of physical properties of molecular clouds in the Milky Way Galaxy based on FUGIN datasets with machine learning

理工情報生命学術院・物理学学位プログラム

1. 石田智大：Study of Phase Retrieval Method for Estimating Antenna Radiation Pattern in Terahertz Band

[修士論文]

数理物質科学研究群・物理学学位プログラム

1. 青木美和：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡における受信機設置位置のポインティングへの影響に関する研究
2. 梅澤智幸：赤方偏移 6 にあるライマンブレイク銀河の遠赤外線微細構造線の観測
3. 浦 遼太：Detections of [C II] $158 \mu\text{m}$ and [O III] $88 \mu\text{m}$ in a Local Lyman Continuum Emitter, Mrk 54, and its Implications to High-redshift ALMA Studies
4. 茅野太一：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡の指向精度向上に関する研究
5. 黒澤里沙：数値シミュレーションと機械学習を用いた天の川銀河構造に関する研究
6. 小関知宏：強度干渉計実験に向けた光学システムおよび読み出し回路の開発
7. 藤森柊人：ハッブル定数観測用高感度 20GHz 帯受信機の開発
8. Liang Shaohua：棒渦巻銀河 M83 (NGC5236) における分子ガスの物理状態と星形成効率の関係

[学士論文]

1. 石崎悠治：野辺山 45 m 電波望遠鏡 100-GHz 帯 MKID カメラによる大質量星形成領域 W49A の観測的研究
2. 岩田将輝：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用新 IF ボックスの開発
3. 碓氷光崇：FirstLight シミュレーションを用いた JWST NIRSpec/IFU 擬似データの解析
4. 坂本優貴：NGC 1068 における CH_3OH 輝線の分布に関する研究
5. 浜田佳澄：渦状銀河 NGC 1232 における分子ガスと星形成の関係に関する研究
6. 若杉航希：南極 12 m テラヘルツ望遠鏡によって観測可能な微細構造輝線の検討

〈研究成果発表〉

[国際学会・研究会]

1. Kuno, N., Seta, M., Sorai, K., Nakai, N., Nagai, M., Honda, S., Matsuo, H., Umemoto, T., Salak, D., Hashimoto, T., “Antarctic 30-cm Submm Telescope Project”, 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting, Sep. 1-2, 2022, Tokyo, Japan (ポスター)
2. Makoto Nagai, Hiroaki, Imada, Tom Nitta, Yosuke Murayama, Ryohei Noji, Masato Naruse, “Correlation Polarimeter for Millimeter-wave Wavefront Sensing”, URSI- Japan Radio Science Meeting, Sep. 1-2, 2022, Tokyo, Japan (ポスター)
3. Shunsuke Honda, Yosuke Murayama, Tomu Nitta, Makoto Nagai, Hiromu Miyazawa, Ryohei Noji, Pranshu Mandal, Nario Kuno, Hiroshi Matsuo, Yutaro Sekimoto, Naomasa Nakai, “Development and Commissioning of 100 GHz Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) Camera at the Nobeyama 45m Telescope”, URSI- Japan Radio Science Meeting, Sep. 1-2, 2022, Tokyo, Japan
4. Ayako Niwa, Hajime Ezawa, Tomonori Tamura, Hiroshi Matsuo, “SIS photon detectors for THz observations beyond the gap energy”, 32nd IEEE International Symposium on Space THz Technology, Baeza, Spain, Oct 16-20, 2022 (ポスター)
5. Hashimoto, Takuya., “JWST observations of ALMA [OIII] $88 \mu\text{m}$ emitters in the epoch of reionization”, Seminar talk at the Center of Astrobiology, Oct 24, 2022, Spain (招待)
6. Kuno, N., Nitta, T., Hashimoto, T., Saito, H., Salak, D., Nakai, N., Seta, M., Sorai, K., Nagai, M., Umemoto, T., Matsuo, H., “Antarctic 30-cm Submm Telescope Project”, 23rd East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology

Workshop, Dec. 14-15, 2022 (ポスター)

7. Yosuke Murayama, Shunsuke Honda, Makoto Nagai, Lee Hosun, Yuji Ishizaki, Tom Nitta, Ryohei Noji, Hiromu Miyazawa, Nario Kuno, Hiroshi Matsuo, Wenlei Shan, Yutaro Sekimoto, Takashi Noguchi, Masato Naruse, Naomasa Nakai, “Responsivity Evaluation of the 100-GHz Band MKID Camera with Various Optical Loading Conditions”, RIKEN-NICT-East Asia Receiver Joint Workshop, Dec. 14-15, 2022, Saitama, Japan (ポスター)
8. Takashi Yamamoto, Daisuke Iono, Toshiki Saitou, Nario Kuno, “Quantitative and statistical analysis of molecular gas morphology in nearby star-forming galaxies” A half-century of millimeter and submillimeter astronomy: Impact on astronomy/astrophysics and the future, Dec 15-18, 2022, Miyakojima, Japan (ポスター)
9. Hashimoto, Takuya., “JWST observations of ALMA [OIII] 88 μm emitters in the epoch of reionization”, IAU symposium 377 Early Disk-Galaxy Formation from JWST to the Milky Way, Feb 6-10, 2023, Malaysia (招待)
10. Hashimoto, Takuya., “JWST observations of ALMA [OIII] 88 μm emitters in the epoch of reionization”, Seminar talk at the Geneva Observatory, Feb 20, 2023, (招待)
11. Hashimoto, Takuya., “JWST observations of ALMA [OIII] 88 μm emitters in the epoch of reionization”, Seminar talk at the Lyon Observatory, Feb 20- 22, 2023, France (招待)
12. Takashi Yamamoto, Daisuke Iono, Toshiki Saitou, Nario Kuno, “Quantitative and statistical analysis of molecular gas morphology in nearby star-forming galaxies” The 9th Galaxy Evolution Workshop, Feb 20-23, 2023, Kyoto University (ポスター)
13. S. Honda on behalf of the GroundBIRD collaboration, “GroundBIRD – CMB polarization observation with continuously high-speed rotation”, International Conference on the Physics of the Two Infinities, Mar. 27-30, 2023, Kyoto, Japan, (招待)

[国内学会・研究会]

1. 本多俊介 「CMB 偏光観測実験 GroundBIRD (1)」、 「CMB 偏光観測実験 GroundBIRD (2)」、 宇宙史研究センター 2022 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会、2022 年 6 月 24 日、筑波大学
2. 山本 卓 「近傍星形成銀河における分子ガスの分布形態に関する定量的・統計的解析」、銀河・銀河間ガス研究会 2022、2022 年 8 月 8 日-12 日、北海道釧路市
3. 本多俊介、池満拓司、石田秀郷、石塚光、内田智久、大谷知行、小栗秀悟、唐津謙一、木内健司、沓間弘樹、小峯順太、古谷野凌、末野慶徳、鈴木惇也、関本裕太郎、田井野徹、田島 治、田中智永、辻 悠汰、辻井未来、富田 望、永井 誠、長崎岳人、成瀬雅人、羽澄昌史、服部 誠、美馬 寛、吉田光宏、Jihoon Choi、Ricardo Tanausú Génova-Santos、Hoyong Jeong、Yonggil Jo、Kyungmin Lee、Mike Peel、Rafael Rebolo、José Alberto Rubiño-Martín、Eunil Won 「CMB 望遠鏡 GroundBIRD のサイエンス観測に向けた準備状況 — ワイヤを用いた偏光応答特性の評価」、日本物理学会 2022 年秋季大会、2022 年 9 月 6 日-8 日、岡山理科大学
4. 徳岡剛史、井上昭雄、橋本拓也、Richard S Ellis、Nicolas Laporte、他 「赤方偏移 9.1 の銀河 MACS1149-JD1 の ALMA 高空間分解能観測と回転運動解析」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
5. 菅原悠馬、徳岡剛史、井上昭雄、札本佳伸、橋本拓也、他 「Tokut—重力レンズ効果を受けた銀河の回転運動解析コード」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
6. Ren Yi W、Fudamoto Yoshinobu、Inoue Akio K、Sugahara Yuma、Tokuoka Tsuyoshi、 et al 「The updated measurements of [OIII] 88 μm and [CII] 158 μm emission from a $z = 7.212$ galaxy」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
7. 橋本拓也、井上昭雄、菅 悠馬、札本佳伸、藤本征史、他 「Big Three Dragons: Molecular Gas in a Bright Lyman-Break Galaxy at $z = 7.15$ 」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
8. 浦 遼太、橋本拓也、井上昭雄、菅原悠馬、札本佳伸、他 「遠方銀河で観測された高い [O iii] 88 μm /[C ii] 158 μm 光度比の原因-近傍銀河からの示唆」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
9. 田村陽一、萩本将都、谷口暁星、酒井 剛、小嶋崇文、他 「北半球最高感度ミリ波サブミリ波ヘテロダイン受信システム LMT-FINER III. 遠赤外線微細構造線による前・宇宙再電離期の銀河形成の開拓」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
10. 小関知宏、丹羽綾子、江澤 元、松尾 宏、柴野比里菜 「テラヘルツ領域の観測に向けた強度干渉計の開発」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 日-15 日、新潟大学 (オンライン参加)
11. 俣和夫 「南極 30 cm 望遠鏡による銀河系・マゼラン雲の観測計画」、第 2 回筑波大学-北海道大学合同研究会研究会、2022 年 11 月 22 日 (オンライン参加)
12. 山本 卓、伊王野大介、斉藤俊貴、久野成夫 「Quantitative and statistical analysis of molecular gas morphology in nearby star-forming galaxies」、ALMA/45M/ASTE Users Meeting、2022 年 12 月 20 日-21 日、国立天文台三鷹すばる棟 (ポスター)
13. 山本 卓、伊王野大介、斉藤俊貴、久野成夫 「Quantitative and statistical analysis of molecular gas morphology in nearby star-forming galaxies」、近傍宇宙の観測的研究で探る星間物質ライフサイクル、2023 年 2 月 7 日-8 日、グローバルホテル糸島
14. 柴田和樹、渡邊祥正、久野成夫、俣和夫 「NGC 3627 における SFE 多様性と分子ガスの物理状態の関係」、近傍宇宙の観測的研究で探る星間物質ライフサイクル、2023 年 2 月 7 日-8 日、グローバルホテル糸島
15. 小関知宏 「強度干渉計実験に向けた光学システムおよび読み出し回路の開発」、2022 年度 TChOU ワークショップ南極部門、

2023 年 2 月 28 日

16. 黒澤里沙、久野成夫、ZHAI Guangyuan、和田桂一、油谷直道、長船大樹、Alvi Kazi、馬場淳一「数値シミュレーションと機械学習を用いた天の川銀河構造の解明」、日本天文学会 2022 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
17. 梅澤智幸、久野成夫、ZHAI Guangyuan、福島 肇、齋藤弘雄、梅本智文、藤田真司「天の川銀河のペルセウス腕における分子雲進化の研究」、日本天文学会 2022 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
18. Wenyao Miao, Dragan Salak, Nario Kuno「ALMA CO-observations of starburst-driven molecular outflow in NGC1482」、日本天文学会 2022 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
19. 茅野太一、久野成夫、本多俊介、瀧口風太、青木美和、西堀俊幸、瀬田益道、他南極天文コンソーシアムメンバー「南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシステムの開発 II」日本天文学会 2022 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
20. 永井 誠、李 豪純、石崎悠治、本多俊介、久野成夫、新田冬夢、村山洋佑、松尾宏、中井直正、関本裕太郎、45m 運用メンバー「野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの解析パイプラインの開発」、日本天文学会 2022 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
21. Hashimoto Takuya, Alvarez-Marquez J, Colina L, Inoue A K, Marques-Chaves R, et al「JWST observations of ALMA [O iii] 88 μm emitters in the epoch of reionization」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
22. Ren Yi W, Inoue Akio K, Yang Shengqi, Tamura Yoichi, Fudamoto Yoshinobu, et al「Observation of the [O iii] 52 micron emission from a $z = 7.2$ galaxy」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
23. Salak Dragan, Hashimoto Takuya, Inoue Akio K, Donevsk Darko, Bakx Tom J L C, et al「Molecular outflow in the reionization-epoch quasar J2054-0005 revealed by OH 119 μm observations」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
24. 小森楓雅、井上昭雄、菅原悠馬、馬渡 健、橋本拓也、他「面分光観測によるライマン連続光放射銀河候補の Ly α 輝線ハローの分析」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
25. 浦 遼太、橋本拓也、久野成夫、矢島秀伸、井上昭雄、他「電離光子放射天体 Mrk54 における [O iii] 88 μm と [C ii] 158 μm の検出とその意味-高赤方偏移 ALMA 研究への示唆 II」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
26. 山本卓、伊王野大介、斉藤俊貴、久野成夫「CO(2-1) ガス分布形態の定量的・統計的解析による銀河棒状構造と分子ガス中央集中度の関係について」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
27. 柴田和樹、渡邊祥正、久野成夫、徂徠和夫「NGC 3627 における星形成活動性と分子ガスの物理状態の関係」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
28. 小関知宏、丹羽綾子、江澤 元、松尾 宏、柴野比里菜「強度干渉計実験に向けた光学系の開発」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
29. 清水一揮、徂徠和夫「近傍渦巻銀河の構造同定および分子ガスの速度分散と星生成効率の多様性」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
30. 本多俊介、永井誠、村山洋佑、新田冬夢、李豪純、石崎悠治、久野成夫、松尾宏、野口卓、成瀬雅人、関本裕太郎、中井直正、45 m 運用メンバー(野辺山宇宙電波観測所)「野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した 100-GHz 帯 MKID カメラの 2022 年試験観測の状況と雑音性能評価に向けた開発」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学
31. 石崎悠治、永井 誠、本多俊介、李 豪純、久野成夫、新田冬夢、村山洋佑、松尾 宏、中井直正、関本裕太郎、45 m 運用メンバー(野辺山宇宙電波観測所)「野辺山 45 m 電波望遠鏡 100-GHz 帯 MKID カメラによる大質量星形成領域 W49A の観測データの解析」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学 (ポスター)
32. 李 豪純、永井 誠、本多俊介、石崎悠治、久野成夫、新田冬夢、村山洋佑、松尾 宏、中井直正、関本裕太郎、45 m 運用メンバー(野辺山宇宙電波観測所)「野辺山 45 m 電波望遠鏡 100-GHz 帯 MKID カメラ 搭載試験におけるビーム特性の評価」、日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月 13 日-16 日、立教大学 (ポスター)
33. 小関知宏「Development of Intensity Interferometer for Synthesis Imaging」、光子検出器ワークショップ (TCHoU 光子計測部門)、2023 年 3 月 17 日
34. 久野成夫「南極テラヘルツ望遠鏡計画」、2022 年度宇宙電波懇談会シンポジウム「2030 年代の電波天文学」、2023 年 3 月 27 日-28 日、国立天文台 (招待講演)
35. Takuya Hashimoto, Yoshinobu Fudamoto, JWST GO-1840 グループ「JWST-ALMA synergy I: 赤方偏移 7.88 における極高密度環境の同定」、2022 年度宇宙電波懇談会シンポジウム「2030 年代の電波天文学」、2023 年 3 月 27 日-28 日、国立天文台
36. Yoshinobu Fudamoto, Takuya Hashimoto, JWST GO-1840 グループ「JWST-ALMA synergy II: 赤方偏移 7.88 における極高密度環境下にある銀河の面分解析」、2022 年度宇宙電波懇談会シンポジウム「2030 年代の電波天文学」、2023 年 3 月 27 日-28 日、国立天文台

〈研究会開催実績〉

1. 宇宙史研究センターワークショップ (南極天文学研究部門) 2023 年 2 月 28 日 参加者 15 名

〈講演会開催実績〉

1. 第 13 回天文宇宙の七夕講演会 2022 年 7 月 9 日 (オンライン開催) 参加者 80 名

〈外部委員〉

久野成夫

1. 宇宙電波懇談会 電波天文将来計画検討ワーキング・グループ委員 2021 年 6 月 -
2. 日本天文学会 コンプライアンス委員会委員 2021 年 6 月 -
3. 国際電波科学連合 URSI 日本国内委員会 J 小委員会委員長 2021 年 4 月 -
4. 国立天文台プロジェクト評価 (先端技術センター) 外部評価委員 2022 年 1 月 - 6 月

橋本拓也

1. 次世代単一鏡 大型サブミリ波望遠鏡 (LST) サイエンス検討チームおよび白書執筆

〈外部資金〉

1. 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放射メカニズム」 (研究課題 20K22358) 約 150 万円 (3/3)
2. 科学研究費補助金 基盤研究 (B)(一般): 橋本拓也 (研究代表者) 「ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡とアルマ望遠鏡で明らかにする超遠方銀河の性質」 (研究課題 20H01258) 533 万円 (1/3)
3. 日本学術振興会 卓越研究員事業費: 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」 200 万円 (4/5)
4. 科学研究費補助金 国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化 (B)): 本多俊介 (研究分担者) 「原始重力波の発見を目指す-ミリ波の広帯域観測で理解して分離する CMB と星間塵」 (研究課題 20KK0065A) 100 万円
5. 科学研究費補助金 特別研究員奨励費: 丹羽綾子 「テラヘルツ強度干渉計による画像合成のための SIS 光子計数型検出器の開発」 90 万円 (1/3)

〈受賞〉

浦 遼太

1. 2022 年度 筑波大学 理工学群長賞 受賞
2. 2022 年度 国立天文台野辺山電波観測所 特別公開 最優秀ポスター発表賞 受賞

浜田佳澄

1. 2022 年度 筑波大学物理学類卒業研究ベストプレゼンテーション賞

〈その他特記事項〉

久野成夫

1. 筑波大学公開講座「宇宙の歴史」 2022 年 5 月 28 日 - 29 日
2. 関西学院大学、物理学特殊講義 XV、2022 年 9 月 5 日-6 日

橋本拓也

1. 私立作新学院中等部立志式特別講演会「やりたいことをやる - 天文学者の観点からの応援メッセージ」 2023 年 2 月 2 日

本多俊介

1. 日本物理学会 2023 年春季大会 座長
2. NHK サラメシ 出演 2022 年 6 月 30 日

本多俊介、村山洋佑

1. 国立天文台野辺山宇宙電波観測所 特別公開 一般向けポスター発表「新型超伝導カメラ MKID で宇宙を見る」 2022 年 8 月 28 日 (オンライン開催)

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)

浅野 侑磨 (数理物質系物理学域 テニユアトラック助教)

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 助教)

廣瀬 茂輝 (数理物質系物理学域 テニユアトラック助教)

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) 連携教員

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

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 加速器と ATLAS 実験は、2019 年から 2021 年にかけて 3 年間シャットダウンし、高輝度化のためのアップグレードを行った。2022 年からは、新たな Run-3 運転期間が始まった。Run-3 は、重心系エネルギー 13.6 TeV で衝突実験を開始し、2025 年までの 4 年間で 250 fb^{-1} のデータを取得する計画である。ATLAS 検出器に関して、当部門の ATLAS 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 2029 年からの HL-LHC 実験では、LHC 加速器の輝度の大幅な向上が予定され、ATLAS 検出器も増強が必要となり、そのための粒子飛跡検出器の開発を並行して進めている。これらの検出器開発は光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。

(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、まず観測ロケットによる観測をおこない、将来的には人工衛星による 100 日程度の長期観測を計画している。

(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、2022 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 2021 年度には、以下の研究者を本学教員として招き、当部門の研究を推進した。

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)

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をおこなった。

(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。

LHC 加速器と ATLAS 実験は、2019 年から 2021 年にかけて 3 年間シャットダウンし、高輝度化のためのアップグレードを行った。2022 年からは、新たな Run-3 運転期間が始まった。Run-3 は、重心系エネルギー 13.6 TeV で衝突実験を開始し、2025 年までの 4 年間で 250 fb^{-1} のデータを取得する計画である。Run-3 運転終了後は長期シャットダウンを再度行い、2029 年からは現在よりも瞬間輝度を 2.5 倍に高輝度化した HL-LHC 実験を開始する。

2022 年度には、2018 年までの Run-2 で得られていたデータを用いた様々な物理解析が進んだ。同時に、Run-3 の運転により新しく得られたデータの解析も始まり、すでにいくつかの物理結果を公表した。ここでは、2022 年度に公表された中から、もっとも興味深い物理成果のうちのいくつかを紹介する。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おり、また 2029 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発も行っている。HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発については、光量子計測器開発部門のプロジェクトとして、当部門との密接な連携のもと進められており、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記載されているの

で、そちらを参照頂きたい。

LHC-ATLAS 実験の現状と将来計画

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 139 fb^{-1} 取得した。

2019 年から 2021 年の間は、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中であった。シャットダウン中の 2020 年にコロナウィルスのパンデミックが起こった。当初 2021 年度から開始予定であった Run-3 の 1 年間の後ろ倒しが決定するなど、大きな影響があったが、ウィズ・コロナの生活形態が広まり、現在の研究環境は平時と同様に戻っている。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た。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った。

2022 年 7 月 5 日には、重心系エネルギー 13.6 TeV で Run-3 の物理 Run が開始した。図 21 に 2022 年の ATLAS 実験の運転状況を示す。2022 年には、LHC は 38.5 fb^{-1} の積算輝度に相当する陽子・陽子衝突を配り、そのうち 35.7 fb^{-1} を ATLAS 検出器は記録した。Run-3 では、バンチごとの陽子数を Run-2 時よりも増加させたため、バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突反応数も増加した。

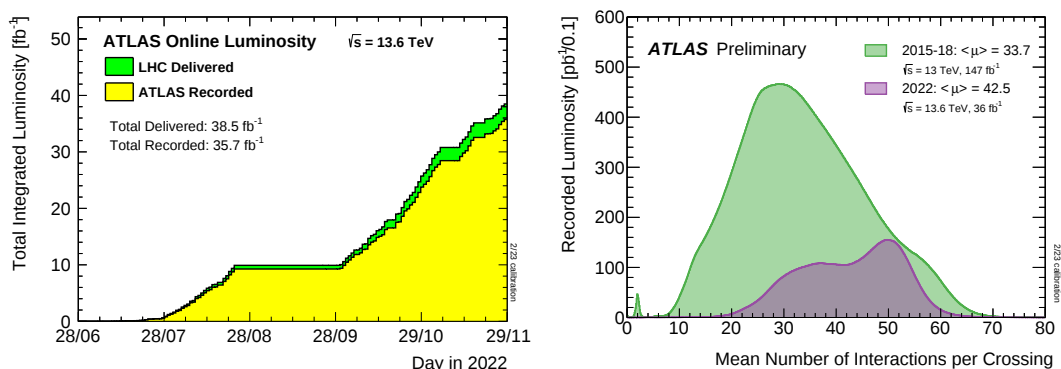


図 21 2022 年の ATLAS 実験のデータ取得の状況。(左) 加速器が配った積算輝度と、ATLAS 検出器で記録した積算輝度の推移。(右) バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突の反応数の分布。Run-2 時 (2015 - 2018) の分布を比較のために重ねて表示している。

今後は、2025 年まで Run-3 実験を続行し、 250 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。2026-2028 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、2029 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。HL-LHC 実験は、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。

Run-3 データの解析

ATLAS 実験では、多くの物理トピックで Run-2 データの解析を続けているが、Run-3 のデータの解析もすでに始まっている。2022 年に取得したデータについて、暫定結果がすでにいくつか公表されて

いる。

図 22 に、Run-3 データを使って観測された $Z \rightarrow ee$ および $Z \rightarrow \mu\mu$ の不変質量ピークを示す。図 23 には、 Z ボソンと $t\bar{t}$ の生成断面積の測定の様子を示している。この解析では、異なるフレーバーの 2 レプトン系の事象数をフィットすることでこれらの生成断面積を $\sigma_{Z \rightarrow \ell\ell}^{\text{fid.}} = 751 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 15(\text{syst.}) \pm 17(\text{lumi.})$ pb, $\sigma_{t\bar{t}} = 859 \pm 4(\text{stat.}) \pm 22(\text{syst.}) \pm 19(\text{lumi.})$ pb と測定した。また、 Z ボソンと $t\bar{t}$ の生成断面積比を $R_{t\bar{t}/Z} = 1.144 \pm 0.006(\text{stat.}) \pm 0.022(\text{syst.}) \pm 0.003(\text{lumi.})$ pb と測定した。

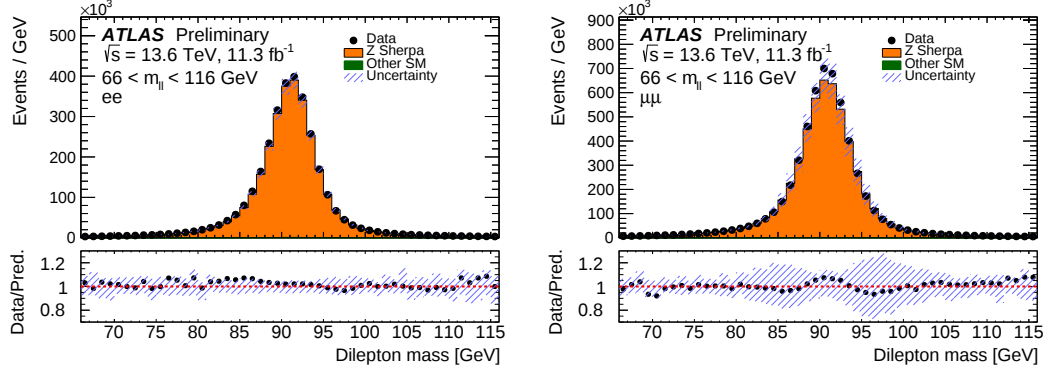


図 22 2022 年に取得したデータで観測された $Z \rightarrow ee$ (左) および $Z \rightarrow \mu\mu$ (右) の不変質量ピーク。

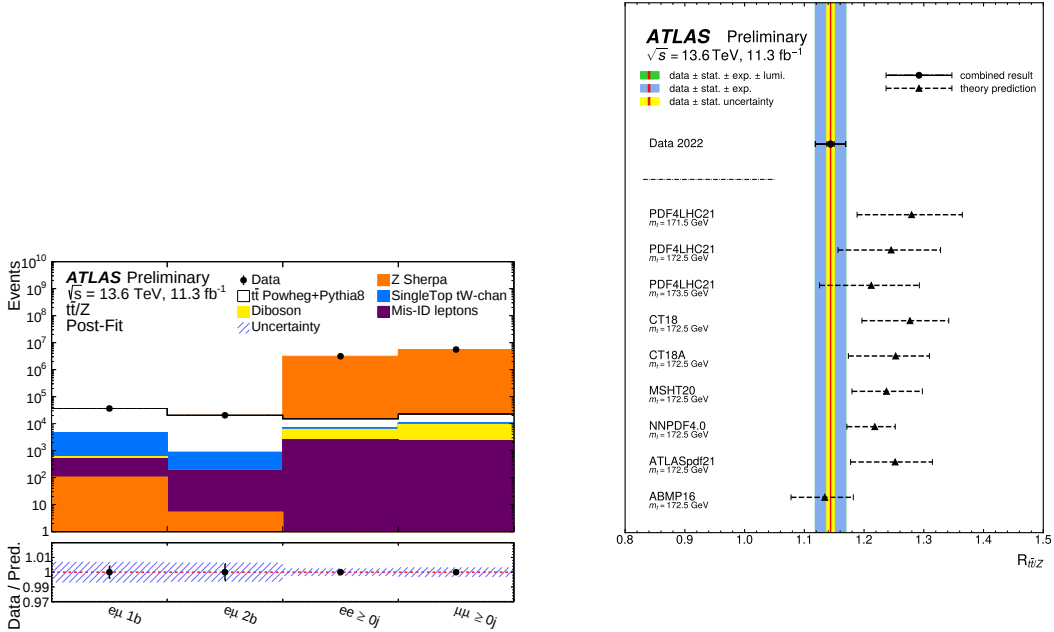


図 23 2022 年に取得したデータを用いた Z ボソンと $t\bar{t}$ の生成断面積の測定 (左)。 Z と $t\bar{t}$ 事象の生成断面積比の測定結果とさまざまな PDF 関数を使用した理論予想の比較 (右)。

図 24 には、2022 年に得られたデータを用いた $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊事象の解析結果を示す。重心系エネ

ルギー 13.6 TeV の陽子・陽子衝突でのヒッグス粒子生成断面積を 31.4 fb^{-1} のデータを用いて、 $\sigma(pp \rightarrow H) = 67_{-11}^{+12} \text{ pb}$ と測定した。標準理論の予言値 $59.8 \pm 2.6 \text{ pb}$ とよく一致している。

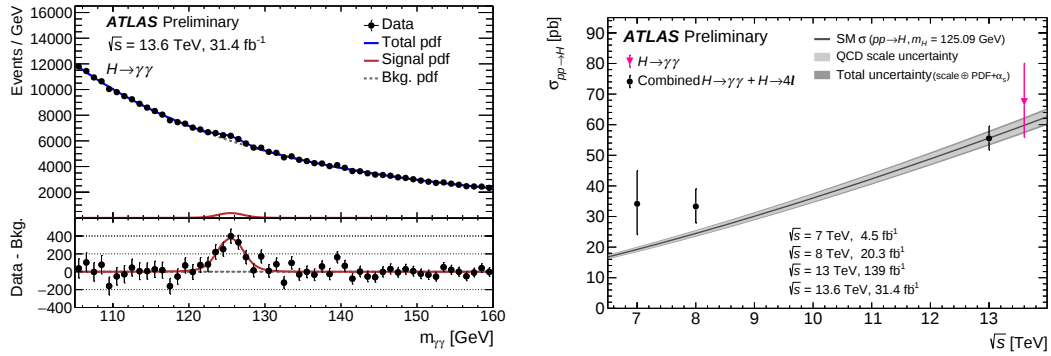


図 24 2022 年に取得したデータを使った $H \rightarrow \gamma\gamma$ 過程の測定。(左) 2 光子の不変質量分布。(右) ATLAS 実験で測定したヒッグス粒子生成断面積を陽子・陽子衝突の重心系エネルギーの関数としてプロットしている。

W ボソン質量測定

2022 年 4 月に、CDF 実験が $80,433.5 \pm 6.4(stat) \pm 6.9(syst) = 80,433.5 \pm 9.4 \text{ MeV}/c^2$ という W ボソン質量の測定結果を、公表した。CDF 実験は、2011 年に稼働を終了した Tevatron 加速器でデータを収集していた実験で、本研究室でも参加していた国際共同実験である。単一実験での測定結果としては最高精度の結果であると同時に、標準理論から 7σ 外れた結果であった。

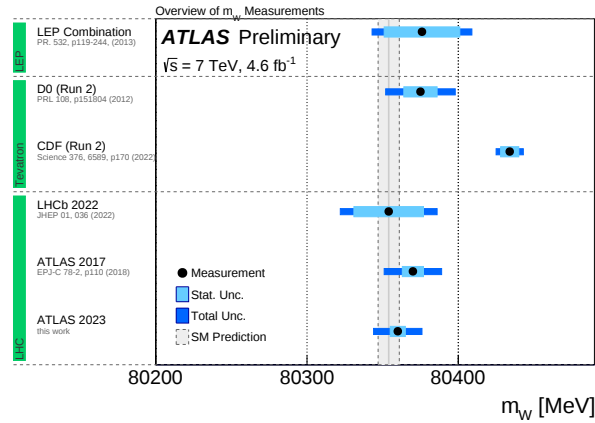


図 25 W ボソンの質量測定の現状。過去のさまざまな加速器実験での測定結果を比較している。ATLAS 実験の 2023 年（最新）と 2017 年の測定は同じデータを用いた結果である。

ATLAS 実験では、2011 年に取得した重心系エネルギー 7 TeV のデータを使って $80370 \pm 7(stat.) \pm 11(exp.syst.) \pm 14(mod.syst.) \text{ MeV}/c^2 = 80370 \pm 19 \text{ MeV}/c^2$ の W ボソン質量の測定結果を、2018 年に論文発表していた。ATLAS 実験は改善されたフィット手法と、最新のデータも記述するように精度を上げた PDF 関数を使用しながら同じデータを解析しなおし、2023 年 4 月に $80360 \pm 5(stat.) \pm 15(syst.) = 80360 \pm 16 \text{ MeV}/c^2$ の暫定結果を公表した。2018 年に公表した結果と矛盾なく、測定精度

が 15% 改善された。また、標準理論ともよく一致する測定結果である。図 25 に、これら最新結果を含めた W ボソン質量測定の状態を示す。

ヒッグス粒子の精密測定

2022 年は、2012 年に ATLAS と CMS 両実験でヒッグス粒子が発見されてからちょうど 10 周年であった。この 10 年でヒッグス粒子の性質の測定精度が精密測定の領域に達し始めている。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。2022 年には ATLAS 実験では、ヒッグス粒子のさまざまな性質を、Run-2 で得られた全データを用いて測定し公表した。

図 26 に、ヒッグス粒子のさまざまな過程での生成断面積と崩壊分岐比の測定結果を示す。

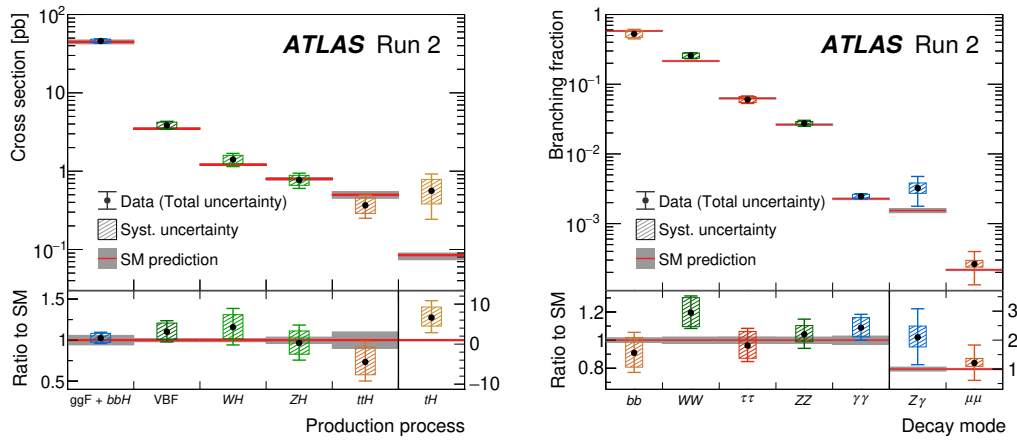


図 26 さまざまな過程でのヒッグス粒子の（左）生成断面積と（右）崩壊分岐比の測定結果。

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。図 27 にヒッグス粒子とさまざまな粒子との間の結合の強さの測定結果を示す。Run-2 データを解析することで測定精度が上がってきたが、いまのところ測定結果は標準理論とよく一致している。ATLAS 実験では、ヒッグス粒子の生成断面積だけでなく、運動学的な領域ごとの生成頻度も測定している。LHC で生成されたヒッグス粒子はさまざまな終状態に崩壊するが、1つの終状態だけでは事象が少ないところを、いろいろな終状態を統一的に解析することで運動学的領域ごとの生成断面積を測定することに成功している（図 28）。この結果もいまのところは標準理論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 29 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、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 Run-2 のデータを使用し、ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象を $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$,

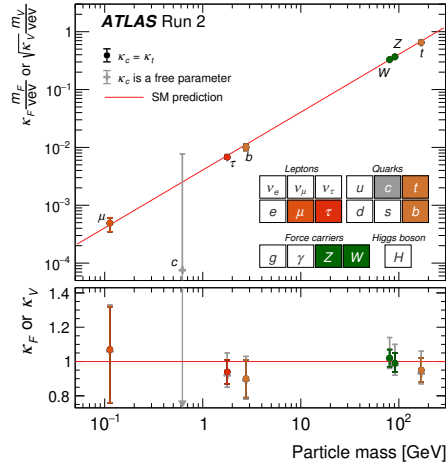


図 27 ヒッグス粒子のさまざまな粒子との結合の強さの測定結果。さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

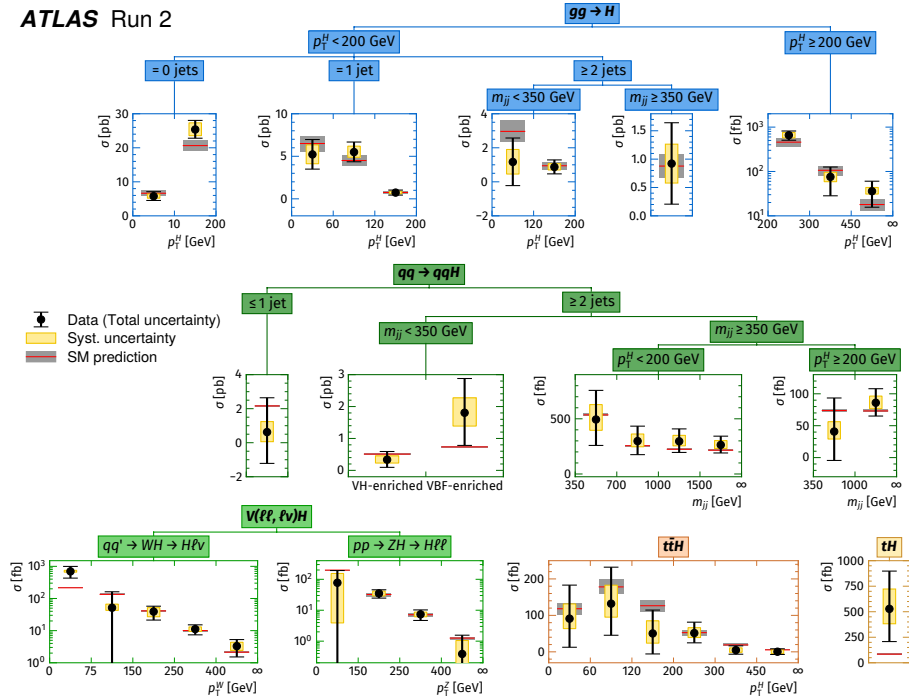


図 28 ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

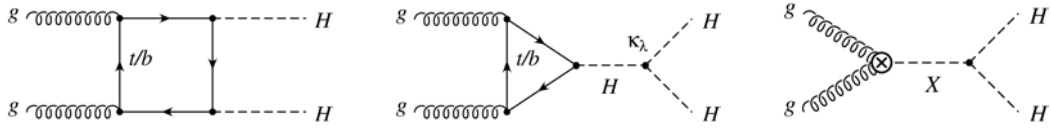


図 29 LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

$HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$ の各崩壊モードで探索した。3 チャンネルとも、データ内に有意な信号の寄与が確認されなかった。これら解析で得られた 2 ヒッグス生成事象の生成断面積の上限値を標準理論予言値で規格化して示したのが図 30 (左) である。3 つの解析チャンネルをコンバインした結果の上限は、標準理論の値の 2.4 倍まで迫ってきている。標準理論では、図 29 の左図と中図の過程が混ざりあって 2 ヒッグス事象は生成されるが、ヒッグス粒子の自己結合の強さ (λ) によってこの混ざり具合が変わり、事象の特徴にも違いが生まれる。図 30 (右) は、さまざまな自己結合 (λ) を仮定したときに得られた 2 ヒッグス過程の生成断面積に対する上限を示している。自己結合の値の標準理論値との比に対する 95% 信頼区間は、 $-0.4 < \kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM}) < 6.3$ である。

Run-3 とそれに続く HL-LHC で多くのデータを蓄積し、2 ヒッグス事象を発見し、ヒッグス粒子の自己相互作用の測定を行うことは、標準理論の新しい一面を検証することになるため重要である。

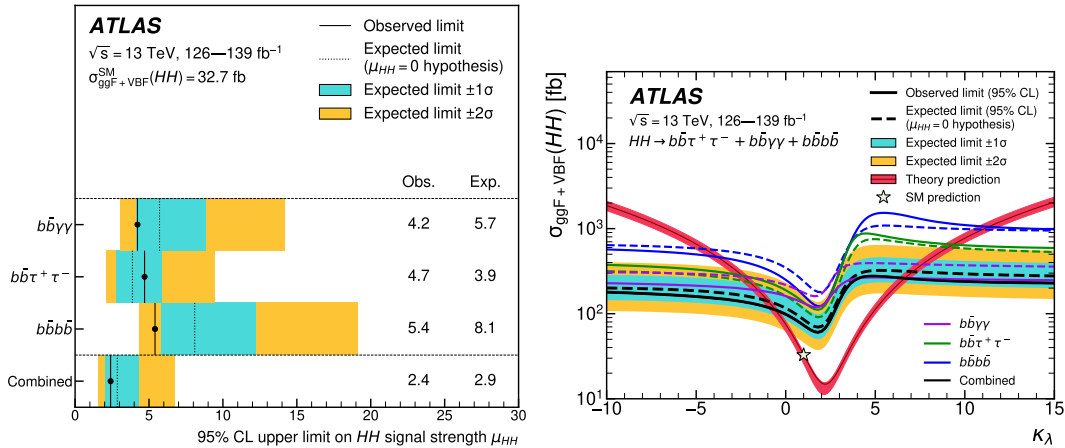


図 30 (左) 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) さまざまな自己結合を仮定したときに得られた 2 ヒッグス事象の生成断面積に対する上限。自己結合の値は、標準理論の値との比 $\kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM})$ で表示している。

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。

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预言されている。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。

ATLAS 実験では 2021 年には、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。本研究室では、引き続き Run-2 データを解析を行っており、ブーストしたジェットを再構成する手法を新たに荷電ヒッグス粒子探索に用いて研究を続けている。2022 年度には $H^\pm \rightarrow tb$ 解析の新結果はなかったが、他の解析チャンネルによる MSSM のヒッグス粒子探索にいくつかアップデートがあった。ATLAS 実験におけるさまざまな重いヒッグス粒子の直接探索解析によって得られた h_{MSSM} シナリオに対する棄却領域をまとめたのが図 31 である。

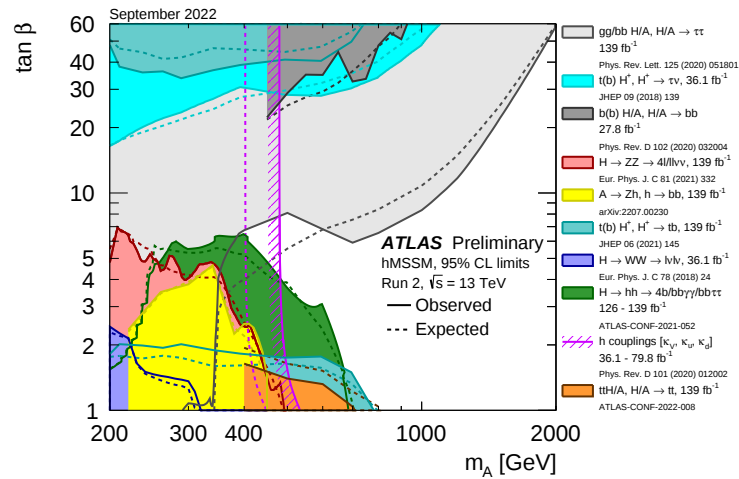


図 31 ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

筑波大グループでは、ATLAS シリコンストリップ検出器 (SCT) の建設およびその後の検出器運転において、重要な貢献を継続してきた。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。SCT は Run 3 運転期間 (2022–2025) 終了時まで、荷電粒子の特定や運動量測定に必須な検出器であるため、Run 3 期間においてはこれまで以上に慎重に検出器の状態を監視しながら運転する必要がある。

LHC Run 3 運転は、ヒッグス粒子発見 10 周年の翌日である、7 月 5 日に本格的に開始された。2018 年以来約 3 年ぶりの ATLAS 検出器全体を使った本格的なデータ収集であったためか、実験開始直後はミュオントリガー用ガス検出器に対する高電圧が適正にかからずトリガー効率が出なかったり、ルミノシティが上がると一部の検出器の同期がずれてしまうなど、データ収集上の問題がいくつか露見したが、その中でも SCT は大きな問題もなく立ち上がり、2022 年のデータ収集期間を走り切った。

一方で、あとからデータを詳しく解析すると、2022 年 10 月頃から放射線量が多い領域で検出効率の低下が見られ、データ収集終了時には通常よりも約 1% 低下していた。これは荷電粒子のトラッキング効率に影響するものではないものの、一度検出効率の低下が始まると、1 ヶ月程度の時間スケールでどんどん下がっていくこともわかり、Run 3 期間ではこれまで以上に検出効率を注意深く監視する必要があるという教訓となった。

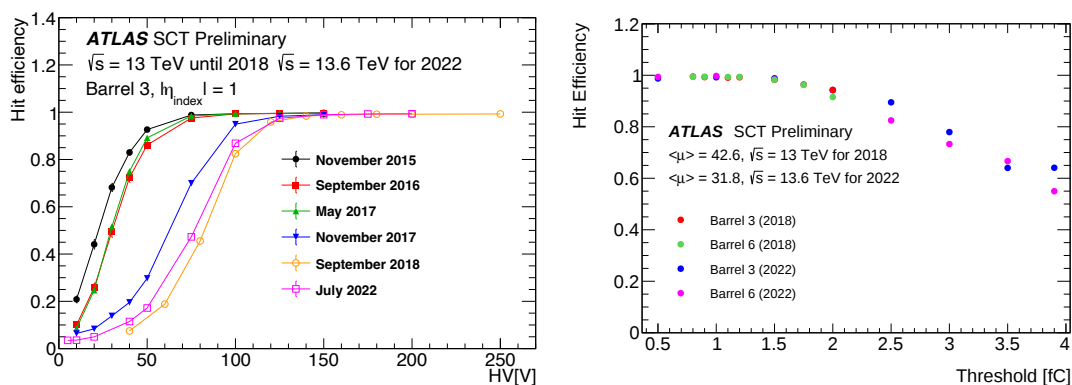


図 32 印加電圧スキャン (左) および閾値スキャン (右) の結果。

このように、SCT に用いられているシリコンセンサーに対する放射線損傷は徐々に深刻になっている。今後、Run 3 終了まで SCT を高効率で安定に運転するには、現在のシリコンセンサーの特性をよく理解しておく必要がある。SCT では、センサーからの生信号を検出器モジュール上の集積回路ですぐにデジタル化し、バイナリデータのみを読み出しているため、測定できる情報は限られる。しかし、印加電圧や閾値をスキャンしながら検出効率などを測定することで、センサーのアナログ特性を推定できる。図 32 (左) は、印加電圧を変えながら測定した検出効率の印加電圧依存性を示す。放射線損傷を受けたシリコン中の実効アクセプター濃度の推移を記述するハンプルクモデルによると、2022 年時点での全空乏化電圧は約 60 V と予想されるが、図 32 (左) の印加電圧 60 V のあたりを見ると、2022 年 7 月の時点での検出効率は 20% にも満たず、99% 前後の高い検出効率を出すには約 140 V の電圧を印加する必要があることが読み取れる。一方で、閾値スキャンからは、高い荷電粒子検出効率に対して直接的に影響する、1 粒子あたりの電荷収集量を見積もることができる。2022 年には、初めて閾値 4 fC 付近までスキャンを行った (図 32 (右))。これにより、検出効率が 50% となるときの閾値から、平均電荷収集量を見積もることが可能となり、2022 年の時点で約 3 fC 程度であるとわかった。これは SCT 用シリコンセンサーの R&D 時のテスト実験結果と大きく変わらない結果である。ただし、図 32 (右) は、シリコンセンサーに対してさまざまな入射角で入射する荷電粒子を含んでしまっている。入射角が大きい荷電粒子の場合、センサー通過距離が長くなるため、電荷収集量も大きくなる。したがって、今後はできるだけ直角にセンサーに入射する荷電粒子候補のみを使って、図 32 (右) のような評価を行う予定である。

放射線損傷によるシリコンセンサーの特性変化を、センサー中での電荷分布のレベルで理解し、Run 3 最終年までの性能変化を予想するために、TCAD シミュレーションを行った。まず、放射線損傷によるアクセプター準位の増加量を、漏れ電流や完全空乏化電圧などの実測値を利用して調整した上で、内部電場構造や電荷分布を詳細に調べた。図 33 は空間電荷分布のバイアス電圧依存性を示す。シリコン

センサー全体がおおむね空乏化した後も、ストリップ直下に空乏化していない部分がわずかに残っており、そこで信号電荷を損失していたために検出効率が十分に出ていなかったことが推測される。表面まで完全に空乏化するには、ハンプルクモデルで予想される完全空乏化電圧よりも相当高い電圧をかける必要がある。このシミュレーション結果から、Run 3 時点で表面空乏化に必要な電圧は 250 V と予想される。一方で、SCT は 500 V まで印加可能であるため、Run 3 終了まで問題なく運転可能である。ただし、印加電圧スキャンの結果（図 32（左））によると、表面空乏化に必要な電圧約 100 V に対してさらに高い、140 V 程度を印加しないと検出効率が 99%（プラトー）に到達していない。この差についてのより正確な理解は、今後の課題である。

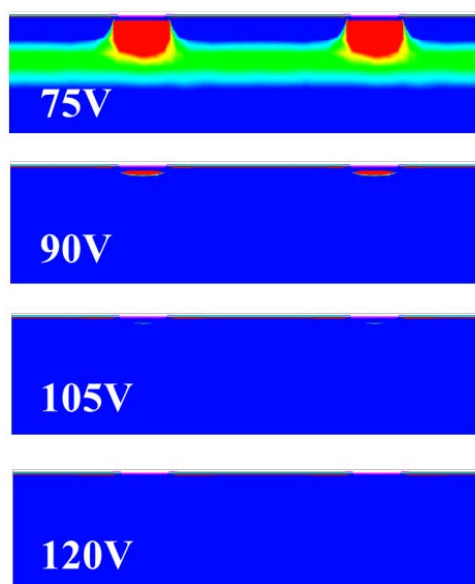


図 33 TCAD シミュレーションによる、Run 2 運転終了時（2018 年 11 月）時点でのセンサー内空間電荷分布の見積もり。青色の部分（空間電荷がほぼゼロ）が空乏化した領域、赤色や緑色の部分は $O(10^{11} / \text{cm}^3)$ の空間電荷が存在する領域を示し、特に赤色となっているのはストリップ（80 μm 間隔）に対応する。

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

COBAND は、筑波大学素粒子実験室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。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）を超伝導体、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（ $\Delta = 20$ μeV , $T_c = 0.165$ 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。

現在、産総研 CRAVITY（現 Qufab）との共同研究によって、漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発が行われ、要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した Nb/Al-STJ 素子が得られている。しかしながら、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) 0.4 mV 程度という微小で正確な定バイアス電圧が、長い冷凍機配線の先に接続された Nb/Al-STJ 素子を動作させるために必要、(b)

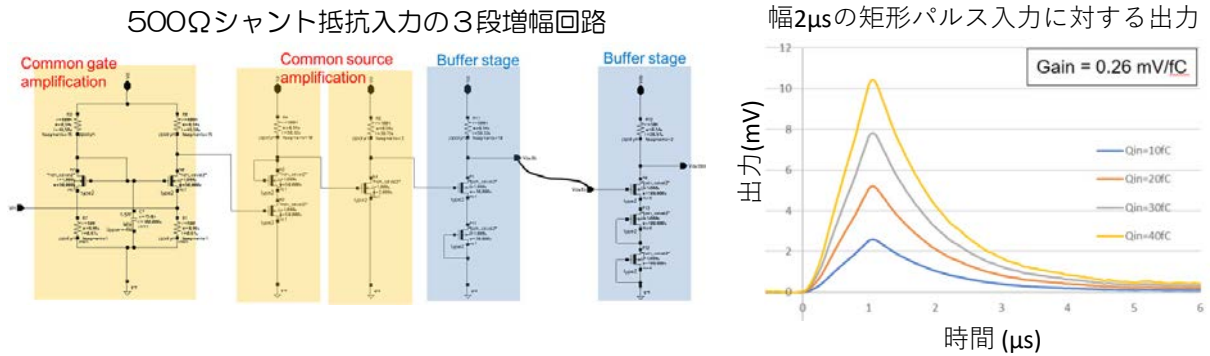


図 34 STJ 信号の読み出しに用いる前置増幅器として設計した回路 (左図)。増幅回路の室温における性能評価。幅 2 μ s の矩形パルス入力に対する応答を示す (右図)。

検出目標となるニュートリノ崩壊光の単一光子 ($E_\gamma \sim 25$ meV) に対する期待される出力電荷は、約 250 e (0.04 fC), (c)STJ からの信号の時定数は数 μ 秒と比較的速く、対して STJ 自身の静電容量は、数十 pF～数 nF と大きい、という理由により、そう単純ではなく、むしろチャレンジングと言える。そこで、我々のグループでは STJ 素子のすぐ近くで信号を増幅可能な読出系として 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や、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の実績がある。これらによって得られた知見のもと、可視光～近赤外域の単一光子を十分に検出可能な性能をもつ増幅回路を設計し、SOI ウェハの MPW ランに参加して製作した。今回製作した回路は、(i) 0.5 k Ω のシャント抵抗を入力としゲート接地段を初段に持つ 3 段増幅の電圧変換増幅器、(ii) カスコード型ミラー回路の差動増幅器をカスケード接続することにより、1 MHz 帯域までの高利得を確保したオペアンプの容量性負帰還による電荷積分型増幅器の二種類である。これらの回路では、回路内の MOSFET のゲート端子が外部に接続する箇所全てに ESD 保護回路を搭載させ、静電気による故障の可能性が低減することを期待した。また出力部にこれまでより電流駆動能力の高いバッファ回路を導入し、0.5 nF 程度ある冷凍機配線の寄生容量に対して 1 MHz 帯域までドライブ可能とした。(i) の電圧変換増幅器の回路、及び室温での実測による評価を図 34 に示す。入力信号として 2 μ s の矩形パルスを使用し、最終段のバッファ段は、使用していない条件でのテストであるが、オシロスコープ入力負荷 (1M Ω , 50pF) に対し、良好な周波数帯域を示している。但し、信号利得はシミュレーションで期待されたものに対して、約 1/10 となっており、設計・シミュレーションの見直しが必要であることが判明した。また、極低温での動作の検証も今後の課題である。

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。

Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が実現すれば、アレイ状に並べた Nb/Al-

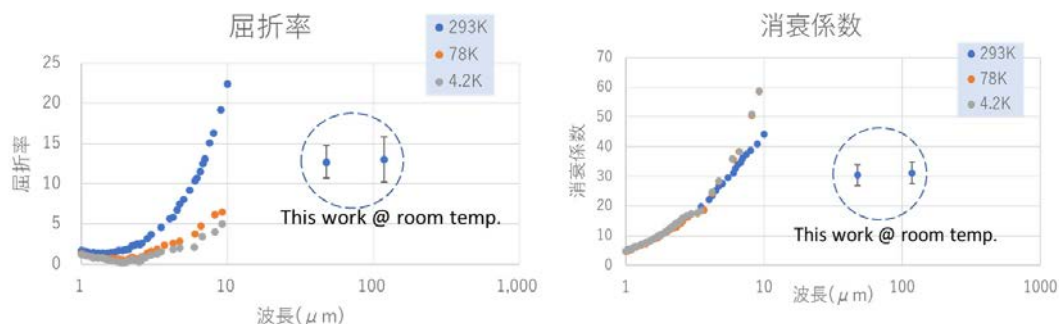


図 35 福井大遠赤センターにおいて遠赤外分子レーザー光源 (波長 47 μm , 118 μm) を用い、エリプソメトリ法により測定されたニオブの屈折率、消衰係数。

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、中部大、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 μm 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。また、光学シミュレーションによる望遠鏡光学系の設計、及びミラーの一部の試作、並びに焦点位置で回折限界 400 $\mu\text{m}\Phi$ の広がりを持つ像を 40 μm 角 STJ 表面に集めるための集光器、STJ 素子表面に施す反射防止膜の開発を行っている。

2022 年度における成果としては、反射防止膜最適化のため Nb の極低温・遠赤外域での光学定数測定 (n, k) を目指し、予備測定として、室温・遠赤外光 (波長 47 μm , 118 μm) での光学定数測定を自作の装置でのエリプソメトリ法により行った (図 35)。光源としては、福井大学の遠赤外領域開発研究センターの遠赤外分子レーザーを用いた。

また、同じく、遠赤外レーザーを用い、Nb スパッタ膜の表面に接着された 10 μm 厚の単結晶シリコン薄膜の反射防止効果を測定した。

(3) 超弦理論の研究 (石橋, 伊敷, 浅野)

超弦理論グループは行列模型、ゲージ重力対応、弦の場の理論という 3 つの関連するテーマを中心として研究を進めている。一般化された行列正則化の構成、フォッカー・プランク形式を用いた弦の場の理論の構築、有限温度における行列模型の数値計算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。

一般化された行列正則化の構成

行列模型は M 理論や超弦理論の非摂動的正則化を与えると予想されている。この予想において、弦や D ブレーンの形状をはじめとする弦理論の幾何学的な情報は、行列模型における行列の配位を用いて記述できると考えられている。そのような記述を与える具体的な方法として、行列正則化と呼ばれるものが知られていたが、この方法は非常に限られた状況においてのみ有効となるものであった。特に、D ブレーンの上には様々な場が存在するが、従来の行列正則化はスカラー場という最も単純な場に対してのみ定義されたものであり、その適用範囲を広げる必要があった。伊敷と大学院生の足立、菅野は昨年度に引き続いて、松本氏 (Dublin 高等研究所) とともにこの問題について研究を行い、行列正則化の一般

化を得ることに成功した。この一般化された行列正則化では、スカラー場のみならず、様々なテンソル場や、さらにそれらに作用するラブラシアンも行列を用いて記述することができる。この結果は 2 次元の場合に 2021 年度にすでに得られていたものであるが、2022 年度の研究ではそれを任意の偶数次元の場合に拡張することに成功した。(論文 49, 50)

フォッカー・プランク形式を用いた弦の場の理論の構築

弦理論の世界面は、数学でリーマン面と呼ばれる面で記述できる。弦理論で現れるリーマン面には、曲率が負で一定になる計量を入れることができる。この計量の入った面は、パンツと呼ばれる基本構造に分解できることが知られている。つまり、弦理論に現れる世界面はパンツと呼ばれる基本構造に分解することができるということになる。この分解のことをパンツ分解と呼ぶ。弦理論を第二量子化した理論である弦の場の理論を作るためには、弦の世界面をプロパゲータとバーテックスに分解するルールが必要になる。上記のパンツ分解は、このようなルールとして使えるのではないかと予想できる。ところが、パンツ分解をもとに弦の場の理論の作用を作ろうとしてもうまくいかないことが、30 年以上前から知られていた。

石橋は、弦の場の理論の作用を直接作るのではなく、フォッカー・プランク形式と呼ばれる定式化を用いればパンツ分解をもとに閉ボゾン弦の場の理論を構築できることを示した。(論文 51) 具体的には、数学で知られている Mirzakhani の recursion relation を一般化して、閉ボゾン弦の振幅の間に成り立つ関係式を求めた。この関係式は、フォッカー・プランク形式を用いて弦の場の理論の形にまとめることができる。ただし、このようにしてできる弦の場の理論は世界面上の BRST 不変性が明白ではない。そこで、補助場を導入することでこの不変性を明白にした。フォッカー・プランク形式の弦の場の理論は単純な 3 点相互作用しか含んでおらず、非常に扱いやすい。この理論を超弦理論の場合に拡張することは将来の問題である。

行列模型と NS5 ブレーンについての研究

弦理論は弦や D ブレーンの他に、NS5 ブレーンと呼ばれる物体を含んでいることが知られている。弦や D ブレーンはその記述法が比較的良好に理解されているが、NS5 ブレーンに対してはほとんど理解がなされていない。特に、NS5 ブレーンがその上にどのような自由度を持つのかや、どのような作用によって記述されるのか、といった基本的な部分すら理解されていないのが現状である。浅野・伊敷は昨年度に引き続いて、松本氏 (Dublin 高等研究所研究員)・渡辺氏 (京都大学研究員)・島崎氏 (元慶応大学研究員) らとともに、行列模型を用いたアプローチによりこの問題を研究した。行列模型は弦理論の非摂動的定式化を与えると予想されており、この予想が正しければ行列模型には NS5 ブレーンが含まれているはずである。この考えに基づき、浅野らは行列模型の数値解析を行い、行列模型に NS5 ブレーンを記述する極限が存在する強い証拠をえた。(論文 52)

有限温度における行列模型の数値計算

超弦理論や M 理論の非摂動的な定式化として行列模型が提案されており、強結合領域で重力理論を実現することが予想されている。しかしながら、強結合領域の解析的な計算には限界があるため、数値的な研究が精力的に進められている。

浅野はダブリン高等研究所の Denjoe O' Connor 教授とコメンスキー大学の Samuel Kovacic 助教と共に行列模型の数値計算を行なっている。特に最近の成果としては、閉じ込め相転移が起こるメカニズムに注目してエントロピーを計算することで、有限の行列サイズでの相転移点付近での振る舞いを明ら

かにした。

この行列模型は様々な研究グループによって活発に研究されてきたが、浅野はこの分野のこれまでの進展をまとめたレビュー論文を発表した (論文 53)。

Lorentz 型行列模型の研究

超弦理論の非摂動的な定式化として提案されている行列模型は、特に数値的な研究が推進されているが、我々が実際に知覚している 4 次元の時空の創発を確認するには、計量の符号を Lorentz 型にした行列模型に取り組む必要がある。しかし、Lorentz 型行列模型の数値計算には激しい符号問題があり、従来の数値的手法では太刀打ちできない。

浅野は KEK の西村淳教授と学生の Piensuk 氏、山森氏と共に、Lorentz 型行列模型を解析的・数値的両側面から研究し、小さな行列サイズでの振る舞いを明らかにした。数値的手法には、近年符号問題を解決する手法として発展している Lefschetz thimble 法を採用し、解析的な結果と一致していることを確認している。また、相転移現象の存在を示唆する結果が、解析的にも数値的にも得られた。これは、大きな行列サイズで予想されている時空創発を実現する相転移と関係していると期待される。

複素 Langevin 法を用いた高密度 QCD の研究

有限密度での QCD は宇宙初期に存在していたと考えられるクォークグルーオンプラズマ相や中性子星内部で実現すると予想されているカラー超伝導相など、多彩な相構造を有していると考えられ、広範な物理分野で強い興味を持たれている。有限密度は符号問題が現れてしまうため、従来のモンテカルロ法では非常に困難な領域であったが、近年発展した様々な数値的手法によりこの困難が克服されてきている。

浅野は KEK の西村淳教授、松古栄夫助教、三浦光太郎研究員、徳山工業高専の伊藤祐太助教、静岡大学の土屋麻人教授、京都大学の滑川裕介研究員、理化学研究所の横田猛研究員、QunaSys の筒井翔一郎研究員らとともに、符号問題を克服する数値的手法の一つである複素 Langevin 法で高密度領域の QCD を研究した。特に、カラー超伝導の相転移を数値的に実証すべく、新たな自由度を入れた理論によるシミュレーションを実行中である。

また、この研究に関連して、格子場の理論におけるゼロモードの研究も行なった (論文 54)。格子場の理論の摂動計算では簡単のためゼロモードの効果を無視することが多いが、有限体積の場合、この近似は必ずしも正当化できない。先行研究により、局所的でない物理量の計算でゼロモードの効果が無視できなくなることが知られていたが、今回の研究で、ゲージ対称性の違いでゼロモードの振る舞いが大きく異なることが明らかになった。

Kaku 理論における古典解の構成

弦の場の理論には様々な定式化が知られており、近年一般的な開弦の場の理論である Kaku 理論が注目されている。この理論は理論が持つパラメータを調整することで多くの古典解が構成されている Witten 理論と光円錐型の相互作用を利用して作られる $\alpha = p^+$ HIKKO を関係づける。

安藤は Kaku 理論のパラメータと弦の運動量の関係を利用し Witten 理論の古典解が Kaku 理論の運動方程式も満たすことを示した (論文 55)。

行列模型の数値計算

超弦理論が large N 極限 (行列サイズが無限に大きい極限) の BFSS 行列模型と非摂動的に等価であると予想され、この予想はいくつもの解析結果から支持されている。超弦理論ではさまざまな次元のブ

レーンの形状、さらにその上でひもが励起するような多様な自由度が存在する。一方で行列模型では全ての自由度が行列として記述されている。よって、行列模型と超弦理論の関係を理解するためにはこれらの自由度の間の対応関係を明確にする必要がある。菅野は Surrey 大学の花田政範研究員、慶應義塾大学の松浦壮教授、京都大学基礎物理学研究所の渡辺展正研究員とともにブレーンの形状に対応する行列を数値的に決定する手法を考案した。

Witten 型弦の場の理論における Ellwood 不変量とエネルギー

Witten 型の弦の場の理論においては、多くの古典解が見つかっており、それらの物理的意味を理解することが重要になる。この際有効なのは、解の持つエネルギーと Ellwood 不変量と呼ばれるゲージ不変量を計算することである。いくつかの静的な解に対しては Ellwood 不変量の一種はエネルギーを用いて書き直すことが出来ることが馬場-石橋によって示されていた。安藤と須田は、Ellwood 不変量をエネルギーを用いて書き直すことが出来ない静的な解が存在する可能性があることを指摘した (論文 56)。

(4) PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究(飯田)

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の観測は、ニュートリノのマヨラナ性や、物質の起源解明に関わる重要な研究である。もし発見されれば現在の宇宙が反物質でなく、物質で形成されている事実を理論的に説明することが出来る。また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊率はニュートリノ有効質量二乗に比例するため、その半減期を測定すれば、素粒子標準理論の粒子で唯一未決定のニュートリノ質量も測定可能である。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 (BG) 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、極稀な $0\nu\beta\beta$ を測定するためには、大量の標的核を必要とする。半導体を用いた実験なども存在するが、シンチレータを用いたシンプルな実験は大型化の際に有利である。二重ベータ崩壊は ^{48}Ca , ^{96}Zr , ^{160}Gd 等、十数種類の特定の原子核のみで観測可能である。我々は、 $\text{Ce:Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}$ (以下、GAGG) という無機シンチレータを用いて、 ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索実験 (PIKACHU 実験) を計画している。 ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索では、2001 年にウクライナで GSO シンチレータを用いて行われた実験がこれまでの最高感度である。二重ベータ崩壊実験では大量の標的核を用いることが重要であるが、この実験で用いられた GSO に含まれる ^{160}Gd の量は 100g と少ないことで感度が制限されている。さらに内部の放射性不純物によるアルファ線がバックグラウンドとして多く存在し、それによって感度が制限されている。我々はこの二点を解決して、最高感度での ^{160}Gd 二重ベータ崩壊探索を目指している。

高純度 GAGG 結晶の開発本研究では、ウラン・トリウム (U/Th) 系列の放射性不純物を極力含まない、高純度な GAGG 結晶の開発に取り組んだ。そのため結晶育成に際して、4 種類の結晶原料 (Gd_2O_3 , Ga_2O_3 , Al_2O_3 , CeO_2) に対して、高純度なものを検討した。原料に含まれる不純物濃度は、筑波大学アイソトープ動態研究センターおよび東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の所有するゲルマニウム (Ge) 半導体検出器を用いて測定した (図 36 左)。

Ge 検出器による測定の結果、 Ga_2O_3 と CeO_2 の二種類に関しては、現在用いている原料が十分に高純度であることが確認できたため、今後もそのまま用いることになった。 Al_2O_3 に関しては、現状のもの以外に 3 種類の異なる製品を取り寄せて、Ge 検出器でその純度を比較した。その結果、最も高純度なものは現状の Al_2O_3 に比べて一桁近く良い純度であることが判明し、今後はその原料を用いることを決定した。最も不純物を多く含んでいたのは Gd_2O_3 原料であった。そこで、日本イットリウム社と協

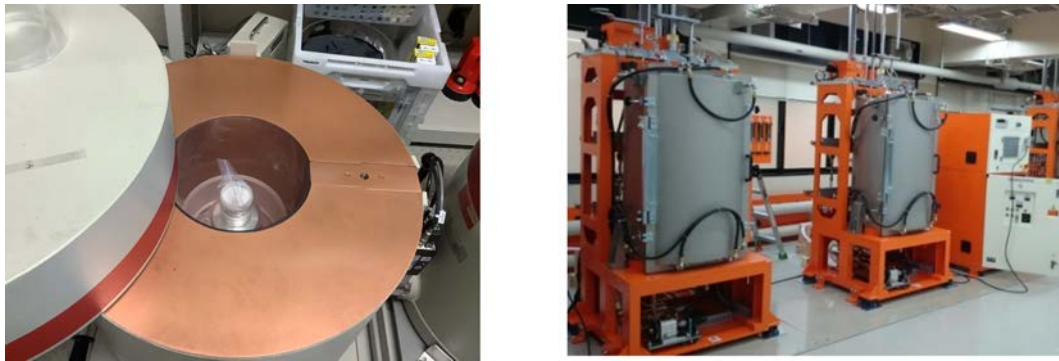


図 36 (左) Ge 検出器内に測定用結晶原料サンプルを設置したところ。(右) 東北大金研のチョクラスキー単結晶育成装置。

力して、イオン交換樹脂により U/Th 不純物を選択的に取り除く作業を行った。Gd₂O₃ と Al₂O₃ の原料に含まれる U/Th 系列の放射性不純物量について、現状のものと、新しく高純度にしたものの二種類を表 5 で比較する。とりわけ重要となる ²³⁸U 系列の不純物量は、どちらも一桁以上の低減に成功したことが分かる。この高純度な原料と、共同研究を行っている東北大学金属材料研究所の炉 (図 36 右) を用いて、チョクラスキー法によって 2 インチサイズ GAGG 単結晶の育成に成功した (図 37)。

表 5 結晶原料に含まれる不純物量の新旧比較。単位は [mBq / kg]。

	Gd ₂ O ₃ (新)	Al ₂ O ₃ (新)	Gd ₂ O ₃ (旧)	Al ₂ O ₃ (旧)
²³⁸ U 系列	< 81.9	< 28.3	1750 ± 221	476 ± 44
²³⁵ U 系列	< 5.36	< 3.54	130 ± 40	< 13.0
²³² Th 系列	4.31 ± 2.04	5.85 ± 2.80	270 ± 12	16.0 ± 24.4
⁴⁰ K	20.9 ± 11.2	< 36.6	84.8 ± 28.7	< 96.5

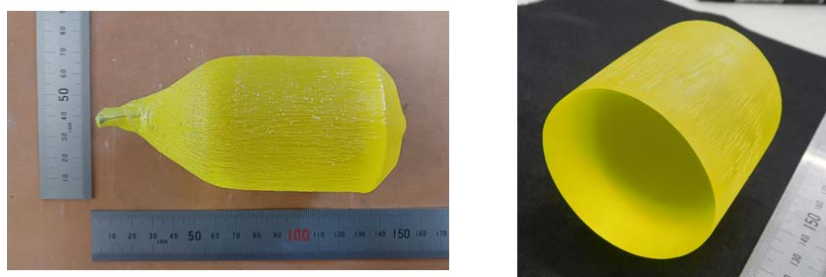


図 37 育成した高純度 GAGG 結晶。右は結晶を切断および研磨した後。

高純度の GAGG 結晶の性能および BG 評価 製作した高純度 GAGG 結晶を切断加工したのち、テフロン反射材を巻き、アクリル製ライトガイド、光電子増倍管と組み合わせたモジュールを作製した。外部からアルファ線およびガンマ線の放射線源を照射し、シンチレータ性能 (エネルギー分解能、波形弁別能) の評価を行った。さらに鉛シールド内に設置し、1 日程度の長時間測定を行い。その結果から U/Th 系列のアルファ線のレート求めた。その結果を純化前の結晶と比較し、どれだけの高純度化を

実現できたかを見積もった。

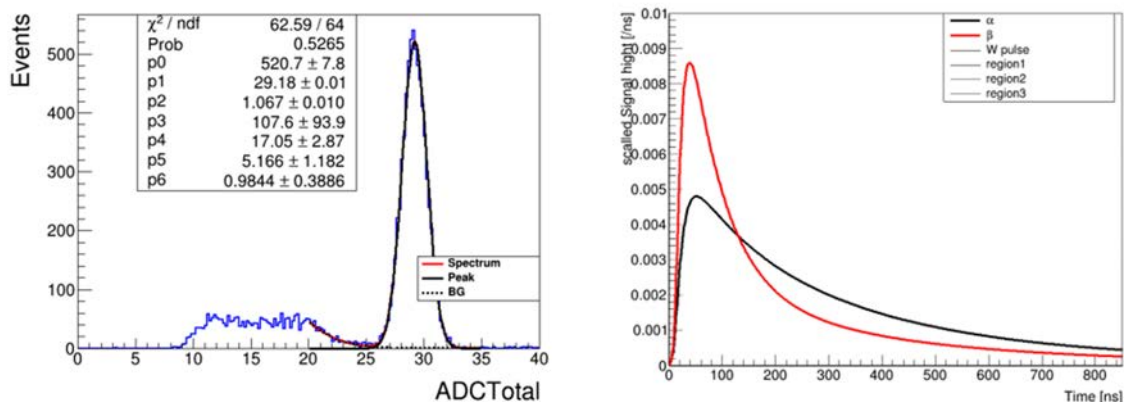


図 38 (左) 高純度結晶に ^{137}Cs 線源を照射したときのスペクトル。横軸は較正前の ADC カウント値。(右) アルファ線（黒）とガンマ線（赤）を照射した場合の平均波形。大きな違いが見て取れる。

高純度 GAGG 結晶に ^{137}Cs の 662 keV の γ 線を照射した際のスペクトルを図 38（左）に示す。光電ピークをガウシアンでフィットし、そのエネルギー分解能を求めた。その結果 $\Delta E/E = 3.7\%$ という値が得られた。これは先行研究の GSO 結晶でのエネルギー分解能よりも良い値である。次にアルファ線とガンマ線をそれぞれ照射したときの波形を 1000 事象程度平均したときの、粒子ごとの平均波形を図 38（右）に示す。赤がガンマ線、黒がアルファ線である。このように粒子の種類によって大きく異なる波形をしており、極めて高い波形弁別（PSD）能を持つことを確認した。

また、筑波大学の鉛シールドに設置し長時間取得したバックグラウンドデータから、PSD でアルファ線を抜き出したときのエネルギースペクトルを次ページの図 39 に示す。青が純化前の旧結晶、赤が高純度結晶のものである。横軸はガンマ線源でキャリブレーションしたエネルギー、縦軸は結晶の重量とデータ取得時間で規格化したものである。青の旧結晶に比べ、赤の新結晶ではアルファ線のレートが大きく低減していることが分かる。このエネルギー範囲でアルファ線の量を比較した結果、ほぼ一桁の低減が認められた。

以上のように、本研究では ^{160}Gd の二重ベータ崩壊の研究に向けた高純度 GAGG 結晶の開発に取り組んでいる。今年度は原料の純化などを行ったうえで、新たな高純度 GAGG 結晶の作製を行った。その結晶の性能やバックグラウンドの調査を行ったところ、優れたエネルギー分解能と、純度の一桁向上が確認された。今後は開発した高純度 GAGG 結晶の大型化、さらなる高純度化に取り組んでいく予定である。

(5) 陽子・反陽子衝突実験 CDF（受川，原，武内，佐藤構二，吉田，金）

CDF 実験は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり、日本をはじめアジア、北米、欧州の計 14 ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれた。2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが、2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 fb^{-1} である。この全データを用いた物理解析もそのほとんどが終了した。

2022 年春には、Run II 実験の全データを用いた W ボソン質量の精密測定の結果が公表された [1]。 W

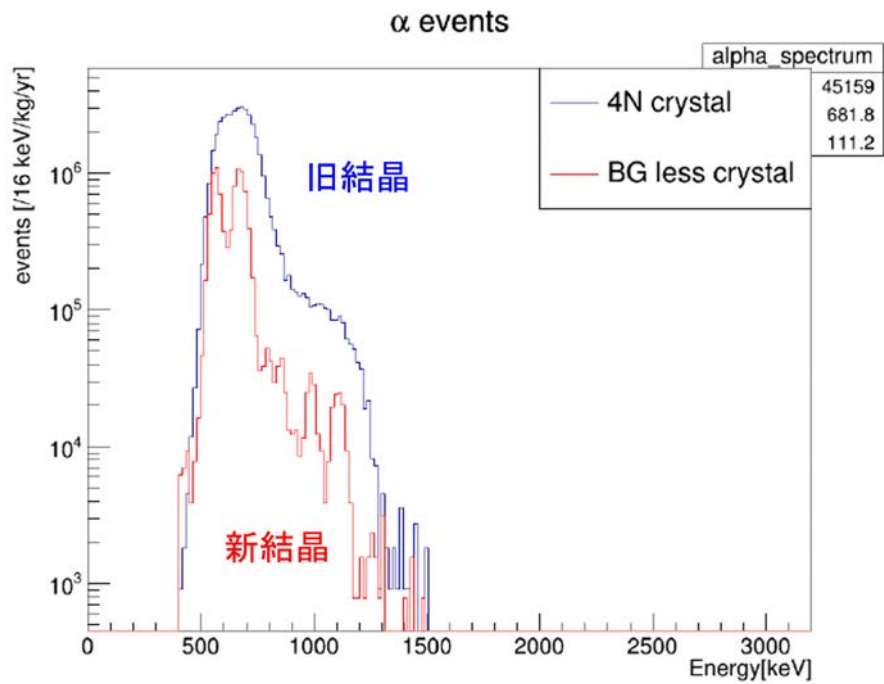


図 39 環境放射線を防ぐ鉛シールド内で丸一日程度測定したバックグラウンドデータから、PSD でアルファ線を選び出したときのエネルギースペクトル。エネルギーはガンマ線で較正している。

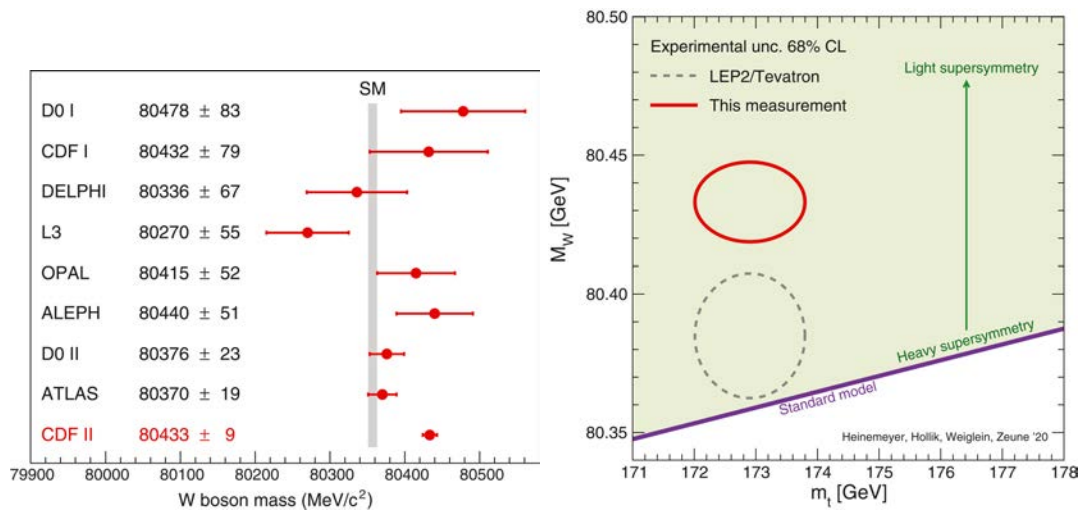


図 40 (左) W ボソン質量について、2022 年の CDF 実験の結果と他の測定の比較。(右) W ボソン質量とトップ・クォークの質量の関係。実線の楕円が実験値の確度 68% の範囲を示し、今回の CDF 実験の結果を踏まえたもの。斜めの帯が標準理論の予言（ヒッグス粒子質量は実測値を反映）。ともに文献 [1] より。

ボソンは素粒子の弱い相互作用を媒介するゲージ粒子で、およそ $80 \text{ GeV}/c^2$ の質量を持つ。その測定は、素粒子標準理論の基本パラメータの決定、および、トップ・クォーク、ヒッグス粒子の質量の情報と組み合わせて、量子効果による新粒子・新物理の寄与を探るうえで、重要である。

今回の結果 (図 40) は、単独の測定でこれまでの世界平均の精度を上回るものであり、また、標準理論の予言と食い違うことから、新聞・テレビでも報道され、注目を集めた。理論との不一致の原因については様々な解釈が可能であるが、当面は、他実験で同程度の精度を持つ測定が得られるのを待つのが正しい姿勢であると思われる。

〈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に掲載した。

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], “High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector,” *Science* **376**, 170 (2022)
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 087 (2022)
3. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for neutral long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS calorimeter,” *JHEP* **06**, 005 (2022)
4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for events with a pair of displaced vertices from long-lived neutral particles decaying into hadronic jets in the ATLAS muon spectrometer in pp collisions at $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$,” *Phys. Rev. D* **106**, no.3, 032005 (2022)
5. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of jet observables sensitive to b-quark fragmentation in tt^- events at the LHC with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **106**, no.3, 032008 (2022)
6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross-sections in top-quark pair events with a high transverse momentum top quark and limits on beyond the Standard Model contributions to top-quark pair production with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$,” *JHEP* **06**, 063 (2022)
7. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the polarisation of single top quarks and antiquarks produced in the t-channel at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ and bounds on the tWb dipole operator from the ATLAS experiment,” *JHEP* **11**, 040 (2022)
8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible Higgs-boson decays in events with vector-boson fusion signatures using 139 fb^{-1} of proton-proton data recorded by the ATLAS experiment,” *JHEP* **08**, 104 (2022)
9. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **105**, no.9, 092002 (2022)
10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for type-III seesaw heavy leptons in leptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.11, 988 (2022)
11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Two-particle Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.7, 608 (2022)
12. 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 diphoton decay channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 027 (2022)
13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of WWW Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **129**, no.6, 061803 (2022)
14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Direct constraint on the Higgs-charm coupling from a search for Higgs boson decays into charm quarks with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, 717 (2022)
15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 175 (2022)
16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single

- production of a vectorlike T quark decaying into a Higgs boson and top quark with fully hadronic final states using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **105**, no.9, 092012 (2022)
17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature using 136 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.7, 606 (2022)
 18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the two bottom quarks plus two photons final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **106**, no.5, 052001 (2022)
 19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the parton distribution functions of the proton using diverse ATLAS data from pp collisions at $\sqrt{s} = 7, 8$ and 13 TeV ,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.5, 438 (2022)
 20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Modelling and computational improvements to the simulation of single vector-boson plus jet processes for the ATLAS experiment,” *JHEP* **08**, 089 (2022)
 21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for an unexpected asymmetry in the production of $e+\mu^-$ and $e-\mu^+$ pairs in proton–proton collisions recorded by the ATLAS detector at $s=13\text{ TeV}$,” *Phys. Lett. B* **830**, 137106 (2022)
 22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral-current interactions of a top quark and a gluon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.4, 334 (2022)
 23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for associated production of a Z boson with an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates at $s=13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **829**, 137066 (2022)
 24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on Higgs boson production with large transverse momentum using $H \rightarrow b\bar{b}$ decays in the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **105**, no.9, 092003 (2022)
 25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of azimuthal anisotropies of jet production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **105**, no.6, 064903 (2022)
 26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of Higgs boson decay into b -quarks in associated production with a top-quark pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 097 (2022)
 27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs bosons decaying into new spin-0 or spin-1 particles in four-lepton final states with the ATLAS detector with 139 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$,” *JHEP* **03**, 041 (2022)
 28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the energy asymmetry in $t\bar{t}j$ production at 13 TeV with the ATLAS experiment and interpretation in the SMEFT framework,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.4, 374 (2022)
 29. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into a pair of pseudoscalar particles in the $b\bar{b}\mu\mu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s}=13\text{ TeV}$,” *Phys. Rev. D* **105**, no.1, 012006 (2022)
 30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on Higgs boson properties using $WW^*(\rightarrow e\nu\mu\nu)jj$ production in 36.1 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.7, 622 (2022)
 31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the c-jet mistagging efficiency in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ collected with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.1, 95 (2022)
 32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exotic decays of the Higgs boson into $b\bar{b}$ and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 063 (2022)
 33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker in LHC Run 2,” *JINST* **17**, no.01, P01013 (2022)
 34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “AtlFast3: The Next Generation of Fast Simulation in ATLAS,” *Comput. Softw. Big Sci.* **6**, no.1, 7 (2022)
 35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of two jets in association with an isolated photon and missing transverse momentum, and search for a Higgs boson decaying into invisible particles at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C*

82, no.2, 105 (2022)

36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the nuclear modification factor for muons from charm and bottom hadrons in Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **829**, 137077 (2022)
37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles in the b -tagged dijet mass distribution with additional b -tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **105**, no.1, 012001 (2022)
38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the energy response of the ATLAS calorimeter to charged pions from $W^\pm \rightarrow \tau^\pm(\rightarrow \pi^\pm \nu_\tau) \nu_\tau$ events in Run 2 data,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.3, 223 (2022)
39. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS inner detector trigger performance in pp collisions at 13 TeV during LHC Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.3, 206 (2022)
40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in three- or four-lepton events in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **824**, 136832 (2022)
41. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavor-violation in Z -boson decays with τ -leptons with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 271801 (2022)
42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Level-1 topological trigger in Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.1, 7 (2022)
43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Emulating the impact of additional proton–proton interactions in the ATLAS simulation by presampling sets of inelastic Monte Carlo events,” *Comput. Softw. Big Sci.* **6**, no.1, 3 (2022)
44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single top-quark production via flavour-changing neutral currents at 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, no.2, 55 (2016) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **82**, no.1, 70 (2022)]
45. T. Iida, *et al.*, “Gamma and neutron separation using emission wavelengths in Eu:LiCaI scintillators”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2023, Issue 2, February 2023, 023H01
46. S. Umehara, T. Iida *et al.*, “Status of 48 Ca double beta decay search with CANDLES”, *PoS (PANIC2021)/(380)*, May, 2022
47. M. Yoshino, T. Iida, *et al.*, “Comparative pulse shape discrimination study for Ca(Br, I) scintillators using machine learning and conventional methods”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 1045, (2023), 167626
48. 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 吉田拓生, 他 COBAND collaboration, “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験”, 観測ロケットシンポジウム 2021 講演集 *Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2020 SA6000162000, II-4* (2022), 査読なし
49. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, “Matrix regularization for tensor fields,” *PTEP* 2023, no.1, 013B06 (2023)
50. H. Adachi, G. Ishiki and S. Kanno, “Vector bundles on fuzzy Kähler manifolds,” *PTEP* 2023, no.2, 023B01 (2023)
51. N. Ishibashi, “The Fokker-Planck formalism for closed bosonic strings,” *PTEP* 2023, no. 2., 023B05 (2023)
52. Y. Asano, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Shimasaki and H. Watanabe, “On the existence of the NS5-brane limit of the plane wave matrix model,” *PTEP* 2023, no.4, 043B01 (2023)
53. Y. Asano, “Numerical development of the matrix model for non-perturbative formulation of M-theory,” *Eur. Phys. J. ST* **232** (2023) no.3, 321-331
54. Y. Asano and J. Nishimura, “The dynamics of zero modes in lattice gauge theory—difference between SU(2) and SU(3) in 4D,” [arXiv:2303.01008 [hep-lat]]
55. Y.Ando, “The classical solutions with $k_- = 0$ in Kaku theory,” arXiv:2302.03928 [hep-th]
56. Y.Ando, T.Suda, “Energy from Ellwood invariant for solutions involving X^0 variables,” arXiv:2303.13789 [hep-th]

〈著書・総説等〉

1. 伏見賢一, 飯田崇史, *et al.*, “高純度ヨウ化ナトリウムの結晶育成”, *日本結晶成長学会誌/49(4)/pp.26-34*, 2023 年 1 月
2. 受川史彦, “CDF 実験による W ボソン質量の測定”, *高エネルギーニュース* **41**, 54 (2022)

〈学位論文〉

[博士論文]

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2023 年 3 月

1. 足立 宏幸: Berezin-Toeplitz quantization of vector bundles over Kähler manifolds

[修士論文]

大学院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム, 2023 年 2 月

1. 柏木 隆城: COBAND 実験のための反射防止膜とサブミリサイズ遠赤外集光器の開発
2. 守屋 佑希久: COBAND 実験に向けた高利得広帯域な極低温電荷・電流増幅器の性能評価
3. 須田 友也: Witten 型弦の場の理論における古典解と観測可能量
4. 吉田 悠人: 行列模型と球面 M2/M5 プレーン

〈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した。

[国際会議]

1. Y. Takeuchi, “R&D of Hf-STJ as FIR single-photon spectrometer for COBAND”, Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022, Session: Universe Evolution and Matter Origin, Sep. 28, 2022 (video presentation)
2. Takashi Iida, “(Invited) Review of Neutrino-less double beta decay experiment”, Vietnam School on Neutrinos (VSON2022), 2022 年 7 月 10-22 日, ICISE center, Quy Nhon, Vietnam (Hybrid)
3. Takashi Iida, “(Poster) Study of Gd-160 double beta decay by PIKACHU experiment”, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022), 2022 年 6 月 13-15 日, Tokyo Univ. of Science
4. 石橋延幸, “The Fokker-Planck formalism for closed bosonic strings”, 2022 NTU-Kyoto high energy physics workshop (Dec. 17-20, 2022 National Taiwan University, Taiwan) (招待講演)
5. 石橋延幸, “Onogi-san as a string theorist”, Nonperturbative Analysis of Quantum Field Theory and its Applications (Sept. 22, 2022 Osaka University, Japan) (招待講演)
6. 石橋延幸, “The Fokker-Planck formalism for closed bosonic strings”, SFT@Cloud Journal Club (March 9, on line) (招待講演)

[国内学会・研究会]

1. 飯田崇史: 新しいシンチレータを創ろう! , 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」公募研究セミナー. 2022 年 10 月 5 日 オンライン
2. 飯田崇史: シンチレータを用いた素粒子実験と機械学習の融合, 計算・材料・物理による融合領域創成のための研究会, 2022 年 9 月 7-8 日 岡山市第一セントラルビル 2 号館セントラルフォレスト
3. 飯田崇史: PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の探索, 第 8 回極低放射能技術 研究会, 2022 年 11 月 24 日 つくば国際会議場 中会議室 202
4. 飯田崇史: (Poster) Eu:LiCaI シンチレータの発光波長情報を用いた粒子識別, Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2022), 2022 年 12 月 17~19 日 徳島大学
5. 大森匠: (Poster) PIKACHU 実験における GAGG シンチレータの性能評価, Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2022), 2022 年 12 月 17~19 日 徳島大学
6. 高橋光太郎: (Poster) Geant4 による PIKACHU 実験用 GFAG シンチレータのバックグラウンド事象の評価, Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2022), 2022 年 12 月 17~19 日 徳島大学
7. 飯田崇史, 吉野将生, 鎌田圭, 伏見賢一, 細川佳志, 日野原伸生, 中島恭平, 水越慧太: PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究 2—高純度結晶の開発—, 日本物理学会 2022 年秋季大会 岡山理科大学 2022 年 9 月 7 日
8. 飯田崇史, 吉野将生, 鎌田圭, 伏見賢一, 細川佳志, 日野原伸生, 中島恭平, 水越慧太, 高橋光太郎, 大森匠: PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究 3—高純度結晶開発の現状—, 日本物理学会 2023 年春季大会 オンライン 2023 年 3 月 25 日
9. 高橋光太郎, 飯田崇史, 大森匠 他 PIKACHU collaboration: PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究 4—結晶内バックグラウンドの評価—, 日本物理学会 2023 年春季大会 オンライン 2023 年 3 月 25 日
10. 金信弘: COBAND 実験のための反射防止膜の開発, 宇宙宙研究センター 2022 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2022 年 6 月 24 日), 筑波大学

11. 守屋佑希久：COBAND 実験のための極低温増幅器の研究開発，
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日)，岡山理科大学
12. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外集光器と反射防止膜の開発，
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日)，岡山理科大学
13. 柏木隆城：ニュートリノの崩壊探索のための反射防止膜の開発，
SAT テクノロジー・ショーケース 2023(2023 年 1 月 26 日)，つくば国際会議場
14. 守屋佑希久：ニュートリノ崩壊探索のための超伝導素子読み出し極低温増幅器の開発，
SAT テクノロジー・ショーケース 2023(2023 年 1 月 26 日)，つくば国際会議場
15. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験，
第 5 回観測ロケットシンポジウム (2023 年 2 月 28 日-3 月 1 日)，JAXA/ISAS，オンライン
16. 守屋佑希久：COBAND 実験に向けた高利得広帯域な極低温電荷・電流増幅器の性能評価，
宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ (2023 年 3 月 16 日)，オンライン
17. 柏木隆城：COBAND 実験における反射防止膜の開発，
宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ (2023 年 3 月 16 日)，オンライン
18. 武内勇司：系外銀河による宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索感度への影響，宇宙史研究センター 2022 年度ワークショップ (2023 年 3 月 16 日)，オンライン
19. 柏木隆城：COBAND 実験のためのサブミリサイズ遠赤外集光器と反射防止膜の性能評価，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日)，オンライン
20. 守屋佑希久：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XV，
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日)，オンライン
21. 原和彦：CDF での W ボゾン質量の精密測定，
基研研究会 素粒子物理学の進展 2022(2022 年 8 月 29 日-9 月 2 日)，京都大学
22. 廣瀬茂輝：ATLAS 実験シリコンストリップ検出器 Run 2 運転までのまとめと Run 3 運転の状況，
OpenIt 計測システム研究会 2022(2022 年 11 月 16-17 日)，KEK 東海キャンパス
23. 佐藤構二：ATLAS 実験の最近の物理成果，
宇宙史研究センター 2022 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2022 年 11 月 28 日)，オンライン開催
24. 足立宏幸，伊敷吾郎，菅野聡：量子補正を含めたゲージ理論の行列正則化の計算，
日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン，2023 年 3 月 22-25 日)
25. 菅野聡：ゲージ場の行列正則化と Seiberg-Witten map，
Poisson 幾何とその周辺 22 (東京理科大学神楽坂キャンパス，2022 年 12 月 3-4 日)
26. 足立宏幸，伊敷吾郎，菅野聡，松本高興：ケーラー多様体上のベクトル束の行列正則化，
日本物理学会 2022 年秋季大会 (岡山理科大学岡山キャンパス，2022 年 9 月 6-8 日)
27. 菅野聡：行列正則化の一般化について 1，
離散的手法による場と時空のダイナミクス 2022 (東京理科大学神楽坂キャンパス，2022 年 8 月 22-25 日)
28. 足立宏幸：行列正則化の一般化について 2，
離散的手法による場と時空のダイナミクス 2022 (東京理科大学神楽坂キャンパス，2022 年 8 月 22-25 日)
29. 菅野聡：様々な場に対する行列正則化，
場の理論と弦理論 2022 (オンライン，2022 年 8 月 19-23 日，ポスター発表)
30. 浅野侑磨，西村淳，Worapat Piensuk，山森直幸：レフシッツ・シンブル法を用いた IKKT 行列模型の数値的研究，
日本物理学会 2022 年秋季大会 (岡山理科大，2022 年 9 月 6-8 日)
31. 浅野侑磨，西村淳，Worapat Piensuk，山森直幸：レフシッツ・シンブル法を用いた IKKT 行列模型の数値的研究と解析的理解，
日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン，2023 年 3 月 22-25 日)
32. Yuhma Asano, Jun Nishimura, Worapat Piensuk, Naoyuki Yamamori : $1/D$ expansion in the bosonic Lorentzian IKKT matrix model with a mass term，
日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン，2023 年 3 月 22-25 日)
33. 三浦光太郎，浅野侑磨，伊藤祐太，松古栄夫，滑川裕介，西村淳，土屋麻人，筒井翔一郎，横田猛：有限密度格子 QCD における複素 Langevin 法と diquark 凝縮の研究，
日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン，2023 年 3 月 22-25 日)
34. 菅野聡：単調性を用いたレプリカ交換モンテカルロ法の拡張と行列幾何学，
日本物理学会 (岡山理科大，岡山，2022 年 9 月 6 日)
35. 菅野聡：レプリカ交換の手法を用いたアルゴリズムと行列模型，
計算物理春の学校 2023(沖縄県市町村自治会館，沖縄，2023 年 3 月 15 日)
36. 安藤雄史：Kaku vertex を用いた弱い A1 構造のあるボソン開弦の場の理論，
原子核三者若手夏の学校 2022(オンライン，2022 年 8 月 6-9 日)
37. 須田友也：Witten 型ボソン開弦の場の理論における時間依存性のある解のエネルギーと Ellwood 不変量，
原子核三者若手夏の学校 2022(オンライン，2022 年 8 月 6-9 日)
38. 安藤雄史：Kaku vertex を用いた開弦-閉弦場の理論，

日本物理学会 2023 年春季大会（素核宇）（オンライン, 2023 年 3 月 22 –25 日）

39. 石橋延幸：The Fokker-Planck formalism for closed strings,
宇宙史研究センター 2022 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会（筑波大学, 2022 年 11 月 28 日）

〈受賞・新聞やテレビなど掲載〉

1. 飯田崇史：コニカミノルタ画像科学奨励賞（令和 4 年度）, 「放射線粒子の色を見る！ 革新的シンチレーション検出器の開発」
2. 足立宏幸：筑波大学大学院数理物質科学研究群長賞（2022 年度博士論文）, 2023 年 3 月
3. 石橋延幸：PTEP editors' choice, 「The Fokker-Planck formalism for closed bosonic strings」
4. 石橋延幸：JPS Hot topics, 「A Closed Bosonic String Field Theory Based on the Fokker-Planck formalism」,
<https://jpsht.jps.jp/article/3.013.html>
5. 受川史彦, 武内勇司, 原和彦, 佐藤構二, 金信弘, 他 CDF collaboration：「CDF 実験グループが, 基本粒子 W ボソンの質量をかつてない精度で測定」,
読売新聞, AP 通信, BBC, NHK(4 月 25 日) 等で報道

〈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. 安藤雄史：「原子核三者若手夏の学校 2022」世話人,
オンライン開催（2022 年 8 月 6 日–9 日）参加登録人数：319 人世話人：戸田陽, 青木匠門, 村山修一, 安藤雄史, 五十嵐律矩,
新延弘章, 古賀一成, 大久保勇利, 劉凱淇
2. 石橋延幸：PTEP 執行編集委員
3. 石橋延幸：PTEP 編集委員
4. 石橋延幸：日本物理学会素粒子論領域副代表

〈競争的資金〉

1. 科学研究費 新学術領域研究（研究領域提案型）「異分野連携で挑む革新的水シンチレータの実現」, 2021–2022 年度, 研究代表者：飯田崇史,
1,170 千円（直接経費：900 千円, 間接経費：270 千円）（2022 年度）
2. 科学研究費 新学術領域研究（研究領域提案型）「PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究」, 2022–2023 年度, 研究代表者：飯田崇史,
3,250 千円（直接経費：2,500 千円, 間接経費：750 千円）（2022 年度）
3. 公益財団法人島津科学技術振興財団/研究開発助成（領域全般） 「無機シンチレータでの発光波長と応答波形を用いた粒子識別技術の開拓」, 2021–2024 年度, 研究代表者：飯田崇史,
1,000 千円（直接経費：1,000 千円, 間接経費：0 千円）（2021–2024 年度）
4. 公益財団法人旭硝子財団/物理・情報 研究奨励「材料科学・機械学習との融合による新しいシンチレーション検出器と粒子識別手法の開拓」, 2022–2023 年度, 研究代表者：飯田崇史,
1,900 千円（直接経費：1,900 千円, 間接経費：0 千円）（2022–2023 年度）
5. 公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団/コニカミノルタ画像科学奨励賞 「放射線粒子の色を見る！ 革新的シンチレーション検出器の開発」, 2022–2024 年度, 研究代表者：飯田崇史,
500 千円（直接経費：500 千円, 間接経費：0 千円）（2022–2024 年度）
6. 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,
5,070 千円（直接経費：3,900 千円, 間接経費：1,170 千円） 2023 年へ 1,900 千円繰り越し
7. 科学研究費 基盤研究（C）「超弦の場の理論を用いた超弦理論のダイナミクスの研究」, 2018 – 2022 年度, 研究代表者：石橋延幸,
650 千円（直接経費：500 千円, 間接経費：150 千円）（2022 年度）
8. 科学研究費 基盤研究（C）「行列模型による超弦理論の非摂動的定式化の研究」, 2019 – 2022 年度, 研究代表者：伊敷吾郎,
1,300 千円（直接経費：1,000 千円, 間接経費：300 千円）（2022 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 国際テニユア助教)

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)

Abderrahmane Ghimouz (数理物質系物理学域 研究員)

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

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

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)

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

若杉 昌徳 (京都大学・理学研究科 教授) 客員教授

齋藤 武彦 (理化学研究所 主任研究員) 客員教授

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) 客員教授

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) 客員准教授

稲葉 基 (筑波技術大学・産業情報学科 准教授) 客員准教授

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)

杉立 徹 (広島大学・学術・社会連携室 特任教授)

濱垣 秀樹 (長崎総合科学大学・新技術創成研究所 特命教授)

山口 貴之 (埼玉大学 准教授)

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)

これまでクロスアポイントメント教員であっ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、客員教員として、J-PARC 施設における高密度核物質研究に関する共同研究を進め、埼玉大学の山口貴之氏は、理研の RIBF 施設における元素合成に関する共同研究を進めた。理化学研究所の齋藤武彦氏を客員教授として、同じく山口由高氏、筑波技術大の稲葉基氏を客員准教授として研究協力の強化を進めた。ユニット招致の副 PI 助教の Norbert Novitzky 氏、研究員の Ashutosh Kumar Pandey 氏、Abderrahmane Ghimouz 氏が異動になり、新たな副 PI 助教の Jonghan Park 氏が着任することになった。連携教員の谷口裕介氏が、闘病の末、亡くなられた。ご冥福をお祈りいたします。

ビッグバン直後の宇宙初期に実現したと考えられるクォーク・グルオン・プラズマ状態から通常のハドロン物質への相転移前後のクォーク物質の様々な熱力学的性質は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明において重要である。これは本質的に非摂動的な問題であり、格子 QCD による QCD 第一原理からの大規模シミュレーションが不可欠である。クォーク物質の相構造や熱力学特性を引き出すために、有限温度・有限密度格子 QCD を研究し、またそのための技術開発を進めた。スイス・フランスの欧州共同原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器や、アメリカ・ブルックヘブン国立研究所 (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) 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

クォークが重い QCD の臨界クォーク質量

ビッグバン直後に実現したクォーク・グルオン・プラズマ状態から通常のハドロン物質への相転移前後のクォーク物質の様々な熱力学的性質は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明において重要である。また、それを地上で実現させる高エネルギー重イオン衝突実験も精力的に推進されている。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。

物理点 QCD の相転移はクロスオーバーであり、近傍の臨界点のスケールリングの影響を受けていると考えられている。臨界点は、クォーク質量が軽い側と重い側の両方に存在するが、近年の格子 QCD 研究により、 $2+1$ フレーバー QCD の軽い側の臨界点が 3 フレーバー QCD のカイラル極限 ($m_u = m_d = m_s = 0$) まで後退している可能性が高いことがわかって来た。従って、物理点のクロスオーバーに、重い側の臨界点も影響している可能性がある。

クォークが重い極限の QCD は、クォークがデカップルして $SU(3)$ Yang-Mills 理論となるが、その有限温度相転移は $Z(3)$ 有効スピン系と同じユニバーサリティー・クラスに属する 1 次相転移である。クォーク質量を無限大から下げていくと、クォーク質量の逆数が $Z(3)$ 有効スピン系に外部磁場として作用するため、この 1 次相転移はある臨界クォーク質量で連続的なクロスオーバーに変化する。この境界が、重い側の臨界点で、その近傍で $Z(2)$ の臨界スケールリングが期待される。

先行研究ではアスペクト比 $LT = N_s/N_t$ (温度 T がほぼ一定のとき、空間サイズ L に比例する) で $4\sim 7$ の領域が研究されたが、臨界点の位置などについて、格子間隔依存性だけでなく、空間サイズ依存

性も大きいことがわかっている。連続極限を議論するためには、まず空間サイズ無限大（熱力学極限）への外挿が必要である。そのための最も有力な方法は、Binder cumulant を用いた臨界スケーリングである。そこで、金谷は、新潟大学 江尻信司准教授、大阪大学 北澤正清助教（現：京都大学基礎物理学研究所講師）、九州大学 鈴木博教授らと、大きな空間サイズでの臨界スケーリング研究を開始した。大格子で高統計を実現するために、重いクォークの効果をホッピングパラメータ展開（HPE）で取り入れた。

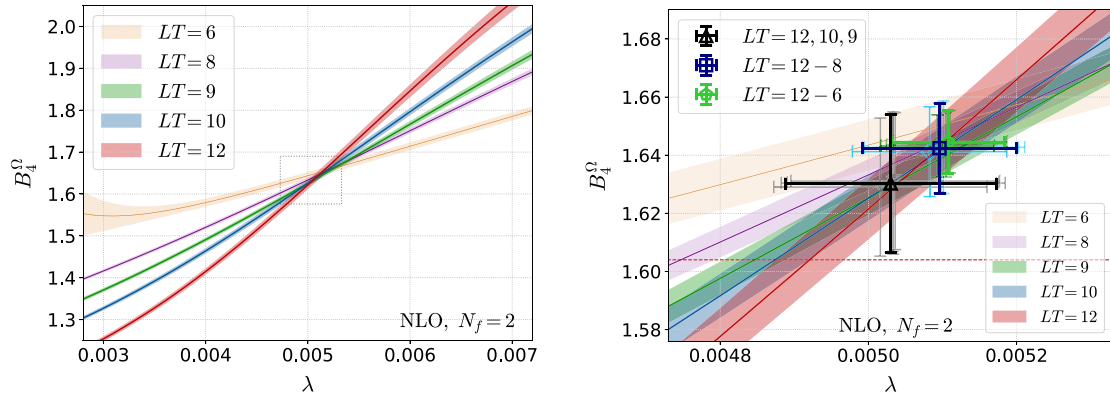


図 41 クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における、Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $N_t = 4$ 格子の結果。 $\lambda = 64N_c N_f \kappa^4$ はクォーク質量をコントロールするホッピング・パラメータ κ の関数で、クォークが軽くなると大きくなる。 $LT = N_s/N_t$ は格子のアスペクト比で、温度がほぼ一定の場合は、格子の空間サイズ L に比例する。右図は、左図の交点周辺を拡大したもの。(A. Kiyohara *et al.*, *Phys. Rev. D* 104, 1144509 (2021))

我々は、昨年度の研究 (A. Kiyohara, M. Kitazawa, S. Ejiri, K. Kanaya, *Phys. Rev. D* 104, 1144509 (2021), DOI:10.1103/PhysRevD.104.114509) で、 $N_t = 4$ 格子でアスペクト比 12 までの臨界スケーリングを研究した。図 41 に、ポリアコフ・ループに関する Binder cumulant の結果を示す。横軸はクォーク質量をコントロールするパラメータである。Binder cumulant は最低次の有限空間サイズ効果を打ち消すように作られており、有限空間サイズ効果が最低次で表されるくらい小さければ、Binder cumulant は臨界点で系の空間サイズによらず一定値になるはずである。図より、空間サイズ依存性を取り除くためにはアスペクト比 9 以上が要求されることがわかった。また、交点の位置から、熱力学極限における臨界点を先行研究よりはるかに高い精度で決定することも可能になった。

並行して、N. Wakabayashi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, 033B05 (2022), DOI:10.1093/ptep/ptac019 で HPE の信頼性を研究し、 $N_t = 4$ の臨界点近傍までなら上記研究で採用した低次の HPE で十分だが、連続極限に向けて N_t を大きくすると、より高次まで取り入れる必要があることを示した。さらに、計算時間をほとんど増やすことなく HPE の高次までの効果を有効的に取り入れる手法も開発した。

$N_t = 6$ 格子による研究

現在、上記 $N_t = 4$ の研究を拡大し、我々で開発した HPE の高次までの効果を有効的に取り入れる手法を応用して、より連続極限に近い $N_t = 6$ 格子、 $N_t = 8$ 格子のシミュレーションを進めている。中間結果を国際会議等で発表した（論文 1, 国際会議 5, 7-9, 国内学会・研究会 1, 3, 5-8 ほか）。

図 42 に、 $N_t = 4$ の図 41 に対応する $N_t = 6$ の中間結果を示す。アスペクト比 6, 7 の結果は $N_t = 4$

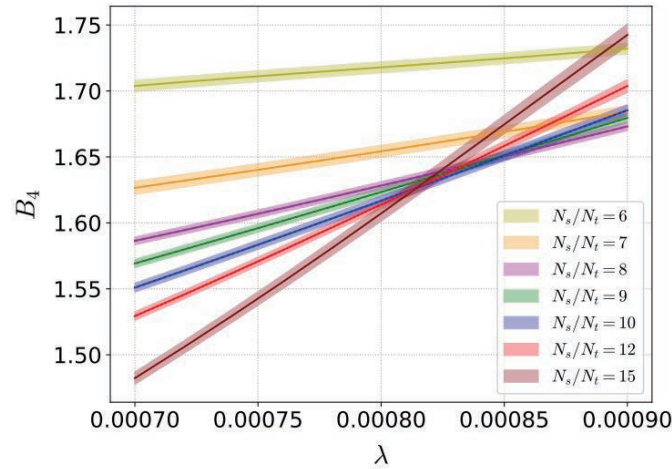


図 42 クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における、Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $N_t = 6$ 格子による結果。(国内学会 7)

の場合より交点から大きくずれており、格子間隔が小さくなると空間サイズが小さい格子のデータがスケーリングからより大きく外れることがわかった。その原因として、空間サイズが小さい格子では、オーダーパラメータの分布が、クォークが重い極限における $Z(3)$ スピンの性質を残しており、それが $Z(2)$ 臨界スケーリングからのずれをもたらしていることが考えられる。他方、アスペクト比 10 以上の大きな空間サイズの結果は、誤差の範囲内で一致しているが、空間サイズとともに多少左に移動する傾向も示している。これは、オーダーパラメータにエネルギー的変数がいくらか混入していることに由来している可能性がある。これらを解明するために、より精密な解析を進めている。

並行して、 $N_t = 8$ のシミュレーションも行っている。 $N_t = 4, 6$ の結果と合わせて、連続極限に向けての傾向がまた、我々の手法は容易に有限密度の場合に拡張できるので、その方向にも研究を展開している。

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、有限の格子上ではカイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル対称性に関わる物理量に関して格子化誤差が大きい。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基本的な物理量だが、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解消しなければ意味のある評価が出来なかった。

谷口、金谷は、九州大学 鈴木博教授、大阪大学 北澤正清助教（現：京都大学基礎物理学研究所講師）、新潟大学 江尻信司准教授、梅田貴士准教授らと、Gradient flow（勾配流）に基づく SFtX 法 (small flow-time expansion method) を応用して、これらの課題を克服した研究を推進している。

Gradient flow は、仮想的な時間パラメータを導入して、場の量を変形させる理論的手法で、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。鈴木博らが開発した 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、くりこみ操作や混合の除去無しに、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直接評価する。SFtX は、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、有用であることが示された。

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にも有効であることに着目し、 $2+1$ フレーバーの動的な Wilson 型クォークを含む QCD に SFtX 法を応用した一連の研究を推進している。その第一段階として、 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、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。我々はさらに、マッチング係数のくりこみスケールを適切に選ぶことで SFtX 法における外装の安定性を大きく改善できることを示した。

物理点 (2+1)-flavor QCD の熱力学

u, d クォークが現実よりやや重い場合に SFtX 法が有力であることを受けて、現実のクォーク質量（物理点）における $N_f = 2+1$ 有限温度 QCD の研究を、SFtX 法を使って推進している。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間を大きく削減できているが、クォークが軽い物理点での配位生成には膨大な計算が要求され、大規模シミュレーションを系統的に遂行する必要がある。

物理点研究の第一段階として、まず、格子間隔 $a = 0.08995(40)$ fm の場合に集中して研究している。PACS-CS Collaboration のゼロ温度物理点配位を利用した固定格子間隔法で、122–544 MeV の温度範囲でエネルギー運動量テンソルやカイラル感受率の測定を進めた。2022 年度までに有限温度配位についてはある程度統計が蓄積され、相転移温度が 150 MeV 以下であることを示唆する中間結果を得た。この相転移温度は、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。

しかし、この解析の結果、熱力学量のくりこみで必要なゼロ温度配位の統計が不十分である可能性も示唆された。これは、SFtX 法で測定する物理量が空間的に広がっていることに対応して、自己相関時間が長くなってしまったためと思われる。そこで、2022 年度には、PACS-CS 配位に加えて、ゼロ温度配位生成を開始した。自己相関時間が長いことが確認されたため、現在もシミュレーションを継続している。

(2) 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

PHENIX 実験 $p+p$, $p+Au$, $d+Au$, 及び $^3\text{He}+Au$ 衝突における楕円方位角異方性の測定

小さい衝突系における方位角異方性 v_n の測定は、高エネルギー重イオン衝突における衝突初期条件・熱平衡化過程に対する有効なプローブである。過去 RHIC-PHENIX 実験にて行われた $p(d, ^3\text{He})+Au$ 衝突における反応平面法を用いた測定では、 v_n が流体力学計算との一致を示した。これにより荷電粒子多重度 $dN_{ch}/d\eta = 13$ 程度の小さい系での QGP 生成が示唆された [1]。また最近の二粒子相関法による測定では v_n の運動学的領域依存性が報告され [2]、さらにその依存性が $dN_{ch}/d\eta = 2 \sim 3$ 程度のより小さい系において強まることが確認された [3]。この運動学的領域依存性の理解は QGP 流体中の

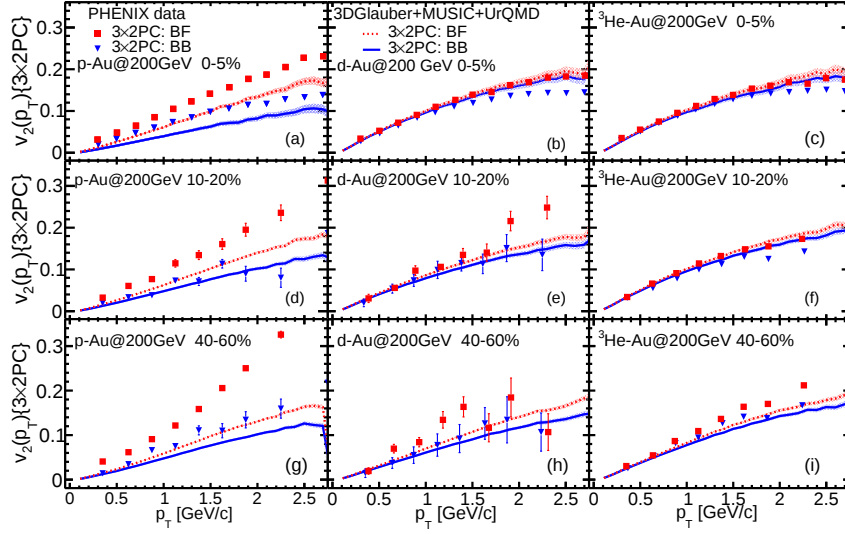


図 43 小さい衝突系における v_2 の横運動量 p_T 依存性 [2, 3] と流体力学計算 [4] の比較。二つの異なる運動学的領域 (図中 BB, BF) を用いた測定及び計算を示す。

ジェット由来の non-flow 成分や、ラピディティ方向の反応平面の捻れ効果を理解する上で重要である。図 43 に小さい衝突系における v_2 の横運動量 p_T 依存性 [2, 3] と流体力学計算 [4] の比較を示す。但し、図中 BB では後方領域の検出器二つ ($-3.9 < \eta < -3.1$, $-2.2 < \eta < -1.2$) を、BF では後方の検出器一つ ($-2.2 < \eta < -1.2$) と前方領域の検出器 ($1.2 < \eta < 2.2$) 一つを使用し v_2 を測定した。反応平面の捻れ効果を含む流体力学計算は、測定 v_2 の運動学的領域依存性を定性的に再現するものの、より小さい周辺衝突における依存性の強まりを記述することはできない。一方、non-flow 成分を含む AMPT 計算は v_2 の値を過大に評価するものの、より小さい衝突系における依存性の強まりを定性的に再現することができた [3]。これらの比較から、今後は流体力学計算に適切な割合で non-flow 成分を加えた、より現実的な計算モデルを用いて測定結果を評価することが重要であると考えられる。

STAR 実験 p +Au、 d +Au、及び ^3He +Au 衝突における楕円及び三角方位角異方性の測定

小さい衝突系における方位角異方性 v_n の測定は、高エネルギー重イオン衝突における衝突初期条件・熱平衡化過程に対する有効なプローブである。一般に v_2 を楕円的、 v_3 を三角方位角異方性と呼ぶ。過去 RHIC-PHENIX 実験にて行われた中心領域 ($|\eta| < 0.35$) と前方・後方領域 ($1.2 < |\eta| < 2.2$, $3.1 < |\eta| < 3.9$) を組み合わせた測定では、 v_2 及び v_3 が流体力学計算により記述されることが示され、QGP の生成が示唆された [1, 2]。RHIC-STAR 実験では既存の測定を拡張し、使用領域を中心領域 ($|\eta| < 1$) に限定した v_n の測定を行った [5]。

図 44 に $p(d, ^3\text{He})$ +Au 衝突における v_2 及び v_3 の横運動量 p_T 依存性と流体力学計算の比較を示す。図中の測定 v_n は ATLAS Temaplte Fit 法等の手法を用いた非流体成分の差引を受けている。ただし、非流体成分として p + p 衝突における測定結果を用いた。核子レベルの自由度を考慮した初期条件を用いた SONIC モデルは v_2 をよく記述するが、 v_3 を過小評価することが示された。一方、核子内部のパートンの自由度まで考慮した初期条件を用いる IP-Glasma+MUSIC モデルは v_2 を過大評価するが、 v_3 を精度よく記述することが示された。図 45 に $p(d, ^3\text{He})$ +Au 衝突間の v_n の比、及び各種モデ

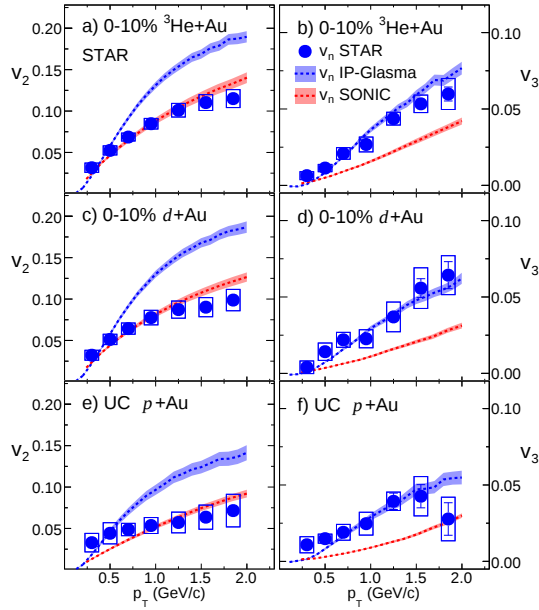


図 44 小さい衝突系における v_2 、 v_3 の p_T 依存性 [5] と流体力学計算の比較

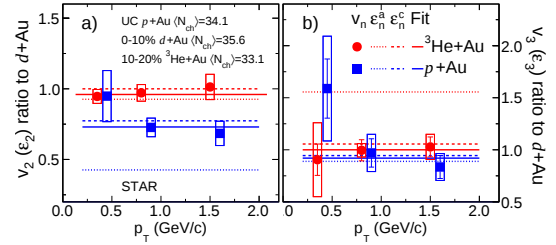


図 45 小さい衝突系における v_n 比の p_T 依存性と衝突初期異方性 ε_n 比の比較。

ル計算による衝突初期異方性 ε_n の比を示す。核子レベルの自由度を考慮した初期異方性 (図中 ε_n^a) は $v_2(p+Au)/v_2(d+Au)$ 及び $v_3(^3\text{He}+Au)/v_3(d+Au)$ を記述することができない。一方、核子内部のパートンの自由度まで考慮した初期異方性 (図中 ε_n^c) は全ての v_n 比を精度良く記述することができた。これらの比較から、流体力学計算が一定の成功を収め、小さい衝突系において QGP が生成されていることが再度示された。また、これらの新たな測定データは既存の流体力学計算における初期条件モデルに改良が必要なことを示したため、大変重要である。

STAR 実験におけるビームエネルギー走査実験によるゆらぎと粒子相関の測定

BNL 研究所の RHIC 加速器を用いた高エネルギー重イオン衝突実験を行い、クォーク・ハドロンとの相転移や QCD 相構造を調べた。特に、相図上の臨界点や 1 次相転移からの信号を探索するために数 GeV~100GeV 領域におけるビームエネルギー走査実験を行い、ゆらぎや粒子相関に注目した研究を行った。図 46 の (a)-(c) は、固定標的実験モードを含む広いエネルギー領域において、正味陽子数分布の 4-6 次の高次キュムラントの低次に対する比のビームエネルギー依存性を表している。特に 6 次のキュムラントの測定からは、クロスオーバー相転移の兆候や、7GeV 以上の領域には 1 次相転移から予測されてきた 2 コンポーネント仮定が否定できる事が結論づけられた。特に固定標的実験モードの測定である 3GeV においては、高いエネルギー領域とは大きく異なる結果を示すことが興味深い [6]。図 46 の (d)-(e) は、陽子、重水素、三重水素の収量測定の結果得られる粒子比 $N_t N_p / N_d^2$ のエネルギー依存性を示している。この比は高密度物質中の局所的な中性子密度のゆらぎに敏感であることから、軽元素の生成過程の解明と高温・高密度の QCD 相図上に期待される衝突系の臨界ゆらぎからの信号が期待できる [7]。正味陽子数分布の 4 次ゆらぎの測定で先に観測された非単調なエネルギー依存性と同じエネルギー領域である 20-30GeV 領域において、中心衝突においてその粒子比に非単調な振る舞いが観測

された。図 46 の (f) は、3GeV の金原子核同士の衝突における、軽原子核とハイパー原子核の指向型方位角異方性 v_1 のラビディティ依存性の傾きを比較したものである。その質量依存性は軽原子核と同様に質量に対して線形な関係にあるが、このエネルギー領域におけるストレンジネス生成の増大により、統計的に有意な異方性を観測することに成功した。これによりハイパー核のコアレスセンス・融合模型などによる生成過程を明らかにした [8]。

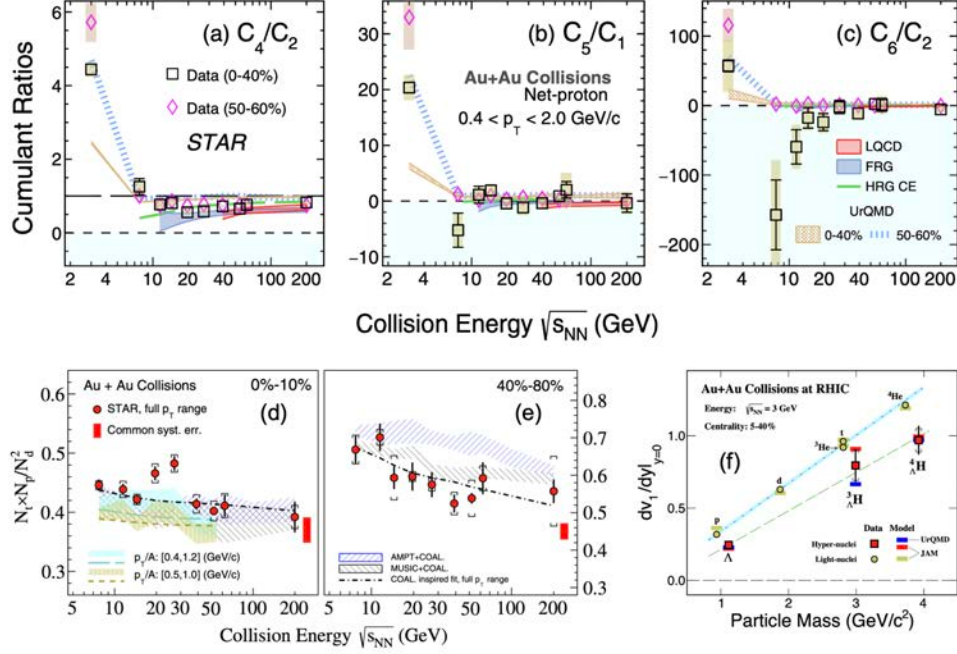


図 46 パネル (a)-(c) に net-proton 分布 Cumulant 比のエネルギー依存性を示す [6]。パネル (d)-(e) に軽原子核による粒子比 $N_t N_p / N_d^2$ のエネルギー依存性を示す [7]。パネル (f) に軽原子核及び、ハイパー原子核の指向型方位角異方性 v_1 のラビディティ依存性の傾き dv_1/dy の質量依存性を示す [8]。

Measurement of ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ at STAR

Hypernuclei are bound states of nucleons and hyperons. The hyperon–nucleon (Y-N) interaction, which is an essential ingredient in the equation of state of high-baryon-density matter, remains poorly constrained. Also, the production mechanisms of hypernuclei are currently not well understood. Precise measurements of hypernuclei properties and production yields can shed light on their production mechanisms and the strength of the Y-N interaction.

The yields of ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ yields are measured using data from the RHIC-STAR experiment. The yields are with large uncertainties since the challenging statics. The measurements of ${}^4_{\Lambda}\text{He}/{}^4_{\Lambda}\text{H}$ yields ratios, of which the aim is to test isospin effect, are also taken out. The ${}^4_{\Lambda}\text{He}/{}^4_{\Lambda}\text{H}$ yields ratios are consistent with 1 with large uncertainties ($\sim 50\%$).

Recently, the analysis on ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ yields using other data has also begun. The plan is to bring them out in the late second half of this year. In the past one year, results on hypernuclei measurements at STAR were presented at the international conferences/workshops; Workshop on Critical

Point and Onset of Deconfinement (CPOD2022), the 9th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2023), the 1st Workshop on Highly Baryonic Matter at RHIC-BES and Future Facilities (WHBN2023), and the 2nd workshop on hadron interactions, hyper-nuclei and exotic hadron productions at high-energy accelerator experiments.

Net-proton fluctuations from RHIC-STAR BES-II

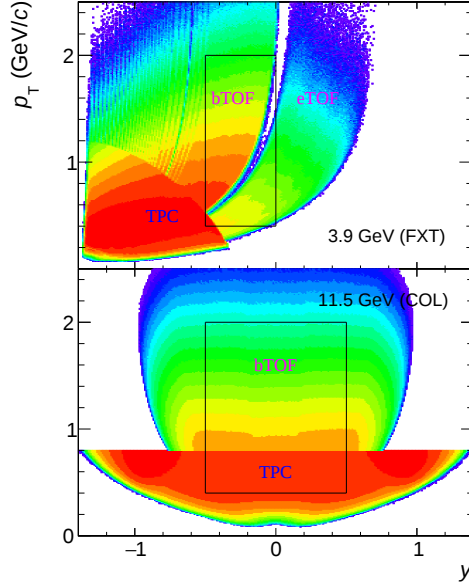


FIG. 47 Detector acceptance for protons at $\sqrt{s_{NN}} = 3.9$ GeV (top panel) and 11.5 GeV (bottom panel). Black squares denote the acceptance for the measurement.

The STAR experiment has observed a non-monotonic collision energy dependence of the net-proton fourth-order cumulants at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 200$ GeV [9] from the first phase of the RHIC Beam Energy Scan program (BES-I), which is consistent with the predicted QCD critical signal. The new measurement at $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV [36] shows a clear suppression and is reproduced by the predicted fluctuation driven by baryon conservation, implying that the QCD critical point is unlikely to exist below $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV.

In the second phase of the RHIC BES program (BES-II) focusing on $\sqrt{s_{NN}} = 3.0 - 27$ GeV, STAR has collected 10–20 times more statistics than in BES-I, which provides an excellent opportunity to observe a precise collision energy dependence of net-proton higher-order cumulants at high baryon densities. In this analysis, we perform the net-proton measurement at $\sqrt{s_{NN}} = 3.9$ GeV from fixed-target mode (FXT), 7.7 GeV, 9.2 GeV, and 11.5 GeV from collider mode. Figure 47 shows the detector acceptance for protons at $\sqrt{s_{NN}} = 3.9$ GeV (top panel) and 11.5 GeV (bottom panel), where the black squares denote the acceptance for the measurement ($0.4 \text{ GeV}/c < p_T < 2.0 \text{ GeV}/c$, $-0.5 < y < 0$ for FXT, $-0.5 < y < 0.5$ for COL). To ensure enough (anti)proton purity, track hit on TOF detector is required for particle identification at $p_{lab} > 1.2 \text{ GeV}/c$ at $\sqrt{s_{NN}} = 3.9$ GeV, and $p_T > 0.8 \text{ GeV}/c$ at $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$ GeV. Raw net-proton distributions have

been obtained, and we are waiting for the STAR official embedding samples for these datasets to apply efficiency correction for higher-order cumulants.

バリオン・ストレンジネス相関測定のためのバックグラウンド除去手法の開発

QCD 相構造の探索を目的として、正味バリオン数、正味電荷数および正味ストレンジネス数の高次ゆらぎの測定が盛んに行われきたが、一方でそれらの 2 次の相関ゆらぎは、非中心重イオン衝突において生成されると言われる強磁場に敏感な観測量であるとする格子 QCD 計算が発表された [11]。提案された観測量はバリオン・ストレンジネス間の相関を含むが、その信号の多くは Λ 粒子等のストレンジネスを持つバリオン（ハイペロン）が運んでいることがわかっている [12]。ハイペロンは弱い相互作用により検出器に到達する前に崩壊し、ストレンジネスを失ってしまうため、実験的には娘粒子からハイペロンの再構成を行うが、一定の割合でバックグラウンドの寄与が含まれてしまうため、衝突事象ごとのハイペロン数を正確に測定することは不可能である。また式 (1), (2), から、バックグラウンドを含むゆらぎ $\langle m_{SN}^r \rangle_c$ から信号によるゆらぎのみを取り出すためには、バックグラウンドのゆらぎ $\langle m_N^r \rangle_c$ および信号とバックグラウンドとの相関ゆらぎ $\langle m_S^r m_N^s \rangle_c$ を必要とすることがわかるが、これらは実験的に測定不可能な量である。ここで m_S, m_N は信号粒子数とバックグラウンド粒子数であり、 $m_{SN} = m_S + m_N$ である。 $\langle \cdot \rangle_c$ はキュムラントを表す。

$$\langle m_{SN}^2 \rangle_c = \langle m_S^2 \rangle_c + \langle m_N^2 \rangle_c + 2\langle m_S m_N \rangle_c, \quad (1)$$

$$\langle m_{SN}^3 \rangle_c = \langle m_S^3 \rangle_c + \langle m_N^3 \rangle_c + 3\langle m_S^2 m_N \rangle_c + 3\langle m_S m_N^2 \rangle_c. \quad (2)$$

本研究では、ハイペロンの不変質量分布における信号ピーク下部のバックグラウンドの代わりに、ピーク周りのバックグラウンド（サイドバンド）を用いることにより、信号の 2 次、3 次ゆらぎを、バックグラウンドを含むゆらぎ $\langle m_{SN}^r \rangle_c$ と、サイドバンドのゆらぎとその相関 $\langle m_{R,i}^r \rangle_c, \langle m_{R,i}^r m_{R,j}^s \rangle_c$ 、およびそれらの相関ゆらぎを用いて表すことに成功した (式 (3), (4)) [13]。ここで $m_{R,i}$ は i 番目のサイドバンド幅におけるバックグラウンド数であり、 $i \neq j \neq k$ である。これら補正項は全て実験的に直接測定が可能である。

$$\langle m_S^2 \rangle_c = \langle m_{SN}^2 \rangle_c - \langle m_{R,i}^2 \rangle_c - 2\langle m_{SN} m_{R,i} \rangle_c + 2\langle m_{R,i} m_{R,j} \rangle_c, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \langle m_S^3 \rangle_c = & \langle m_{SN}^3 \rangle_c - \langle m_{R,i}^3 \rangle_c - 3\langle m_{SN}^2 m_{R,i} \rangle_c + 3\langle m_{R,i}^2 m_{R,j} \rangle_c - 3\langle m_{SN} m_{R,i}^2 \rangle_c \\ & + 3\langle m_{R,i} m_{R,j}^2 \rangle_c + 6\langle m_{SN} m_{R,i} m_{R,j} \rangle_c - 6\langle m_{R,i} m_{R,j} m_{R,k} \rangle_c. \end{aligned} \quad (4)$$

現在、この補正手法を用いたバリオン・ストレンジネス相関の測定が RHIC-STAR 実験の 200 GeV 金原子核衝突データにおいて進行中である。陽子と荷電 K 中間子およびそれらの反粒子を用いた従来の測定と比較し、 Λ, Ξ^- 粒子とその反粒子を含めることにより、バリオン・ストレンジネス相関の信号が劇的に増大することが判明し、論文発表に向けて準備が進んでいる。

STAR 実験 Au+Au 衝突 19.6 GeV における HBT 測定及び、200 GeV におけるハイペロン相関

RHIC-STAR 実験ではビームエネルギー走査実験フェーズ II が行われ、コライダーモードにて $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\text{--}19.6$ GeV のデータが取得された。本研究では、Au+Au 衝突 19.6 GeV のデータを用いて量子力学的干渉効果（HBT）の測定を行う。HBT 測定により、フリーズアウト時の粒子放出分布の大きさ（HBT 半径）を測定することができる。反応平面（1 次のイベント平面）を基準として、HBT 半径の方位角依存性を測定することで、系の形状やビーム軸方向に対する傾きを測定する。現在、データの品

質チェックを行っているところであり、ビームや検出器の状態が一時的に変化したような、解析から除外すべきデータの洗い出しを行っている。

また、引き続き Au+Au 衝突 200 GeV のデータを用いて、ハイペロン関連の研究も進めている。ハイペロン間相互作用は理論的にも実験的にも十分理解されているとは言えず、また、ハイペロン相互作用の研究は中性子星内部における状態方程式の理解にもつながる。また、2つのバリオン粒子が束縛状態を形成するエキゾチックな粒子、ダイバリオンの探索も本研究の目的である。HBT 測定と同様の手法である2粒子相関を測定することで、ハイペロン間の相互作用の情報を引き出すことができる。これまで同種粒子 ($\Lambda\Lambda$, $\Xi\Xi$) を見てきたが、さらに異種粒子間の相関関数の測定を開始したところである。異種粒子間には量子力学的な干渉効果が存在せず、強い相互作用とクーロン相互作用のみが現れるため、ハイペロン間相互作用の情報を得やすく、また粒子-粒子と粒子-反粒子間に働く強い相互作用の違いの有無を検証する意味もある。同種粒子相関と同様に異種粒子間には負の相関が観測され、今後、崩壊粒子の影響や運動量分解能の補正を行い、相互作用パラメータを求める。

STAR 実験 Λ 粒子のグローバル偏極の一次フローベクトル依存性の測定

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ことで、生成される系は高速で回転をする。従ってスピン軌道相互作用によって生成粒子は偏極させられる。このようにして生じる反応平面に対して垂直方向の偏極をグローバル偏極とよぶ。これまでにグローバル偏極は $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV から 5.02 TeV に渡って測定されてきた [14, 15, 16, 17, 18]。これらの測定によってグローバル偏極は衝突エネルギーが低くなるとともに、大きくなる傾向が観測された。このグローバル偏極の傾向は、パイ中間子の指向的方位角異方性のエネルギー依存性の振る舞いとよく一致することが実験的にわかっている [19]。グローバル偏極と指向的方位角異方性はどちらも、系の初期の傾きに起因すると考えられ、理論計算に渦の寄与を考慮することで指向的方位角異方性の実験結果をある程度再現できることから、双方の関係性を理解することは非常に重要である。

そこで本研究では金 + 金衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ GeV においてグローバル偏極の一次のフローベクトル依存性の測定を行なっている。一次のフローベクトルは指向的方位角異方性と相関を持つとされる量である。これにより指向的方位角異方性に対するグローバル偏極の振る舞いの探索を行なっている。

原子核衝突における粒子フローに起因するスピン偏極測定

高エネルギー原子核衝突においては、生成粒子の集団膨張を示す方位角異方性（粒子フロー）が観測されている。衝突初期の楕円形状に起因する楕円フローや、衝突初期の密度揺らぎに起因する高次のフロー（3次や4次のフロー）なども観測されている。STAR 実験ではビーム軸方向への Λ 粒子の偏極が観測され、楕円フローにより局所渦が生成されていることが明らかになった [20]。しかしながら、流体モデルや輸送計算モデルと実験データの符号に不一致が見られ、十分に理解されているとは言えない。本研究では、高統計の同重体原子核衝突 (Ru+Ru および Zr+Zr) を用いて、楕円フローだけではなく、高次フロー平面へと解析を拡張した。 Λ 粒子のビーム軸方向への偏極 P_z が、楕円フロー平面でけだけでなく、3次の三角フロー平面からの方位角に依存性することが判明した [22]。これは3次の三角フローによっても局所的な渦が生成されていることを示している。図 48 に示すように P_z のフーリエサイン係数の中心衝突度および横運動量が測定され、3次の結果は2次と同様の依存性を示していることがわかった。粘性流体モデルの計算と比較すると、中心衝突度や低横運動量領域では定性的に実験データを再現するものの、周辺衝突や高横運動量では不一致が見られる。本結果は、偏極メカニズムを理解する上で

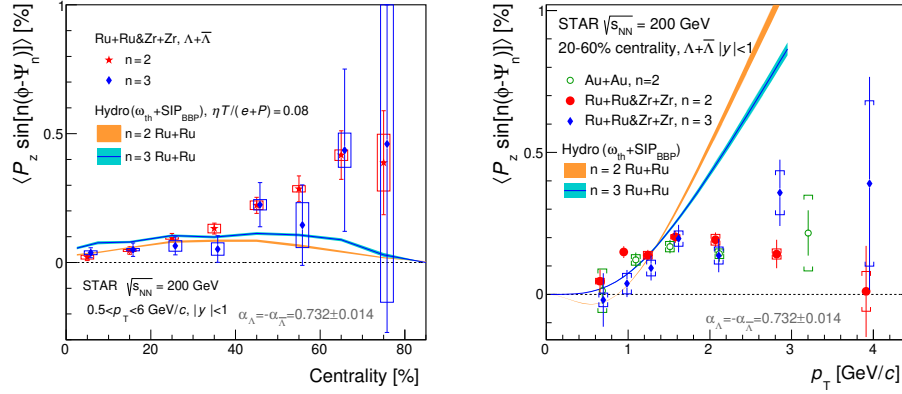


図 48 ビーム軸方向への Λ 粒子偏極（2 次および 3 次のフーリエサイン係数）の中心衝突度依存性（左）と横運動量依存性（右）。粘性流体モデル計算 [21] との比較を示している。

重要なデータとなる。

J-PARC E16/E88 実験のための MRPC の開発

今年度は、佐甲、佐藤が中心となり、 $\phi \rightarrow K^+K^-$ の K 中間子の識別を行うための飛行時間測定器である MRPC の開発及び試験を行った。ガラス昇温による耐高レート MRPC を 2 台製作した。2021 年度に製作した 1 号機では、まずガスリークの問題があり、ガスコネクタを 6 mm ϕ の大口径のものに変更し、高電圧電極をポリカーボネートのフレームに埋め込んで接着することで解決した。またポリカーボネートチェンバーにおけるガス封止に使用した接着剤のアウトガスによって検出効率が低下していることが判明し、長期のガス流によって改善することは分かったが、結局ポリカーボネートチェンバーをアウトガスの影響が少ない接着剤に変更して再製作することによって大幅に向上することができた。また両面接着のカーボン電極テープが張り付けられているガラス板とポリカーボネートケースの膨張率の違いによって、ガラス昇温時にストレスを受け、損傷することがわかり、ポリカーボネートケース側の接着をやめることでこの問題を解決した。これらの改善後、2022 年 7 月と 2023 年 2 月に SPring-8 の LEPS2 実験エリアにおいてそれぞれ MRPC 1 号機および 3 号機について電子ビームを使用したビーム試験を行ったが、前者では恐らくカーボンテープ損傷の影響、後者では MRPC の輸送中のガスリークの発生が一因となり時間分解能は 100 ps しか達しなかった。さらに 2 月から 3 月にかけて筑波大学において宇宙線による試験を行い、ガスリークを修復後、高電圧の設定値を最適化し、ディスクリ回路の閾値を高く設定することにより 70 ps の目標時間分解能を達成することに成功した。

一方、2022 年 11 月に、2022 年度末に予定されていた E16 実験のコミッショニングランのために MRPC 1 号機及び 2 号機を E16 スペクトロメーターの前方角に設置した。さらにエアロゲルチェレンコフ検出器の設計を粒子シミュレーションによって行い、試作機を製作し、宇宙線により試験を原子力機構において開始した。結局 E16 実験のビームタイムは J-PARC 加速器の問題により 2023 年 6 月に延期されたため、それに向けた上記の準備を継続した。

ALICE における Electroweak boson (W/Z) 生成

これまで我々のグループは衝突初期のハードな散乱で作られるジェットや heavy flavour（ハードプロー

ブ)などの測定を通して、QGP 内でのエネルギー損失機構の解明や、強い相互作用によるジェットの形状変化の研究を行ってきた。近年はこのハードプローブに加え、弱い相互作用を媒介するウィークボソン (W ボソンや Z ボソン) を用いた研究も行なっている。ウィークボソンは色電荷を持たず QGP とは相互作用することはないため、QGP を理解する上で新たな視点を与えてくれる。特に W ボソンや Z ボソンと共に作られるジェットは quark 由来のジェットのため、quark ジェットの研究ができる。またウィークボソンの生成はクォークと反クォークの融合で作られるため、原子核中のパートン分布に敏感である。従って W/Z ボソンの測定は原子核中のパートン分布を調べる上でも有効な測定だと考えられている。パートン分布の理解は、我々のグループが ALICE 実験で主導している FoCal 検出器を用いたカラーグラス凝縮を発見する上で重要である。

ALICE 実験ではこれまで前方領域のミュオン検出器を用いて、W/Z ボソンから崩壊するミュオンを測定することによりウィークボソンの研究が行われてきた。我々のグループでは衝突中心領域でのウィークボソン測定を目指し、W/Z ボソンから崩壊する電子 ($W \rightarrow e\nu$ 、 $Z \rightarrow e^+e^-$) を電磁カロリメータで測定することにより研究を行なっている。2021 年度は主に W ボソンから崩壊してくる電子を測定することにより、W ボソンの生成断面積や粒子多重度の測定を行った。2022 年度は主に電子を用いた Z ボソンの再構成やその生成断面積の測定を ALICE 実験において初めて行った。図 49 は、陽子-陽子衝突 13 TeV の電子から再構成した Z ボソンの不変質量分布である。Z ボソンは約 $91 \text{ GeV}/c^2$ の質量をもつ。再構成した Z ボソンの不変質量分布において $91 \text{ GeV}/c^2$ 付近に Z ボソンのシグナルが確認された。この質量分布から Z ボソンの生成断面積の測定を行った。結果は図 50 である。測定した Z ボソンの生成断面積は、Next-to-leading order の perturbative QCD の計算 (POWHEG) に陽子のパートン分布 (CT14NLO) を加えたものと、実験及び理論計算の統計・系統誤差の範囲内で一致した。現在は、W ボソンと Z ボソンの測定結果を論文にまとめ投稿する準備をしている。

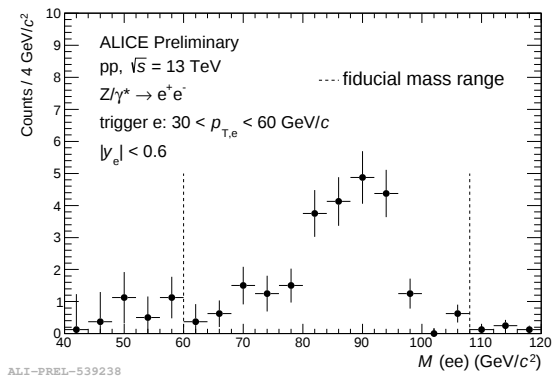


図 49 陽子陽子 13TeV 衝突における電子から再構成した Z ボソンの質量分布

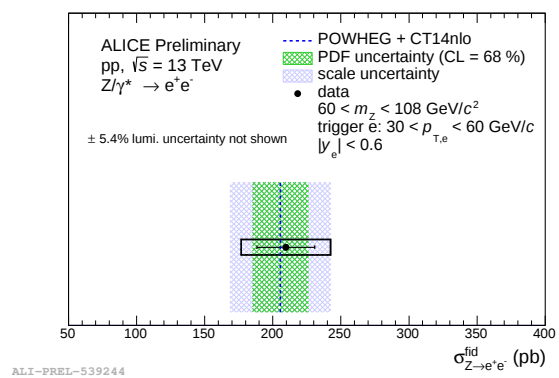


図 50 陽子陽子 13TeV 衝突における Z ボソンの生成断面積

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 次期アップグレード計画である前方カロリメータ検出器 FoCal (Forward Calorimeter) プロジェクト [23] を推進している。これは、ALICE の前方方向 ($3.4 < \eta < 5.8$) に電磁・ハドロンカロリメータを新たに建設し、前方方向に発生する直接光子、中性

ハドロン、ジェットとそれらの相関測定から、(1) ハドロンの普遍的な描像「カラーグラス凝縮 (Color Glass Condensate, 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、(3) QGP 生成機構の解明、を主な目的としている。2026-2028 年の長期 LHC 停止期間中に本検出器を ALICE に導入し、2029 年 (LHC Run-4) より物理測定を行う。FoCal 日本グループは、筑波大、筑波技術大、理研、奈良女子大、広島大、長崎総合科学大、佐賀大の 7 機関、18 名から構成され、FoCal 国際コラボレーションの中において、FoCal-E pad 検出器の責任機関であると同時に、読み出しシステム、トリガー開発においても中心的な位置を占める。中條は、FoCal プロジェクト共同代表 (2023 年 1 月より) および FoCal-E pad 検出器の責任者、Novitzky は FoCal 読み出しの責任者、Peitzmann は FoCal 物理の責任者を務める。2022 年度は、TDR (Technical Design Report) 策定に向けて、CERN 研究所 PS/SPS 加速器を使ったテストビーム実験 (6 月, 9 月, 11 月) (図 51), 理化学研究所 RANS を使った中性子照射試験 (3 月), 東北大学 電子光物理学研究センター ELPH を使ったテストビーム実験 (2 月) を行い、検出器の性能評価や基礎測定を行った。以下、その詳細について報告する。

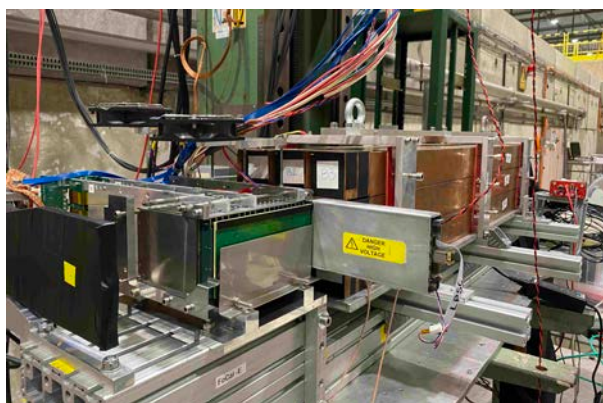


図 51 2022 年 SPS テストビーム実験のセットアップ。中央付近にあるものが FoCal-E pad 検出器の最終試作機。

FoCal-E pad 検出器のための放射線耐性試験

2023 年 3 月 7 日と 3 月 8 日に、理化学研究所 RANS (RIKEN Accelerator-driven compact neutron source) を利用して、FoCal-E pad 検出器用シリコンパッドセンサーのモニター PD の 2 回目の中性子照射試験をおこなった。2022 年に実施した 1 回目の試験と比べてビーム電流を $1/8 \sim 1/10$ 倍に抑え、中性子照射量の違いによる p 型ならびに n 型モニター PD の漏れ電流の変化を測定した。また、近年の世界的な半導体製品不足にともなう電源用 IC 入手困難を受け、FoCal-E pad 検出器用信号読み出し電子回路で使用する LDO (Low Drop Out) レギュレータチップの放射性耐性試験をおこない、計 17 個 (8 種類) のうち、5 個のチップの出力電圧がおよそ 10 の 12 乗個/平方センチメートルの中性子照射でも変動しないことを確認した。

CERN PS 加速器を用いた FoCal-E pad 検出器試作機の評価

2022 年 6 月、FoCal-E PAD 検出器試作機のテストビーム実験を、CERN PS 加速器のテストビーム

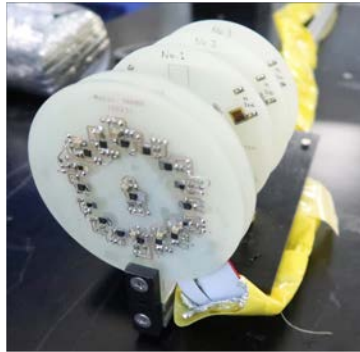


図 52 理化学研究所 RANS における中性子照射試験のセットアップ。1 枚目と 2 枚目のプリント基板上の黒いチップが LDO で、3 枚目～5 枚目にはシリコンパッドセンサー（モニター PD）を取り付けて試験した。

ラインを用いて行った。この実験では FoCal-E PAD 検出器試作機に 1 ～ 5 GeV/c の電子ビームを入射させ、その電磁シャワーデータを取得した。本研究ではこのデータを用いて、FoCal-E PAD 検出器試作機における 1 ～ 5 GeV/c 電子ビームに対するエネルギー分解能などの性能評価を行った。

図 53 に各電子ビームエネルギーにおける ADC の合計値を示す。また、エネルギー線形性、及びエネルギー分解能 (σ/E) を図 54 に示す。図 54 の（左）に示したエネルギー線形性には ADC の読み出し限界による飽和が見られたため 1-3 GeV/c でのみ直線近似した。これにより、電子ビームにしておよそ 4, 5 GeV/c から ADC の飽和が顕著になることが明らかとなった。図 54 の（右）に示したエネルギー分解能も ADC の飽和を考慮して $f(E) = a/\sqrt{E} + b$ (a, b は定数) により 1-3 GeV/c でのみフィットした。結果について、1-2 GeV/c でそれぞれおよそ 36%, 34% の分解能を達成できた。これは同エネルギー領域において FoCal-E PAD 検出器に求められるエネルギー分解能 ($\sim 30\%$) をおおむね満たす結果である。一方、3-5 GeV/c のエネルギー分解能は ADC の飽和の影響で悪化がみられ、30% 程度という結果を得た。

本研究により、FoCal-E PAD 検出器の試作機が電子ビームにして 1-2 GeV/c でおおむね満たすべき性能を達成するとともに、およそ 4 GeV/c 以上から TOT による読み出しを必要とすることが明らかとなった。

CERN SPS 加速器を用いた FoCal-E pad 検出器試作機の評価

2023 年 TDR (Technical Design Note) に向けて、FoCal-E pad 検出器試作機の性能評価実験を、CERN SPS (Super Proton Synchrotron) のハドロンビーム及び電子ビームを使って実施した。FoCal は 2022 年より、FoCal-E 検出器 (電磁カロリメータ) と FoCal-H (ハドロンカロリメータ) を組み合わせ、実験を行った。筑波大は FoCal-E-Pad を担当している。本実験では 40-300 GeV/c エレクトロンビームに対してエネルギー分解能の測定や、20-350 GeV/c ハドロンビームを使った最小電離粒子 MIP (Minimum Ionizing Particle) に対する応答の評価を行った。

FoCal-E pad の読み出しの集積回路は HGCROC v2 である。HGCROC v2 からのシグナルは ADC (Analog to digital converter) と TOT (Time of threshold) で分けられる。低いエネルギーに対しては ADC の値で測定され、一定の値以上のエネルギーに対しては TOT で測定される。本実験から TOT での測定を初めて導入した。加えてビーム位置補正、各チャンネル・レイヤーごとの電荷に対す

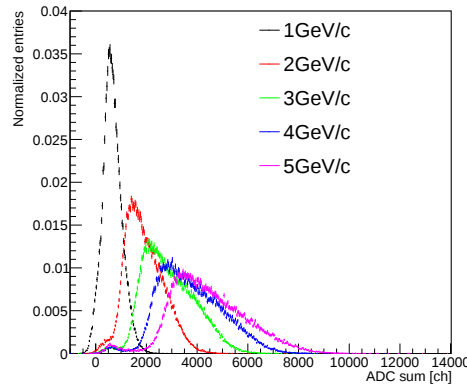


図 53 ADC sum。ADC の飽和のため、3-5GeV/c の ADC 分布に歪みが見える。これらをガウスフィットすることで、以下のエネルギー線形性及び分解能を評価する。

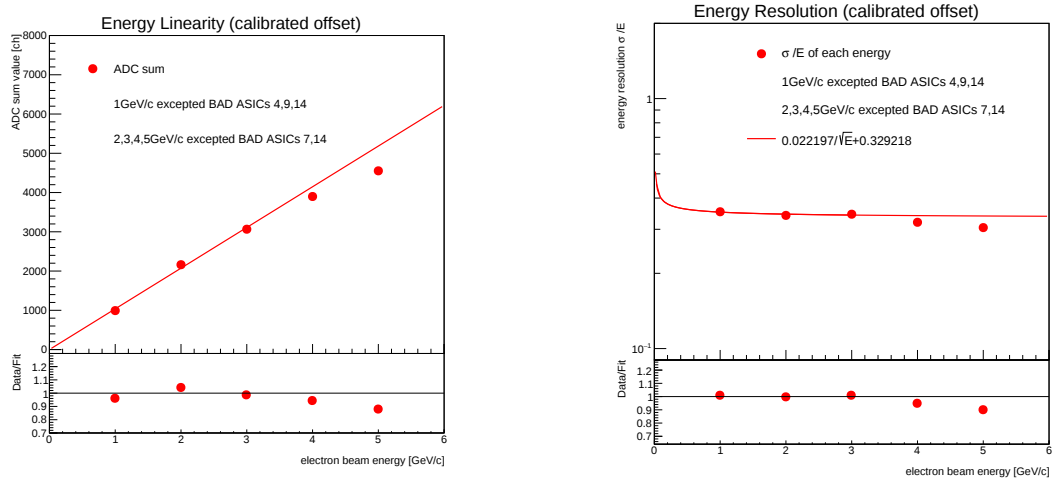


図 54 (左) エネルギー線形性。横軸が電子ビームのエネルギー、縦軸が ADC sum を示す。(右) エネルギー分解能。横軸が電子ビームのエネルギー、縦軸が分解能 σ/E を示す。4-5 GeV/c で強い ADC の飽和の影響が見られるため 1-3 GeV/c でフィットを行った。

る線形性の補正を行った。今回、測定される電荷量 Q について、以下のように定義し (式 5)、補正された ADC 値 及び TOT 値から Q 値を計算する。

$$Q[pC] = \frac{Slope_{ADC}(TOT = 0)}{Slope_{ADC}} \times + \frac{TOT - Const_{TOT}}{Slope_{TOT}} \quad (5)$$

その後、 Q 値をビーム中心付近でクラスタリングし、全てのレイヤーで足し合わせ、平均値を求めるとエネルギー線形性とエネルギー分解能が計算できる。この結果を図 56、図 57 に示す。エネルギー線形性は良く、エネルギー分解能は、350 GeV で約 4% 程度であることがわかり、かつフィッティング関数による定数こうは 1.6% 程度の結果を得た。これはシミュレーションから予想される結果とほぼ一致する。これらの内容をまとめ、2023 年末までに、TDR を策定する。

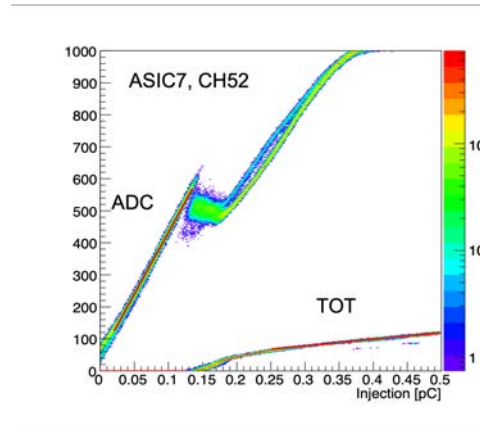


図 55 ASIC7, CH52, ADC 及び TOT の 2 次元ヒストグラム

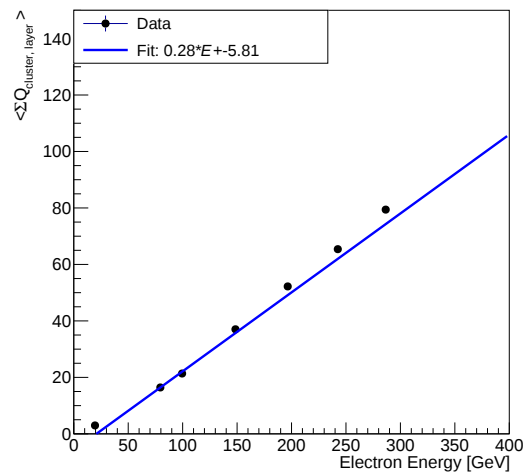


図 56 2022 年 SPS テストビーム実験結果：エネルギーによる $\langle Q(\Sigma_{ch, layer}(ADC + TOT)) \rangle$ のエネルギー線形性

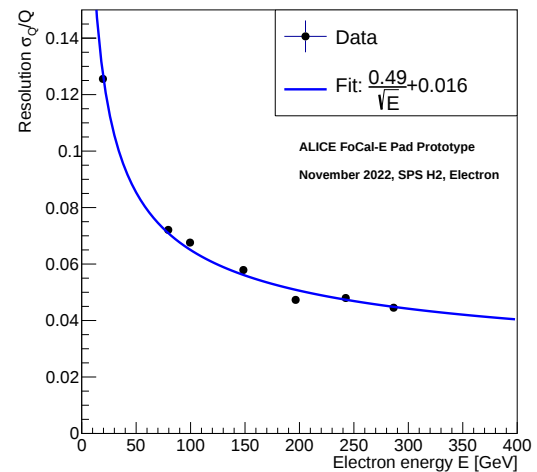


図 57 2022 年 SPS テストビーム実験結果：エネルギーによる Q 分解能 ($\propto$ エネルギー分解能)

ELPH GeV- γ テストビームラインを用いた FoCal-E pad 検出器試作機の評価

2022 年度は FoCal の性能評価のための実験が複数行われたが、その 1 つとして、2023 年 2 月に東北大学の ELPH においてテストビーム実験を行った (図 58, 59)。ELPH テストビーム実験は主に、FoCal-E PAD のバイアス電圧依存性・温度依存性の測定、および n-type シリコンセンサーの中性子照射による影響を調べる目的で行われた。

FoCal-E PAD の測定では暗箱内に E-PAD 検出器とヒーターをセットし、796.87 MeV/c の電子ビームを入射した。初めのシグナルの確認、位置スキャンを経て、バイアス電圧と温度を変化させての測定を行い、MIP ピークの位置の変化を調べた。図 60 が温度依存性の結果である。温度によらずほぼ一定の位置に MIP ピークが来ており、55 度程度の環境下までなら同じ性能を発揮できることが確認さ

れた。

n-type センサーは APV を使用して測定を行った。中性子を照射したセンサーと照射していないセンサーにビームの位置を合わせ、MIP が見えるか確認した。図 61 は前方にタングステンを置いたときに得られた中性子照射なしのセンサーによる ADC 分布である。きれいな 1-MIP、2-MIP のピークが確認できた。しかし、中性子照射ありのセンサーについては、MIP が確認できなかった。のちに原因究明をしたところ、基盤回路の問題で中性子照射ありのセンサーに十分な電圧がかかってなかったことが分かった。今後もう一度テストビーム実験を行い、中性子照射ありのセンサーの性能評価をしていく必要がある。



図 58 ELPH 実験で用いた FoCal-E PAD モジュール

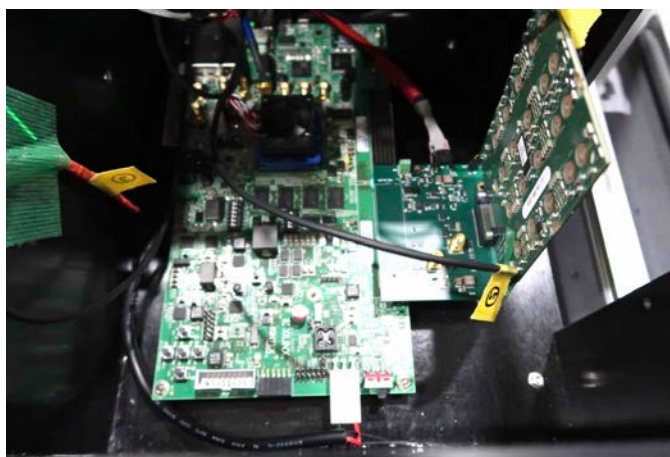


図 59 ELPH 実験で用いた FoCal-E PAD モジュールと温度センサー

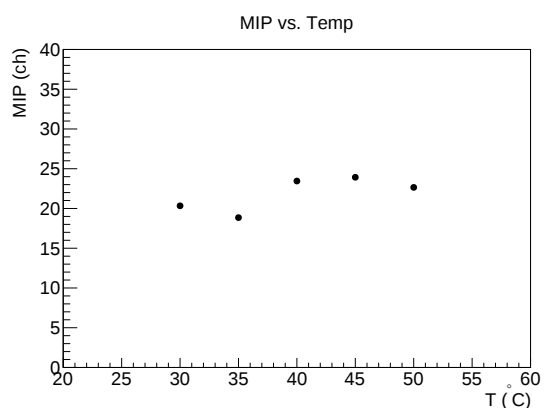


図 60 FoCal-E PAD で測定した MIP の位置 (ch) の温度依存性

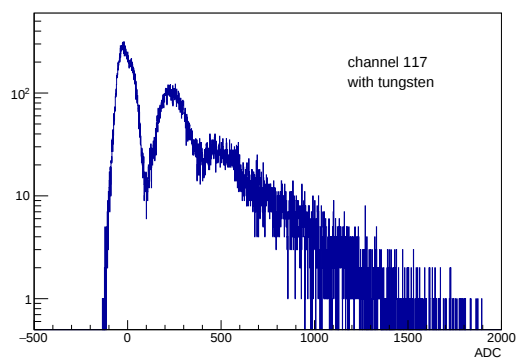


図 61 前方にタングステンを設置したときの中性子照射なし n-type センサーで測定した ADC 分布

(3) 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

He ビーム透過 ERDA による水素分布測定法の開発

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 $^4\text{He}^{2+}$ ビームを用いた透過型の弾性反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis : ERDA) による水素分布測定法の開発を進めている。8 - 10 MeV の $^4\text{He}^{2+}$ ビームによる水素原子核の反跳断面積は前方（検出角度 $\sim 0^\circ$ ）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特徴を持つ。透過 ERDA において、H と D（重水素 ^2H ）は、 ^4He のエネルギーが 8 - 10 MeV の場合、1 - 2 b/sr と大きく増強される。T-ERDA は、固体試料中の D と H の含有量の比（いわゆる D/H 比）を測定するために使用することができる。

実験で使用した試料は、厚さ 2.5 μm のマイラー（ポリエチレンテレフタレート ($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$)_n）の薄い H 含有フィルムである。マイラーには、入射した $^4\text{He}^{2+}$ が粒子検出器に入るのを防ぐため、厚さ 20 μm の Ni 箔を敷いた。Al 箔よりクーロン障壁の高い Ni 箔を採用することで、核反応に起因するバックグラウンド収量を大幅に抑制した。反跳 H と D のエネルギーは、Ni 箔を通過した後、表面障壁型シリコン検出器で測定されたものである。図 62 は、マイラー/Ni 試料の透過 ERDA スペクトルで、入射した $^4\text{He}^{2+}$ ビームの電荷が、1.56 μC と 3.80 μC の測定結果である。阻止能の推定から、4.16 MeV と 5.87 MeV の 2 つのピークはそれぞれマイラーからの反跳 H と D であることが確認された。

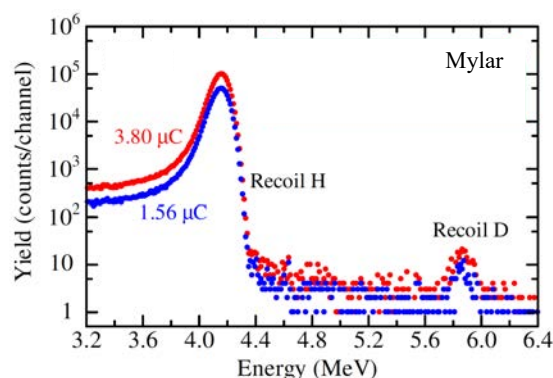


図 62 厚さ 2.5 μm のマイラー膜に 8 MeV の $^4\text{He}^{2+}$ を入射した場合の透過 ERDA スペクトル（測定中の入射電荷は 1.56 および 3.80 μC ）。横軸は、10.9 keV が 1 チャンネル幅に相当する。

加速器質量分析法（AMS）を用いた人為起源 ^{129}I の検出

人新世（Anthropocene）の始まりを特徴づけるキーマーカー層序のデータセットを別府湾堆積物において構築することを目指して研究が進められている。筑波大学の研究グループでは、加速器質量分析法（AMS）による堆積物中の長半減期放射性核種 I-129 の分析を担当した。別府湾で採取された堆積物中の I-129/I-127 同位体比について、1950 年代からの上昇トレンドを見出すことができた（図 63）。これは核実験を起源とした人為起源の I-129 の痕跡であり、別府湾堆積物に人新世の始まりを示す地層境界が存在することを示した [24]。

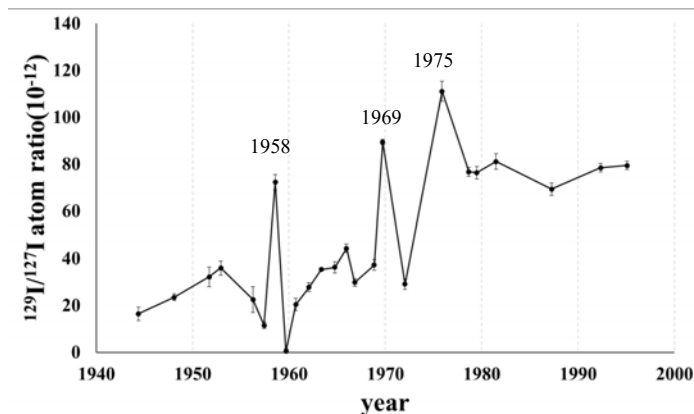


図 63 別府湾体積物中の I-129/I-127 変動 (1944-1995 年)

稀少 RI リングでの不安定核の質量測定

自然界に存在する元素のうち、鉄より重い約半数の元素は、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て、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。2022 年度は、4 月に Sn 領域の最初の質量測定実験をまとめた論文を Physical Review Letter に発表した [25]。この論文では、 ^{123}Pd の質量精度を向上させた。2021 年度に稀少 RI リング (R3) で行なった実験では、キッカー磁石の不具合により数日間マシンタイムが不能となったので、2022 年度は、キッカー磁石の更新を行った。キッカー磁石の不具合の原因は、充電用コンデンサーの絶縁破壊である。従来の 3 層構造のコンデンサー (AVX 製 HP40-H132-00) に代えて、絶縁破壊に強いと考えられる単層構造のコンデンサー (TDK 製 FHV-10An) に随時置き換えている。置き換え作業と並行して、耐圧試験も行っている。これまで、置き換えたコンデンサに関しては、不具合は見出されてはいない。今後は、全てのキッカー磁石 (6 ユニット) のコンデンサを更新し、質量測定実験を見越した長期運転 (1 週間程度) を行い、コンデンサの動作を担保する。並行して、R3 の入射ライン上に垂直方向のステアラー磁石を置くべく、検討を進めている。R3 の垂直方向のアクセプタンスは小さく、また、これまで入射ラインに垂直方向のステアラーがないため入射ビームの垂直方向の調整ができず BigRIPS の F3 から R3 の ELC までの輸送効率が低かった (1%以下) と考えられている。垂直方向のステアラー磁石の設置位置を決め、磁石と電源の仕様を決めたのち、製作を行い、2023 年度中には、設置を行う予定である。

不安定核 ^{30}P の核磁気モーメントの探索

原子核の核磁気モーメントは、原子核の核構造を探る上で重要である。我々は、不安定核 ^{30}P ($I^\pi=1^+$, $T_{1/2}=2.50$ ms) の核磁気モーメントの探索を行っている。筑波大学 6 MV タンデム加速器から供給される偏極陽子ビームあるいは偏極重陽子ビームを Si 標的に照射し偏極移行反応により偏極した ^{30}P を生成する。典型的なベータ線のタイムスペクトルを図 64 に示した (図 64 (a) は、12MeV 偏極陽子ビームの場合、図 64 (b) は、6MeV 偏極重陽子ビームの場合)。また、 ^{29}P の Si 中での緩和時間は、22(2) s と報告されている [26]。 ^{30}P は、 ^{29}P と原子番号が同じで質量数も近いので、生成した ^{30}P は、Si 中

で ^{29}P と同じサイトに入ると期待でき、偏極が生成されていれば、偏極は保持されると期待できる。一方、 ^{30}P は、 ^{29}P に比べてかなり長寿命で、寿命は、Si 中での緩和時間より遥かに長く、また、スピンの 1 であり、電気四重極相互作用が無視できなくなる点などから、 ^{29}P より核偏極量は小さくなると予想される。過去の偏極陽子ビームの実験では、ビームエネルギーにより偏極量が大きく変わっているため [27]、我々は、ビームエネルギーを変えながら、 ^{30}P の磁気モーメントが予想される $0.2\sim 0.9$ n.m. の間で探索を行っている。2022 年度の実験では、偏極陽子ビームについては、7, 7.5, 8, 8.5, 9, 10 MeV で探索し、偏極重陽子ビームについては、6, 8, 10, 12 MeV で探索を行った。これまでの実験では、探索した範囲には、有意なエフェクトは観測されていない。今後は、探索できていないエネルギーでも探索を行う。

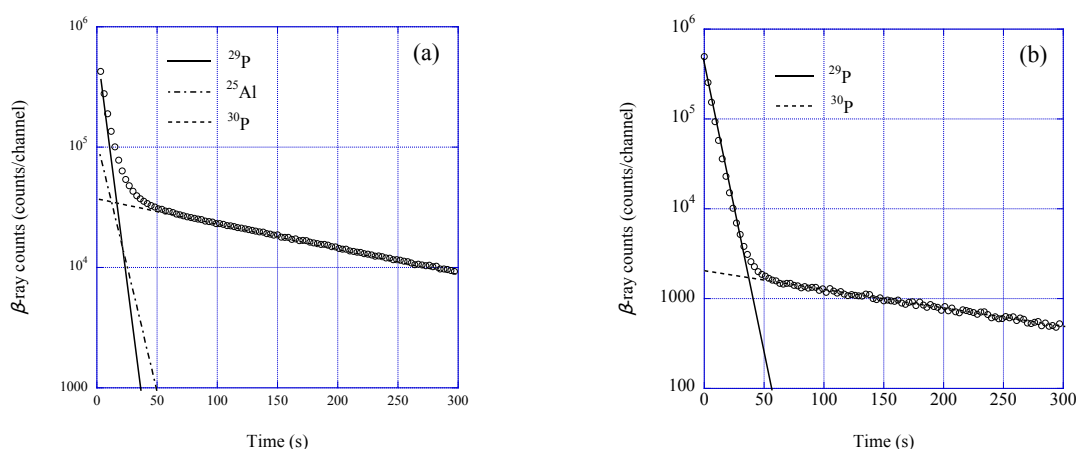


図 64 (a) 12MeV 偏極陽子ビームを Si 標的に照射した場合の典型的なベータ線の時間スペクトル。実線（破線）は、 ^{29}P (^{30}P) を示す。一点破線は、(p, α) 反応で生成した ^{25}Al ($T_{1/2}=7.18$ s) である。(b) 12MeV 偏極陽子ビームを Si 標的に照射した場合の典型的なベータ線の時間スペクトル。実線（破線）は、 ^{29}P (^{30}P) を示す。

固体重水素標的の開発と固体水素標的の改良

中性子スキンとは、中性子が原子核表面に染み出したような核構造である。中性子スキン厚を決定することは中性子物質の状態方程式の理解に繋がり、特に、より中性子過剰な不安定核の中性子スキン厚が重要である。不安定核の中性子スキン厚を実験的に決定するうえで有効な手法の一つに、反応断面積測定がある。我々は、反応断面積測定から高精度に中性子スキン厚を導出するため、固体重水素標的 (SDT) の開発と固体水素標的 (SHT) の改良を行った。

SDT の開発については、昨年度までに重水素の固化に成功した。そこで、今年度は量子医科学研究所の重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて SDT に ^{18}O ビームを照射し、反応率の測定を行った。反応率は標的の物質厚に比例するため、その位置依存性から密度の均一性の評価が可能である。図 65 (左) は、SDT 中心における ^{18}O ビームの像である。図 65 (左) 中に示したような 5 mm 幅の円環状ゲートを作成し、各ゲートごとの反応率をプロットしたのが図 65 (右) である。青点は実験値で、赤線は先行研究 [28] により決定された SHT 表面の膨らみを再現する曲線である。図 65 (右) における実験値と膨らみ曲線の一致は、SDT 表面が SHT 表面と同様に膨らんでいることを示しており、SDT 内部が誤差の範囲で一様に固化していると考えても矛盾は無い。今後は、より高統計に SDT 内部の密度

の均一性を確認する予定である。

SHT の改良については、標的厚の均一化を行った。従来は SHT 表面が約 2.5 mm 膨らんでいたため、これを抑制するために He ガスセルを開発した。He ガスセルの模式図が図 66 (左) である。新たに He ガスを供給するためのシステムを構築し、He ガスの圧力を固体標的部の圧力と等しくすることで表面の膨らみを抑制する。図 66 (右) は、レーザー変位計を用いて SHT 表面の位置を測定した結果である。測定時のジオメトリからは、図 66 (右) の下から上にレーザーを照射していた。そのため、この結果は SHT 表面がわずかに凹んでいることを示している。また、SHT の端で急激に凹みが発生し、中心部 (-20 mm ~ 20 mm、オレンジの網掛け部分) はほとんど均一であることも分かった。SHT 標的厚の均一性を図 66 (右) の標準偏差として定義し、SHT 中心部の均一性は ± 0.08 mm であることが分かった。今後は、He セルを SDT 作製にも適用する予定である。

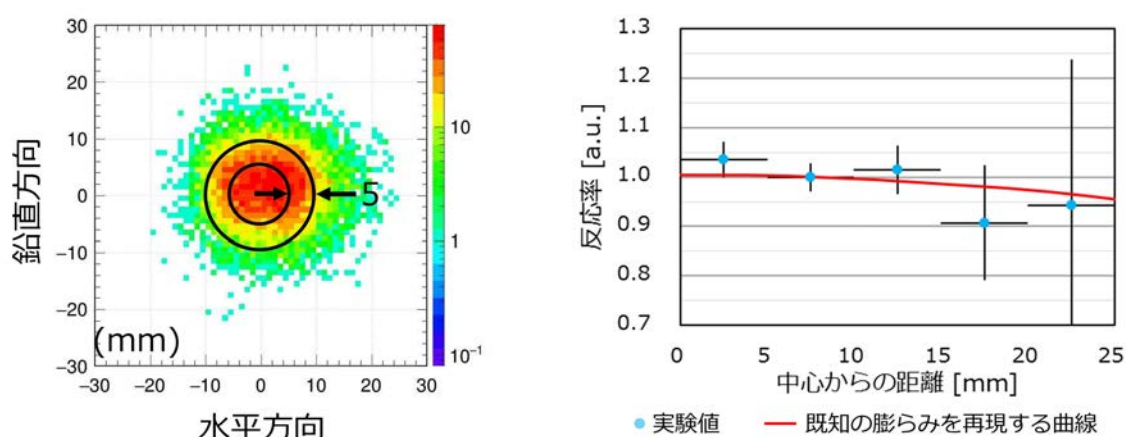


図 65 (左) SDT 中心における ^{18}O ビームの像。(右) ^{18}O と SDT の反応率の位置依存性。青点は実験により測定した反応率で、5 mm~10 mm の位置における反応率を 1 に規格化している。赤線は SHT 表面の膨らみを再現する曲線で、既知のパラメーター [1] を用いた計算値である。この曲線は、7.5 mm の位置で 1 に規格化されている。

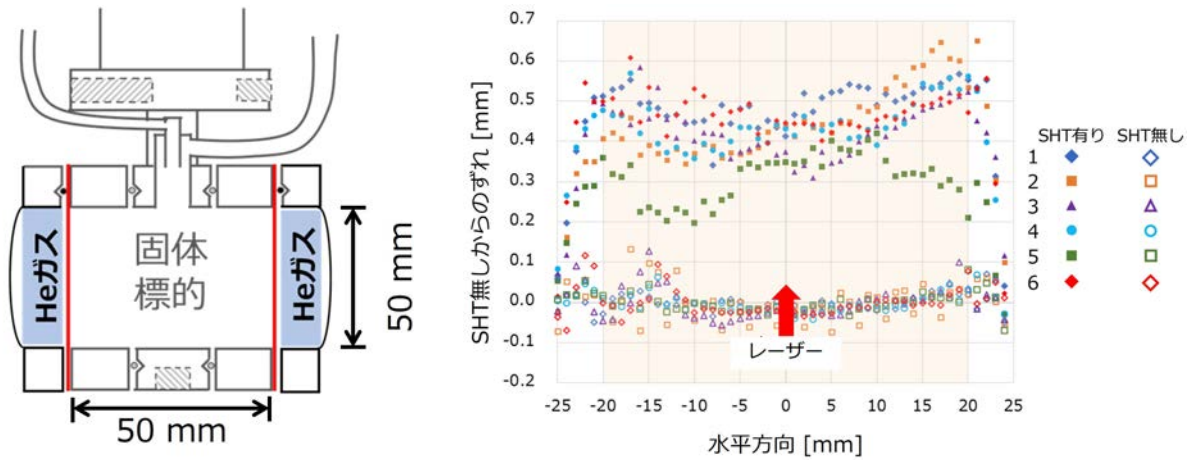


図 66 (左) He ガスセルの模式図。(右) SHT 上流と下流を合わせた、水平方向のレーザー測定の結果。白抜きの点が SHT 無しの時の表面の位置、塗りつぶした点が SHT 有りの時の表面の位置を示す。SHT 無しのデータは、0.0 mm になるように補正している。また、SHT の作製を 6 回繰り返し各 SHT についてレーザー測定を行ったため、それぞれの結果を 1 ～6 で示す。

参考文献

- [1] PHENIX Collaboration, *Nature Phys.* 15, 214–220 (2019)
- [2] PHENIX Collaboration, *Phys. Rev. C.* 105, 024901 (2022)
- [3] PHENIX Collaboration, *Phys. Rev. C.* 107, 024907 (2023)
- [4] W. Zhao *et al.*, *Phys. Rev. C.* 107, 014904 (2023)
- [5] STAR Collaboration, arXiv:2210.11352, Accepted by *Phys. Rev. Lett.*
- [6] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 130, 082301 (2023)
- [7] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 130, 202301 (2023)
- [8] STAR Collaboration, Accepted in *Phys. Rev. Lett.* (arXiv:2211.169810)
- [9] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 126, 092301 (2021)
- [10] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 128, 202303 (2022)
- [11] H. T. Ding, S. T. Li, Q. Shi, and X. D. Wang, *Eur. Phys. J. A* (2021) 57.202
- [12] Z. Yang, X. Luo, B. Mohanty, *Phys. Rev. C* 95, 014914 (2017)
- [13] T. Nonaka, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 1039 (2022) 167171
- [14] STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 76, 024915 (2007)
- [15] STAR Collaboration, *Nature* 548, 62 (2017)
- [16] STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 98, 14910 (2018)
- [17] ALICE Collaboration, *Phys. Rev. C* 101 044611 (2020)
- [18] STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 104 6, L061901 (2021)
- [19] S. Voloshin, *EPJ Web Conf.* 171, 07002 (2018)
- [20] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 123, 132301 (2019)
- [21] S. Alzhrani, S. Ryu, and C. Shen, *Phys. Rev. C* 106, 014905 (2022)
- [22] STAR Collaboration, arXiv:2303.09074 (2023)
- [23] A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, ALICE collaboration, S. Acharya, et al., CERN-LHCC-2020-009 ; LHCC-I-036
- [24] M. Kuwae *et al.*, *The Anthropocene Review*, (2022) 20530196221135077.
- [25] H.F. Li *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 128, 152701 (2022).
- [26] T. Minamisono *et al.*, *Phys. Rev. C* 14 (1976) 376.
- [27] T. Minamisono *et al.*, *Phys. Rev. C* 14 (1976) 2335.
- [28] T. Moriguchi *et al.*, *NIMA* **624**, (2010) 27.

1. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, Phase structure and critical point in heavy-quark QCD, PoS (LATTICE 2022), ref.177, pp.1-9 (2023), DOI:10.22323/1.430.0177
2. Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku, PoS (LATTICE 2022), ref.284, pp.1-10 (2023), DOI:10.22323/1.430.0284
3. Shinji Ejiri, Canonical partition function and center symmetry breaking in finite density lattice gauge theories, Phys. Rev. D 106, No.11, ref.114505, pp.1-16 (2022), DOI:10.1103/PhysRevD.106.114505
4. Naoto Oishi, Yoshiki Murao, Noriko Nitta, Hidetsugu Tsuchida, Shigeo Tomita, Kimikazu Sasa, Kouichi Hirata, Hiromi Shibata, Yoshimi Hirano, Keisuke Yamada, Atsuya Chiba, Yuichi Saitoh, Kazumasa Narumi, Yasushi Hoshino, Morphological changes of nanostructures on silicon induced by C₆₀-ion irradiation, Journal of Vacuum Science and Technology, A 40(6) (2022) 063103. [DOI: 10.1116/6.0002073]
5. Hongtao Shen, Guofeng Zhang, Junsen Tang, Shulin Shi, Li Wang, Dingxiong Chen, Linjie Qi, Yanghe Ouyang, Xinyi Han, Kaiyong Wu, Xiaojun Sun, He Yun, Yiwen Bao, Ming He, Kimikazu Sasa, Shan Jiang, A single-stage accelerator mass spectrometer and its applications at Guangxi Normal University, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 532 (2022) 68-72. [DOI:10.1016/j.nimb.2022.10.004]
6. Hongtao Shen, Shulin Shi, Junsen Tang, Mingli Qi, Siyu Wei, Kimikazu Sasa, Mingji Liu, Li Wang, Guofeng Zhang, Linjie Qi, Dingxiong Chen, Shanhua Gong, Guofu Song, Junyan Dong, Mingjun Wei, Yun He, ¹⁴C-AMS technology and its applications to an oil field tracer experiment, Radiocarbon, 64(5) (2022), 1159 - 1169. [DOI: 10.1016/j.nimb.2022.10.004]
7. Hongtao Shen, Junsen Tang, Li Wang, Mingli Qi, Zhaomei Li, Siyu Wei, Kimikazu Sasa, Shulin Shi, Guofeng Zhang, Dingxiong Chen, Linjie Qi, Ning Wang, Houbing Zhou, Ming He, Qingzhang Zhao, Yun He, New sample preparation line for radiocarbon measurements at the GXNU laboratory, Radiocarbon, 64(6) (2022), 1501-1511. [DOI:10.1017/RDC.2022.36]
8. Hiroshi Kudo, Masanori Kurosawa, Hiroshi Naramoto, Masao Sataka, Satoshi Ishii, Kimikazu Sasa and Shigeo Tomita, Determination of hydrogen concentration in solids by transmission ERDA under nuclear-elastically enhanced recoiling of H by 8 and 9 MeV He, Journal of Physics: Condensed Matter, 34 (2022) 435902 (8pp). [DOI:10.1088/1361-648X/ac8b4e]
9. Kimikazu Sasa, Yuta Ochiai, Yuki Tosaki, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura and Keisuke Sueki, Chlorine-36 deposition at Tsukuba, Japan, after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 532 (2022) 73-77. [DOI: 10.1016/j.nimb.2022.10.003]
10. Michinobu Kuwae, Bruce P. Finney, Zhiyuan Shi, Aya Sakaguchi, Narumi Tsugeki, Takayuki Omori, Tetsuro Agusa, Yoshiaki Suzuki, Yusuke Yokoyama, Hirofumi Hinata, Yoshio Hatada, Jun Inoue, Kazumi Matsuoka, Misaki Shimada, Hikaru Takahara, Shin Takahashi, Daisuke Ueno, Atsuko Amano, Jun Tsutsumi, Masanobu Yamamoto, Keiji Takemura, Keitaro Yamada, Ken Ikehara, Tsuyoshi Haraguchi, Stephen Tims, Michaela Froehlich, L. Keith Fifield, Takahiro Aze, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Yukinori Tani, Peter R. Leavitt, Hideyuki Doi, Tomohisa Irino, Kazuyoshi Moriya, Akira Hayashida, Kotaro Hirose, Hidekazu Suzuki, and Yoshiki Saito, The Beppu Bay, Japan, as a candidate Global Boundaries Stratotype Section and Point for the Anthropocene series, The Anthropocene Review, 10(1), (2023), 49-86. [DOI: 10.1177/20530196221135077]
11. Junsen Tang, Hongtao Shen, Li Wang, Guofeng Zhang, Linjie Qi, Dingxiong Chen, Zhaomei Li, Shulin Shi, Mingli Qi, He Ouyang, Xinyi Han, Kaiyong Wu, Yifei Wang, Bin Wu, Yi Xie, Ning Wang, Yun He, Kimikazu Sasa, A simple preparation system for Tritium and Radiocarbon at the GXNU laboratory, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 535 (2023) 261-266. [DOI: 10.1016/j.nimb.2022.11.026]
12. Y. Ishibashi, A. Gladkov, Y. Ichikawa, A. Takamine, H. Nishibata, T. Sato, H. Yamazaki, T. Abe, J. M. Daugas, T. Egami, T. Fujita, G. Georgiev, K. Imamura, T. Kawaguchi, W. Kobayashi, Y. Nakamura, A. Ozawa, M. Sanjo, N. Shimizu, D. Tominaga, L. C. Tao, K. Asahi, H. Ueno, "Nuclear magnetic moment of the neutron-rich nucleus ²¹O", Physical Review C, 107 (2023) 024306. [DOI: 10.1103/PhysRevC.107.024306]
13. M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, A. Prochazka, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suzuki, T. Moriguchi, D. S. Ahn, A. 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, R. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. Kenzhina, Z. Korkulu, Y. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, K. Ohnishi, M. Ohtake, T. Ohtsubo, S. Omika, H. J. Ong, A. Ozawa, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sugihara, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Suzuki, H. Takeda, Y. Tanaka, Y. K. Tanaka, I. Tanihata, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, and T. K. Zhodybayev, "Charge-changing cross sections for ⁴²⁻⁵¹Ca and effect of charged-particle evaporation induced by neutron-removal reactions", Physical Review C, 106 (2022) 014617. [DOI: 10.1103/PhysRevC.106.014617]

14. H. F. Li, S. Naimi, T. M. Sprouse, M. R. Mumpower, Y. Abe, Y. Yamaguchi, D. Nagae, F. Suzaki, M. Wakasugi, H. Arakawa, W. B. Dou, D. Hamakawa, S. Hosoi, Y. Inada, D. Kajiki, T. Kobayashi, M. Sakaue, Y. Yokoda, T. Yamaguchi, R. Kagesawa, D. Kamioka, T. Moriguchi, M. Mukai, A. Ozawa, S. Ota, N. Kitamura, S. Masuoka, S. Michimasa, H. Baba, N. Fukuda, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, D. S. Ahn, M. Wang, C. Y. Fu, Q. Wang, S. Suzuki, Z. Ge, Yu. A. Litvinov, G. Lorusso, P. M. Walker, Zs. Podolyak, and T. Uesaka, “First Application of Mass Measurements with the Rare-RI Ring Reveals the Solar r -Process Abundance Trend at $A = 122$ and $A = 123$ ”, *Physical Review Letters*, **128** (2022) 152701. [DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.152701]
15. N. J. Abdulameer *et al.* [PHENIX], “Low- p_T direct-photon production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 39$ and 62.4 GeV” *Phys. Rev. C* **107**, 024914 (2023)
16. N. J. Abdulameer *et al.* [PHENIX], “Measurements of second-harmonic Fourier coefficients from azimuthal anisotropies in $p+p$, $p+Au$, $d+Au$, and ^3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **107**, 024907 (2023)
17. N. J. Abdulameer *et al.* [PHENIX], “Improving constraints on gluon spin-momentum correlations in transversely polarized protons via midrapidity open-heavy-flavor electrons in $p^\uparrow+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. D* **107**, 052012 (2023)
18. N. J. Abdulameer *et al.* [PHENIX], “Measurement of ϕ -meson production in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV,” *Phys. Rev. C* **107**, 014907 (2023)
19. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “ ϕ -meson production in $p+Al$, $p+Au$, $d+Au$, and ^3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **106**, 014908 (2022)
20. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “Measurement of $\psi(2S)$ nuclear modification at backward and forward rapidity in $p+p$, $p+Al$, and $p+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **105**, 064912 (2022)
21. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “Systematic study of nuclear effects in $p+Al$, $p+Au$, $d+Au$, and ^3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV using π^0 production,” *Phys. Rev. C* **105**, 064902 (2022)
22. M. Abdallah *et al.* [STAR], “ K^0 production in Au+Au collisions at sNN=7.7, 11.5, 14.5, 19.6, 27, and 39 GeV from the RHIC beam energy scan,” *Phys. Rev. C* **107**, no.3, 034907 (2023)
23. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Higher-order cumulants and correlation functions of proton multiplicity distributions in sNN=3 GeV Au+Au collisions at the RHIC STAR experiment,” *Phys. Rev. C* **107**, no.2, 024908 (2023)
24. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Pion, kaon, and (anti)proton production in U+U collisions at sNN=193 GeV measured with the STAR detector,” *Phys. Rev. C* **107**, no.2, 024901 (2023)
25. B. Aboona *et al.* [STAR], “Beam Energy Dependence of Fifth and Sixth-Order Net-proton Number Fluctuations in Au+Au Collisions at RHIC,” *Phys. Rev. Lett.* **130**, no.8, 082301 (2023)
26. B. Aboona *et al.* [STAR], “Observation of sequential Υ suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV with the STAR experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **130**, no.11, 112301 (2023)
27. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurement of $HA4$ and $HeA4$ binding energy in Au+Au collisions at sNN = 3 GeV,” *Phys. Lett. B* **834**, 137449 (2022)
28. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Azimuthal transverse single-spin asymmetries of inclusive jets and identified hadrons within jets from polarized pp collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. D* **106**, no.7, 072010 (2022)
29. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Azimuthal anisotropy measurement of (multi)strange hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 54.4$ GeV,” *Phys. Rev. C* **107**, no.2, 024912 (2023)
30. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Projections of two-particle correlations onto transverse rapidity in Au+Au collisions at sNN=200 GeV at STAR,” *Phys. Rev. C* **106**, no.4, 044906 (2022)
31. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Pattern of global spin alignment of ϕ and K^0 mesons in heavy-ion collisions,” *Nature* **614**, no.7947, 244-248 (2023)
32. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Tomography of ultrarelativistic nuclei with polarized photon-gluon collisions,” *Sci. Adv.* **9**, no.1, eabq3903 (2023)
33. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Centrality and transverse momentum dependence of higher-order flow harmonics of identified hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **105**, no.6, 064911 (2022)
34. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Collision-System and Beam-Energy Dependence of Anisotropic Flow Fluctuations,” *Phys. Rev. Lett.* **129**, no.25, 252301 (2022)
35. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Light nuclei collectivity from $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV Au+Au collisions at RHIC,” *Phys. Lett. B* **827**, 136941 (2022)
36. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurements of Proton High Order Cumulants in $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV Au+Au Collisions and Implications for the QCD Critical Point,” *Phys. Rev. Lett.* **128**, no.20, 202303 (2022)
37. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Evidence of Mass Ordering of Charm and Bottom Quark Energy Loss in Au+Au Collisions at RHIC,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.12, 1150 (2022)
38. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Evidence for Nonlinear Gluon Effects in QCD and Their Mass Number Dependence at STAR,” *Phys. Rev. Lett.* **129**, no.9, 092501 (2022)

39. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in polarized proton collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV,” *Phys. Rev. D* **105**, no.9, 092011 (2022)
40. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurements of H_{Λ}^3 and H_{Λ}^4 Lifetimes and Yields in Au+Au Collisions in the High Baryon Density Region,” *Phys. Rev. Lett.* **128**, no.20, 202301 (2022)
41. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Differential measurements of jet substructure and partonic energy loss in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **105**, no.4, 044906 (2022)
42. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Disappearance of partonic collectivity in sNN=3GeV Au+Au collisions at RHIC,” *Phys. Lett. B* **827**, 137003 (2022)
43. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Probing strangeness canonical ensemble with K^- , $\phi(1020)$ and Ξ^- production in Au+Au collisions at sNN=3 GeV,” *Phys. Lett. B* **831**, 137152 (2022)
44. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of anti- ^3He nuclei absorption in matter and impact on their propagation in the Galaxy,” *Nature Phys.* **19**, no.1, 61-71 (2023)
45. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Multiplicity dependence of charged-particle jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.6, 514 (2022)
46. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of beauty production via non-prompt D^0 mesons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **12**, 126 (2022)
47. S. Acharya *et al.* [ALICE], “First study of the two-body scattering involving charm hadrons,” *Phys. Rev. D* **106**, no.5, 052010 (2022)
48. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Forward rapidity J/ψ production as a function of charged-particle multiplicity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV,” *JHEP* **06**, 015 (2022)
49. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Neutral to charged kaon yield fluctuations in Pb – Pb collisions at sNN=2.76 TeV,” *Phys. Lett. B* **832**, 137242 (2022)
50. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Constraining hadronization mechanisms with Λ_c^+ / D^0 production ratios in Pb–Pb collisions at sNN=5.02 TeV,” *Phys. Lett. B* **839**, 137796 (2023)
51. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Production of light (anti)nuclei in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.4, 289 (2022)
52. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Observation of a multiplicity dependence in the p_T -differential charm baryon-to-meson ratios in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **829**, 137065 (2022)
53. S. Acharya *et al.* [ALICE], “KS0KS0 and KS0K $\pm$ femtoscopy in pp collisions at s=5.02 and 13 TeV,” *Phys. Lett. B* **833**, 137335 (2022)
54. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Characterizing the initial conditions of heavy-ion collisions at the LHC with mean transverse momentum and anisotropic flow correlations,” *Phys. Lett. B* **834**, 137393 (2022)
55. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Investigating charm production and fragmentation via azimuthal correlations of prompt D mesons with charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **82**, no.4, 335 (2022)
56. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of prompt D_s^+ -meson production and azimuthal anisotropy in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02\text{TeV}$,” *Phys. Lett. B* **827**, 136986 (2022)
57. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Prompt D^0 , D^+ , and D^{*+} production in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **01**, 174 (2022)
58. S. Acharya *et al.* [ALICE], “General balance functions of identified charged hadron pairs of (π, K, p) in Pb–Pb collisions at sNN= 2.76 TeV,” *Phys. Lett. B* **833**, 137338 (2022)
59. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurements of the groomed and ungroomed jet angularities in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **05**, 061 (2022)
60. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ Hyperons along the Beam Direction in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **128**, no.17, 172005 (2022)
61. S. Acharya *et al.* [A Large Ion Collider Experiment and ALICE], “Hypertriton Production in p-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **128**, no.25, 252003 (2022)
62. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Study of very forward energy and its correlation with particle production at midrapidity in pp and p-Pb collisions at the LHC,” *JHEP* **08**, 086 (2022)
63. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Production of $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *Phys. Rev. C* **106**, no.3, 034907 (2022)
64. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Direct observation of the dead-cone effect in quantum chromodynamics,” *Nature* **605**, no.7910, 440-446 (2022) [erratum: *Nature* **607**, no.7920, E22 (2022)]
65. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of $K^*(892)^\pm$ production in inelastic pp collisions at the LHC,” *Phys. Lett. B* **828**, 137013 (2022)
66. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Inclusive, prompt and non-prompt J/ψ production at midrapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **06**, 011 (2022)
67. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Investigating the role of strangeness in baryon–antibaryon annihilation at the LHC,”

- Phys. Lett. B **829**, 137060 (2022)
68. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Production of Λ and K_s^0 in jets in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV and pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV,” Phys. Lett. B **827**, 136984 (2022)
 69. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Exploring the $\Lambda\Lambda$ – $N\Sigma$ coupled system with high precision correlation techniques at the LHC,” Phys. Lett. B **833**, 137272 (2022)
 70. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Nuclear modification factor of light neutral-meson spectra up to high transverse momentum in p–Pb collisions at $s_{NN}=8.16$ TeV,” Phys. Lett. B **827**, 136943 (2022)
 71. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Global polarization of $\Lambda\bar{\Lambda}$ hyperons in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV,” Phys. Rev. C **101**, no.4, 044611 (2020) [erratum: Phys. Rev. C **105**, no.2, 029902 (2022)]
 72. A. Ghimouz [FoCal], “Design and characterisation of a new FoCal-E prototype for ALICE experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **1048**, 167996 (2023)
 73. T. Nonaka, “Purity correction for cumulants of hyperon number distribution”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 1039 (2022) 167171 (Published 11 September 2022)
 74. M. Ichikawa *et al.* [JPARC], “Commissioning Runs of J-PARC E16 Experiment,” Acta Phys. Polon. Supp. **16**, no.1, 143 (2023)
 75. K. Ozawa, K. Aoki, D. Arimizu, S. Ashikaga, W. C. Chang, T. Chujo, K. Ebata, H. En’yo, S. Esumi and H. Hamagaki, *et al.* “Towards the Measurement of the Mass Modifications of Vector Mesons in a Finite Density Matter,” Acta Phys. Polon. A **142**, no.3, 399-404 (2022)
 76. X. Li, J. K. Adkins, Y. Akiba, A. Albataineh, M. Amarian, I. C. Arsene, C. Ayerbe Gayoso, J. Bae, X. Bai and M. D. Baker, *et al.*, “Exclusive J/ψ Detection and Physics with ECCE,” Nucl. Instrum. Meth. A **1048**, 167956 (2023)
 77. C. Fanelli, Z. Papandreou, K. Suresh, J. K. Adkins, Y. Akiba, A. Albataineh, M. Amarian, I. C. Arsene, C. Ayerbe Gayoso and J. Bae, *et al.*, “AI-assisted optimization of the ECCE tracking system at the Electron Ion Collider,” Nucl. Instrum. Meth. A **1047**, 167748 (2023)
 78. J. C. Bernauer, C. T. Dean, C. Fanelli, J. Huang, K. Kauder, D. Lawrence, J. D. Osborn, C. Paus, J. K. Adkins and Y. Akiba, *et al.*, “Scientific computing plan for the ECCE detector at the Electron Ion Collider,” Nucl. Instrum. Meth. A **1047**, 167859 (2023)
 79. I.W. Park, H. Sako, K. Aoki, P. Gubler and S.H. Lee, “Disentangling longitudinal and transverse modes of the phi meson through dilepton and kaon decays”, Phys. Rev. D **107**, 074033 (2023)
 80. Tetsuaki Moriguchi, Akira Ozawa, Yoshihiro Yamato, Mika Hayashi, Reo Kagesawa, Naoto Kaname, Momo Mukai, Keisuke Tomita, Asahi Yano, “Status of Lamb-shift polarized ion source at 6 MV tandem accelerator in UTTAC and its application to nuclear physics”, Proceedings of the 24th International Spin Symposium (SPIN2021), JPS Conference Proceedings, 37 (2022) 021201. [DOI: 10.7566/JPSCP.37.021201]
 81. T. Nonaka, “Experimental Overview on Fluctuations of Conserved Charges”, Proceedings of 29th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2022, Krakow, Poland: Acta Physica Polonica B16,1-A14, published online 2022-12-14
 82. T. Niida, “Recent progress on global and local polarization of hyperons in heavy-ion collisions”, EPJ Web of Conf. **271** (2022) 08008
 83. S. Sakai [ALICE], “Electroweak-boson Production from Small-to-Large Collision Systems with ALICE at the LHC,” Acta Phys. Polon. Supp. **16** (2023) no.1, 127
 84. S. Nakasuga, M. Ichikawa, M. Naruki, H. Sako, S. Sato *et al.*, “Commissioning of the electron identification system for the dilepton measurement in p+A collisions at J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A **1041** (2022) 167335
 85. K. Ozawa, K. Ebata, M. Ichikawa, S. Nakasuga, M. Naruki, H. Sako, S. Sato *et al.*, “Towards the measurement of the mass modifications of vector mesons in a finite density matter”, Acta Phys. Pol. A **142** (2022) 399-404
 86. K. Ozawa, Y. Ichikawa, Y. Miake, M. Naruki, T. Sakaguchi, H. Sako, S. Sato, K. H. Tanaka *et al.*, “The J-PARC heavy ion project”, EPJ Web Conf. **271** (2022) 11004

〈レビュー、解説・総説、書籍・著書等〉

1. 矢野 朝陽, “反応断面積測定のための固体水素・重水素標的の開発”, 原子核研究 (2022 年夏の学校特集号), 2023 年 1 月, 53-54
2. H.-T. Ding, T. Nonaka *et al.*, “Properties of QCD Matter at High Baryon Density”, Chapter 1 “QCD Phase Structure at Finite Baryon Density”, Springer 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-4441-3
3. L. W. Chen, H. Sako *et al.*, “Properties of QCD Matter at High Baryon Density”, Chapter 4 “Nuclear Matter at High Density and Equation of State”, Springer 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-4441-3
4. 新井田 貴文, “STAR 実験におけるビームエネルギー走査プログラム”, 原子核研究 第 67 号 2 号 (2023)

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Masakiyo Kitazawa, “Flux-tube structure via energy-momentum tensor”, Gauge Topology, Flux Tubes And Holographic Models: The Intricate Dynamics Of QCD In Vacuum And Extreme Environments (ECT* - Villa Tambosi, Italy (hybrid), 5.23-27, 2022)
2. Masakiyo Kitazawa, “From lattice to observables: Real and virtual experiments for exploring hot and dense medium”, The 20th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2022) (Busan, Korea (hybrid), 6.13-17, 2022)
3. Masakiyo Kitazawa, “Lattice QCD and physics at nonzero temperature”, Nuclear Physics School (NPS2022) (Pukyoung National University, Busan, Korea (hybrid), 6.27-7.1, 2022)
4. Masakiyo Kitazawa, “Stress-energy-momentum tensor on the lattice”, YITP workshop “QCD phase diagram and lattice QCD” (YITP, Kyoto, Japan (online), Oct. 25-29, 2021)
5. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, “Phase structure and critical point in heavy-quark QCD at finite temperature”, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022)
6. Hideo Matsufuru, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Tatsumi Aoyama, Yusuke Namekawa, “Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku”, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022)
7. Masakiyo Kitazawa, “Critical points in hot and dense QCD”, The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (Korea (online), Aug. 21-26, 2022)
8. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, and Naoki Wakabayashi, “Critical point in heavy-quark QCD at finite temperature”, Tsukuba Global Science Week (TGSW2022) (Univ. of Tsukuba, Tsukuba, Japan (online), Sep. 27, 2022)
9. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, “Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient flow”, The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 10.13-14, 2022)
10. H. Nemura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, I. Kanamori, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, “Implementation of Lattice QCD common code to large scale parallel supercomputer with manycore and GPU architecture”, The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 10.13-14, 2022)
11. Masakiyo Kitazawa, Ashikawa Ryo, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, “Lattice study of the critical point in heavy-quark QCD”, Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD2022) (Switzerland (online), Nov. 22 - Dec. 2, 2022)
12. Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa and Keigo Nitadori, “Benchmark result of Lattice QCD code set Bridge++ 2.0 on Fugaku”, The 5th R-CCS International Symposium “Fugaku and Beyond: Simulation, BigData and AI in the Exascale Era (R-CCS, RIKEN, Kobe, Japan (hybrid), Feb 6-7, 2023)
13. T. Moriguchi, “Development Solid Hydrogen/Deuterium Target for Reaction Cross section Measurements”, Online seminar invited by Beihang University, Oct. 13, 2022 (Invited Talk)
14. K. Okubo (for the STAR Collaboration), “Global polarization of Λ hyperons in Au+Au = 7.2 GeV collisions with fixed-target mode at RHIC-STAR experiment”, Quark Matter 2022, Krakow, Poland (online participation), 4-10 April 2022 (poster)
15. T. Nonaka, “Experimental Overview on Fluctuations of Conserved Charges”, 29th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2022), Krakow, Poland (online participation), 4-10 April 2022
16. T. Nonaka, “Methods and Results on Critical Fluctuations from RHIC BES and FXT”, On-line seminar series IV (Spring 2022) on RHIC Beam Energy Scan, Krakow, 7 June 2022 Poland)
17. S. Esumi, “Beam Energy Scan Summary”, 2022 RHIC/AGS Annual Users’ Meeting, BES2 workshop, June 7-10, 2022
18. S. Esumi, “Anisotropy Measurements at RHIC”, Interdisciplinary workshop on collectivity in heavy ion collisions and cold atom gases, June 29-July 2, 2022
19. S. Esumi, “Status of BES2 analysis in Tsukuba”, STAR Collaboration Meeting, LBNL, February 27-March 3, 2023
20. T. Niida (for the STAR Collaboration), “Hyperon polarization along the beam direction relative to the second and third order event planes in isobar collisions from STAR”, 29th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM2022), Krakow, Poland (online participation), April 4-10, 2022

21. T. Niida, “Experimental overview of polarization in heavy-ion collisions”, 14th RHIC-BES online seminar (Series IV), May 17, 2022
22. T. Niida (for the STAR Collaboration), “STAR Highlights”, RHIC&AGS Annual Users’ Meeting, June 7-10, 2022
23. T. Niida, “Global and local polarization of hyperons in heavy-ion collisions”, 14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2022), Prague, Czech Republic, June 27-July 1, 2022
24. T. Niida, “Hyperon polarization in heavy-ion collisions”, Reimei workshop “Polarization phenomena and Lorentz symmetry violation in dense matter”, Seoul, Korea (online participation), October 6-8, 2022
25. T. Niida, “Phenomena induced by vorticity and magnetic field in heavy-ion collisions”, 2nd International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade, March 13-15, 2023
26. Singo Sakai, “Electroweak-boson production from small to large collision systems with ALICE at the LHC”, 29th international conference on ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions (QM2022), Krakow, Poland, April 4-10, 2022
27. Tatsuya Chujo, “FoCal overview”, ALICE upgrade week, CERN (hybrid), Switzerland, May 2, 2022 (invited)
28. Abderrahmane GHIMOUZ, “Design and characterization of a fully functional FoCal-E prototype in ALICE” 15th Pisa Meeting on Advanced Detector, La Biodola, Isola d’Elba, Italy, May 22-28, 2022 (poster)
29. Tatsuya Chujo and Rachid Guernane, “A High Granularity Silicon-tungsten Based Electromagnetic Calorimeter in a Forward Direction for ALICE”, J-FAST kick-off meeting, Grenoble, France, June 23, 2022 (invited)
30. Tatsuya Chujo, “FoCal hardware”, ALICE India collaboration meeting, VECC, Kolkata, India, September 6, 2022 (invited)
31. Abderrahmane GHIMOUZ, “ELECTRONICS IN FOCAL DETECTOR”, J-FAST Workshop, Univ. of Tsukuba, Japan, Sep. 29, 2022 (invited)
32. Tatsuya Chujo, “A next generation of FoCal prototype (mini-FoCal)”, 2nd Int. Workshop on Forward and FoCal, Univ. of Tsukuba, Japan, March 13-15, 2023
33. Motoi Inaba, “FoCal-E pad in Japan”, 2nd Int. Workshop on Forward and FoCal, Univ. of Tsukuba, Japan, March 13-15, 2023
34. Marco Van Leeuwen, “ALICE 3: a next-generation heavy-ion program for LHC”, 2nd Int. Workshop on Forward and FoCal, Univ. of Tsukuba, Japan, March 13-15, 2023
35. Tatsuya Chujo, “ALICE FoCal-E application for ZDC”, EIC Asia workshop, RIKEN (Wako), Japan, March 17, 2023 (invited)
36. Tatsuya Chujo, “The ALICE Forward calorimeter”, 11th International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions (Hard Probes 2023), Aschaffenburg, Germany, March 26-31, 2023
37. Singo Sakai, “Electroweak-boson measurements from small to large collision systems with ALICE at the LHC”, 11th International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions (Hard Probes 2023), Aschaffenburg, Germany, March 26-31, 2023
38. H. Sako, “Studies of ϕ meson mass modification inside nuclei through K^+K^- decay (J-PARC E88)”, Reimei Workshop “Polarization phenomena and Lorentz symmetry violation in dense matter”, Seoul, Korea, October 8, 2022

[国内学会・研究会]

1. 芦川 涼, 北沢 正清, 江尻 信司, 金谷 和至, “重クォーク QCD 臨界点の $N_t = 6$ における格子数値解析”, 日本物理学会 (岡山理科大学, 岡山市, 岡山, 9.6-8, 2022)
2. 堀越 優弥, 江尻 信司, “グラディエントフローさせた U(1) 格子ゲージ理論におけるセンター対称性とディラックストリング”, 日本物理学会 (岡山理科大学, 岡山市, 岡山, 9.6-8, 2022)
3. 芦川 涼, 北沢 正清, 江尻 信司, 金谷 和至, “重クォーク QCD 臨界点の格子数値解析: 微小格子間隔かつ大体積での解析”, 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 9.20-22, 2022)
4. 堀越 優弥, 江尻 信司, “グラディエントフローによる U(1) 格子ゲージ理論の磁気単極子”, 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 9.20-22, 2022)
5. 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 若林 直輝, “重クォーク領域における有限密度格子 QCD の臨界点決定のためのホッピングパラメータ展開”, 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 9.20-22, 2022)
6. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, “Gradient flow による物理点 QCD の熱力学”, 第 9 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (オンライン開催, 10.27-28, 2022)
7. 芦川 涼, 北沢 正清, 江尻 信司, 金谷 和至, “ $N_t=6$ における重クォーク QCD 臨界点の精密測定”, 日本物理学会 (オンライン開催, 3.22-25, 2023)
8. 江尻 信司, 芦川 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, “有限温度格子 QCD の重クォーク領域での一次相転移の終点の化学ポテンシャル依存性”, 日本物理学会 (オンライン開催, 3.22-25, 2023)
9. 笹 公和, 加速器質量分析法による宇宙線生成核種の検出と地球化学への応用, 日本地球化学会 第 69 回年会, 高知大学, 2022 年 9 月 7 日 (招待講演).
10. 笹 公和, 筑波大学タンデム加速器施設の東日本大震災からの復旧・復興、その後の発展, 日本原子力学会 2022 年秋の大会, 加速器・ビーム科学部会企画セッション, 茨城大学日立キャンパス, 2022 年 9 月 8 日 (招待講演).

11. 笹 公和, 加速器質量分析法における環境中の難測定核種の検出技術に関する進展, 日本放射化学会第 66 回討論会, 東京大学, 2022 年 9 月 15 日 (招待講演).
12. 吉田剛, 松村宏, 松村万寿美, 豊田晃弘, 中村一, 榎本和義, 三浦太一, 笹公和, 森口哲朗, 「可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 による筑波大タンデムの加速器放射化イメージング – 加速器の放射化イメージングへの挑戦 –, 第 34 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, オンライン, 2022 年 7 月 21 日~22 日 (招待講演).
13. 松村 宏, 吉田 剛, 豊田 晃弘, 中村 一, 榎本 和義, 三浦 太一, 別所 光太郎, 松村 万寿美, 森口 哲朗, 笹 公和, GeGI5 による加速器放射化の可視化の可能性の検討, 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会第 21 回学術大会合同大会, 九州大学, 2022 年 11 月 24-26 日.
14. 吉田 剛, 松村 宏, 豊田 晃弘, 中村 一, 榎本 和義, 別所 光太郎, 三浦 太一, 松村 万寿美, 森口 哲朗, 笹 公和, ガンマカメラ GeGI5 による加速器放射化の可視化実験, 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会第 21 回学術大会合同大会, 九州大学, 2022 年 11 月 24-26 日.
15. 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, 上殿 明良, 筑波大学タンデム加速器施設の現状報告, 日本加速器学会第 19 回年会, オンライン, 2022 年 10 月 18-21 日.
16. 笹 公和, 椎根 大輔, 高橋 努, 松村 万寿美, 坂口 綾, 6MV タンデム加速器を用いた長半減期放射性セシウム 135 の加速器質量分析法の開発, 日本加速器学会第 19 回年会, オンライン, 2022 年 10 月 18-21 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, 上殿 明良, 筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状, 第 33 回 タンデム加速器及びその周辺技術の研究会 (日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 オンライン), 2022 年 7 月 21-22 日.
18. 富田成夫, 平賀真瑠古, 畑田颯太, 椎名陽子, 高橋努, 石井聡, 笹公和, コンボイ電子収量におけるクラスター効果の入射粒子依存性 III, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 12-15 日.
19. 松中哲也, 長尾誠也, 井上睦夫, 熊本雄一郎, 谷内由貴子, 葛西広海, 森田貴己, 三木志津帆, 高橋努, 松村万寿美, 末木啓介, 笹公和, 北極海とオホーツク海におけるヨウ素 129 の水平分布解析, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 名古屋大学東山キャンパス 2022 年 9 月 3~7 日, 12 日.
20. 松中 哲也, 落合 伸也, 松村 万寿美, 高橋 努, 末木 啓介, 笹 公和, 能登半島における 1950 年以降の I-129 と Cs-137 の沈着量変動, 日本放射化学会第 66 回討論会 (2022) .
21. 富田成夫, 平賀真瑠古, 畑田颯太, 椎名陽子, 高橋努, 石井聡, 笹公和, 高速分子イオン入射によるコンボイ電子生成におけるイオン種依存性, 第 23 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, 若狭湾エネルギー研究センター, 2022 年 12 月 2~3 日.
22. 松村 万寿美, 笹 公和, 松中 哲也, 高橋 努, 坂口 綾, 末木 啓介, 加速器質量分析に携わる実験室のヨウ素 129 降下量調査 (2022 年夏季), 第 23 回 AMS シンポジウム, 山形大学, 2022 年 12 月 1-2 日.
23. 笹 公和, 高橋 努, 松村 万寿美, 松中 哲也, 坂口 綾, 末木 啓介, 筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置における多核種 AMS と応用研究の現状, 第 23 回 AMS シンポジウム, 山形大学, 2022 年 12 月 1-2 日.
24. 三宅美沙, 箱崎真隆, Rashit Hantemirov, 早川尚志, Samuli Helama, 堀内一穂, A.J.Timothy Jull, 木村勝彦, 前原裕之, 宮原ひろ子, 森谷透, Markku Oinonen, Irina P. Panyushkina, 笹公和, 武山美麗, 門叶冬樹, 過去 1 万年間の極端太陽高エネルギー粒子現象の調査, 第 23 回 AMS シンポジウム, 山形大学, 2022 年 12 月 1-2 日.
25. 富田成夫, 平賀真瑠古, 畑田颯太, 尾関海太, 椎名陽子, 高橋努, 石井聡, 笹公和, コンボイ電子収量におけるクラスター効果の消失膜厚, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22-25 日.
26. 笹 公和, 椎根 大輔, 高橋 努, 松村 万寿美, 坂口 綾, 加速器質量分析法による長半減期放射性セシウム 135 の高感度検出試験, 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 2023 年 3 月 15-18 日.
27. 矢野朝陽, 小沢顕, 森口哲朗, 福田光順, 福留美樹, 高山元, 田口諒, 渡辺薫, 田中聖臣, 鈴木健, 山口貴之, 大久保研吾, 古泉紫, 佐々木健太, 西村太樹, 網谷芽衣, 富山琢史, 中村佑生, 平山瞳, 福嶋知隼, 大坪隆, 野口法秀, 高津和哉, 小林侑希哉, 進藤楠月, 田澤有紀, 泉川卓司, 佐藤眞二, 福田茂一, 北川敦志, “He ガスセルを用いた固体水素標的の厚さの均一化”, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 2023 年 3 月 22-25 日.
28. 矢野朝陽, 小沢顕, 森口哲朗, 福田光順, 三原基嗣, 福留美樹, 高山元, 木村容子, 田口諒, 本多 裕也, 林双葉, 田中聖臣, 鈴木健, 山口貴之, 神田真矩, 関響咲, 大久保研吾, 古泉紫, 佐々木健太, 西村太樹, 高橋弘幸, 菅原奏来, 宇根千晶, 大坪隆, 野口法秀, 泉川卓司, 佐藤眞二, 福田茂一, 北川敦志, “不安定核の反応断面積測定に向けた固体水素標的の開発”, 第 2 回日本量子医科学会学術大会, つくば国際会議場, 2022 年 12 月 9-10 日.
29. 森口哲朗, “非対称核物質の理解に向けた不安定核の反応断面積測定”, 筑波大学宇宙史研究センター 2022 年度第 2 回構成員会議・成果報告 & 交流会, 筑波大学, 2022 年 11 月 28 日.
30. 森口哲朗, “固体水素, 固体重水素標的を用いた反応断面積測定”, 反応断面積研究の新しい展望 WS, 理化学研究所和光キャンパス, 2022 年 11 月 9-10 日 (招待講演) .
31. 森口哲朗, “RI ビーム飛行時間検出器の開発 – 理研稀少 RI リングのための検出器 –”, 2021 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会, オンライン開催, 2022 年 5 月 30 日-6 月 1 日.
32. 大久保孝祐, “Differential measurement of global polarization of Λ hyperons at RHIC-STAR experiment”, 日本物理学会, 山形, 2022 年 9 月
33. 江角晋一, “RHIC 加速器 STAR 実験によるビームエネルギー走査”, 第 17 回「J-PARC-HI の物理を語る夕べ」2023 年 2 月 21 日

34. 新井田貴文, “Results from Beam Energy Scan”, 第 39 回 Heavy Ion Cafe & 第 35 回 Heavy Ion Pub 合同研究会, 2022 年 4 月 30 日
35. 新井田貴文, “Femtoscopia, hypernuclei, and more at STAR”, エキゾチックハドロン研究会, 長崎 (オンライン参加), 2022 年 8 月 18-19 日
36. Hanseo Park, “Measurements of neutral mesons inside jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ALICE at the LHC”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
37. Ryotaro Nagata, “Measurement of heavy-flavour jet v_2 in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
38. Koki Sato, “Measurement of jet radial structure of charged pions and (anti-)protons in pp collision at $\sqrt{s} = 13$ TeV and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
39. Tatsuya Chujo, “ALICE FoCal project + Run-4 upgrade”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
40. Motoi Inaba, “New silicon pad sensors for the FoCal-E detector”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
41. Taiga Kawaguchi, “FoCal PS Test Beam Analysis in 1-5GeV Electron Beam”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
42. Abderrahmane Ghimouz, “Development of the electronics of FoCal-E demonstrator”, ALICE-J Workshop, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, Sep. 29- Oct. 1, 2022
43. Tatsuya Chujo, “ALICE FoCal Project”, TCHoU member meeting, Tsukuba, Japan, November 28, 2022 (invited)
44. 中條達也, “ALICE FoCal 実験で拓く宇宙初期状態 QGP 誕生の謎 (FoCal 検出器開発の現状)”, ELPH symposium 2023, Tohoku Univ. ELPH, Japan, March 2, 2023 (invited)
45. Taiga KAWAGUCHI, “FoCal PS test beam at CERN in 2022”, TCHoU Workshop, Photon & Particle Detectors Division, Univ. of Tsukuba, Japan, Mar. 17, 2023
46. 中條達也, “超前方測定で切り拓く QGP 生成機構とカラーガラス凝縮の謎”, 日本物理学会 2023 年春季大会 シンポジウム「次世代の高エネルギー原子核衝突: 何が理解され、何を理解すべきか?」2023 年 3 月 22 日 (online, invited)
47. Abderrahmane GHIMOUZ, “ELECTRONICS IN FOCAL DETECTOR”, 日本物理学会, 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 23 日 (online)
48. 稲葉基, “LHC-ALICE 実験 FoCal 検出器用シリコンパッドセンサーへの中性子照射試験”, 日本物理学会, 2023 年春季大会 2023 年 3 月 25 日 (online)
49. 川口大雅, “CERN PS 加速器テストビームラインを用いた FoCal-E PAD 検出器試作機の性能評価”, 日本物理学会, 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 25 日 (online)
50. 佐藤航輝 (for the ALICE Collaboration), “LHC ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13$ TeV での陽子 陽子衝突と $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV の鉛 鉛衝突における荷電パイ中間子と (反) 陽子のジェット動径方向分布の測定”, 日本物理学会, 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 25 日 (online)
51. PARK HANSEO, “Performance of ALICE Forward Calorimeter E-Pad using hadron and electron beams at SPS”, 日本物理学会, 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 25 日 (online)

[修士論文]

1. 岩永 一希 「RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ GeV Au+Au 衝突における陽子, K 中間子, π 中間子の粒子数揺らぎの測定」 (Particle number fluctuations of protons, kaons and pions in $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ GeV Au+Au collisions at RHIC-STAR experiment)
2. 大池 駿 「RHIC-STAR 実験 金 + 金衝突のビーム・エネルギー走査による 1 次から 3 次の方位角異方性の測定」 (Measurements of the first to third order azimuthal anisotropies from the Beam Energy Scan in Au+Au collisions at RHIC-STAR experiment)
3. 永田 遼太郎 「LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 鉛-鉛衝突における重クォーク由来ジェットおよび電子の楕円の方位角異方性の測定」 (Measurement of azimuthal anisotropy of jets and electrons from heavy quarks in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with LHC-ALICE)
4. 矢野 朝陽 「不安定核の反応断面積測定に用いる固体水素標的と固体重水素標的の開発」 (Developments of solid hydrogen and solid deuterium targets for reaction cross section measurements of unstable nuclei)

[学士論文]

1. 犬飼 泰地 「LHC-ALICE 実験超前方光子測定用電磁カロリメータ開発のための汎用型電荷敏感増幅器の製作」
2. 江坂 成人 「RHIC-BESII プログラム $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ GeV 金 + 金衝突における正味電荷数ゆらぎの測定」
3. 羽田 幸祐 「RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV 金 + 金衝突における一次方位角異方性の測定」
4. 横尾 岳斗 「機械学習を用いたクォーク/グルーオンジェットの識別」

[競争的資金]

1. 科学研究費 基盤研究 (A)、2020-2022、藏増嘉伸 (代表)、「テンソルネットワーク法による計算物理学の新展開」、11,900 千円

2. 科学研究費 基盤研究 (C)、2022-2025、金谷和至 (代表)、「グラジエントフローによるクォーク・ハドロン物質の熱力学特性」、1,040 千円
3. 科学研究費 挑戦的研究 (萌芽)、長半減期放射性セシウム 135 を加速器質量分析法により超高感度で検出する試み、代表 笹 公和, 1,100 千円
4. 科学研究費 基盤研究 (B)、加速器質量分析法による人為起源ヨウ素 129 の評価手法の確立と環境移行過程の解明、代表 笹 公和, 5,200 千円
5. 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
6. 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, 250 千円
7. 高エネルギー加速器研究機構 加速器科学国際育成事業、VR 技術で見るタンデム加速器、代表 笹 公和, 400 千円
8. 金沢大学環日本海域環境研究センター共同研究 (一般)、人為起源放射性ヨウ素 129 をトレーサーとした南大洋における海水循環研究、代表 笹 公和, 180 千円
9. 科学研究費 基盤研究 (A)、エキゾチック核の励起状態の構造解明に向けた革新的な蓄積リング法の開拓、分担 森口 哲朗, 1,500 千円
10. 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, 400 千円
11. 科学研究費 基盤研究 (S) 2019-2023、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, 19,760 千円
12. 科学研究費 基盤研究 (C) 2022-2025、超高温高密度下における宇宙最速渦とスピン偏極メカニズムの解明、代表 新井田 貴文, 1,100 千円
13. 科学研究費 基盤研究 (S) 2020-2024、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, 113,970 千円
14. TYL-FJPPL (French-Japan Particle Physics Laboratory, KEK) 事業、2018-2022, HAD_04: QGP Tomography with photons, jets, and heavy flavors、日本側代表 中條 達也, 530 千円
15. 科学研究費 基盤研究 (A) 2021-2024、RHIC 偏極陽子衝突による超前方領域での粒子生成の起源の研究・解明 (代表 後藤 雄二)、分担 中條 達也, 300 千円
16. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 2018-2022、クォーク階層とハドロン階層を繋ぐ動的機構 (代表 志垣 賢太)、分担 中條 達也, 900 千円

[受賞]

1. 野中俊宏 2022 年八木浩輔クォークマターアワード (<https://ithems.riken.jp/ja/about/yagi-award>)
2. 犬飼泰地 2022 年度筑波大学校友会賞

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 教授)

武内 勇司 (数理物質系物理学域 准教授)

廣瀬 茂輝 (数理物質系物理学域 助教)

本多 俊介 (数理物質系物理学域 助教)

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 (数理物質系物理工学域 准教授)

近藤 剛弘 (数理物質系物質工学域 准教授)

中村 浩二 (高エネルギー加速器研究機構 助教)

山田 美帆 (都立産業技術高等専門学校 助教)

構成教員として宇宙観測グループの新田助教が退職し、新たに同グループの本多俊介助教が加わった。倉知

前 KEK 教授は連携教員からはずれ、都立産業技術高等専門学校の山田美帆助教が加わり、SOI 検出器に関する研究を行った。

光量子計測器開発部門は、宇宙史国際研究センターの 5 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の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し、定期的な TIA 光・量子計測マネジメントグループ会議に出席し情報交換を行った。2022 年 9 月 1 日に行われた第 1 回 TIA 光・量子計測 MG 研究会では、原が「時間分解能にも優れた高位置分解能 半導体飛跡検出器 AC-LGAD の開発ー 4 D 飛跡検出器」の招待講演を行った。

個別の研究プロジェクトとして、CERN の ATLAS 実験の内部飛跡検出器の増強について、ピクセル型検出器 (中村他) とストリップ型検出器 (廣瀬他) の研究開発および量産を進行中で、同プロジェクトの進行に大きく貢献している。また、FJPPL (France-Japan Particle Physics Laboratory) の日仏協力プログラムでは、中村を日本側リーダーとする LGAD 検出器の開発、山田をリーダーとする SOI 飛跡検出器の開発が採択され、原らと共同で研究を推進した。また、日米科学技術協定 (高エネルギー部門) では、中村を日本側リーダーとして、LGAD 検出器の開発を推進した。これらのプログラムを用いて学生の海外研究を実施した。

センターが主催する構成員会議では、6 月は、中村「Study of electrode granularity for pixel type AC-LGAD detector」と本多「CMB 偏光観測実験 GroundBIRD (2)」、11 月は、中村「AC-LGAD 検出器の開発」、西堀「放射光、X 線自由レーザーを使った物質科学研究における検出器の最適化」、原「Vertex2022 を終えて」の講演を行った。また、光量子部門が主催するシンポジウムを 2023 年 3 月 17 日に開催し、原子核から 2 名 (川口大雅, George Hudson-Chang(Surrey 大/理研)), 宇宙観測から 2 名 (石田智大、小関知宏), 素粒子から 5 名 (大森匠、北彩友海、鈴木尚紀、廣瀬茂輝、中村浩二) により研究紹介が行われた。

半導体飛跡検出器の開発に関して国際的に権威のある Vertex 研究会を、原が実行委員長、中村が実行委員として千葉県の館山リゾートホテルで実施した。コロナのために 2 年間リモートであったが多くの海外研究者も参加する対面の会議となった。

M2 の北彩友海が AC-LGAD 検出器の開発に関して、日本物理学会の学生優秀発表賞を昨年度に続き受賞した。

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。

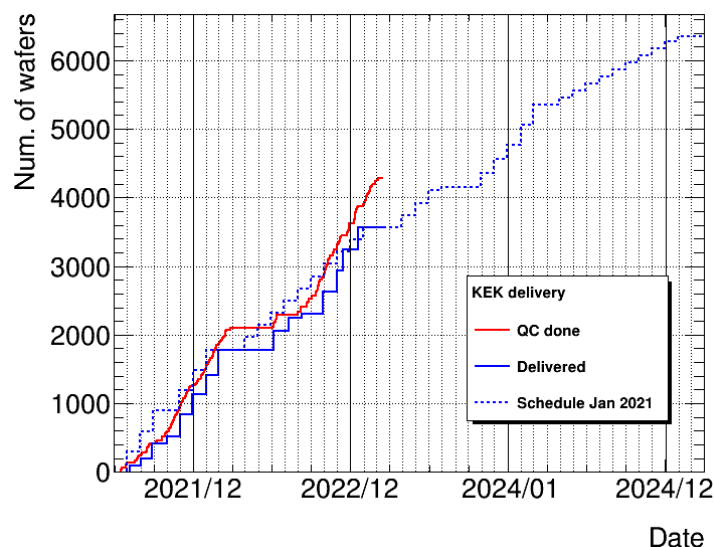


図 67 シリコンストリップセンサー量産中の品質保証測定枚数（赤実線）および納入枚数（青実線）の推移（日本担当分）。青点線は量産開始当初の納入予定曲線を示す。

12.1 HL-LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発

2029 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に入る（High-Luminosity LHC）。劇的に増加するデータ量および放射線量に対応するため、現行 ATLAS 検出器に対する大幅なアップグレードが予定されており、SCT を含めた内部飛跡検出器は、新しいシリコン飛跡検出器である Inner Tracker (ITk) に置き換えられる。バレル部は全 9 層で構成され、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 もの体積をもつ世界最大級のシリコン飛跡検出器であり、2028 年の完成を目指していよいよシリコンセンサー量産、および実機シリコンモジュールの量産を開始するフェーズに入りつつある。筑波大では、主にシリコンストリップおよびシリコンピクセルセンサーの量産時性能評価、およびピクセルモジュールの量産に向けた準備を、国内外の大学および研究機関と協力しながら進めている。

12.1.1 シリコンストリップセンサー量産

2025 年までに、合計 20,100 枚の ITk 用シリコンストリップセンサーが量産される。この中で、日本グループは全体の約 3 割に相当する 6,350 枚のセンサーを担当し、筑波大は高エネルギー加速器研究機構と共同で

- シリコンセンサー全数に対する品質保証測定（形状測定およびストリップ特性測定）
- 性能テスト専用小型シリコンセンサー構造を用いた放射線耐性試験

を行ってきた。ストリップセンサーの量産は 2021 年 7 月に開始され、2022 年度までに 3,568 枚の生産を完了した（図 67）。2022 年度には、量産初期におけるセンサー品質検査の状況が、リソースやスループットの観点も含めて総合的にレビューされ、大きな問題がないことが確認された。ただし、2022 年初頭からストリップ間の分離が悪く、電氣的に導通してしまっているセンサーが頻繁に見つかるようになった。これはセンサー輸

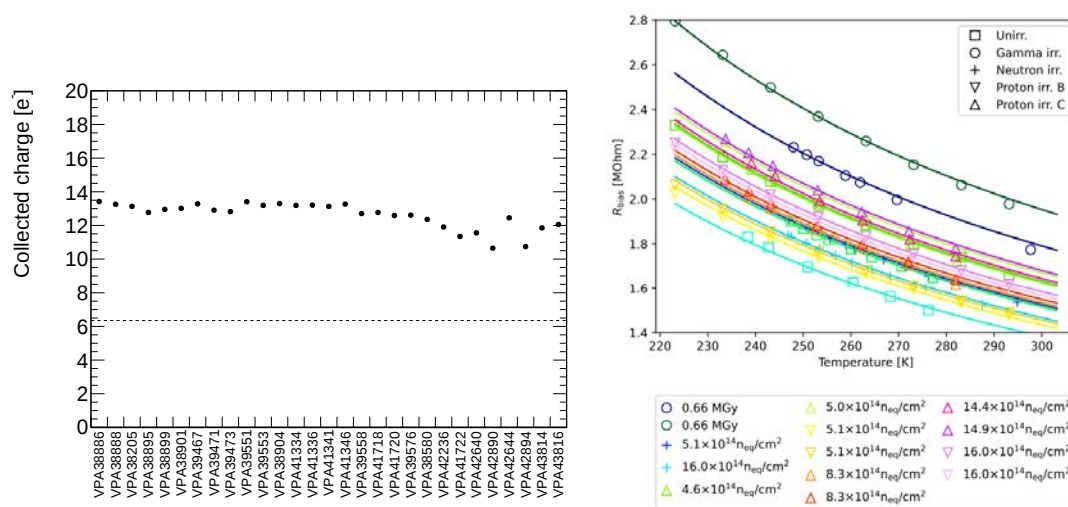


図 68 (左) 2022 年度に照射および測定したサンプルで得られた電荷収集量。VPA で始まる横軸のインデックスは、ストリップセンサーの製造バッチを示す。(右) バイアス抵抗の温度依存性測定結果。ガンマ線、中性子線、陽子線を照射した結果であり、特に“Proton irr. C”が、筑波大グループが中心となって照射実験を行った結果である。

送中に蓄積された静電気が、梱包を開封して治具を用いて引き上げる際、治具との接触部分でストリップ間を導通させてしまうということまで、原因として突き止められている。幸い、深紫外線やイオンガンを短時間照射することで、再び良好なストリップ間分離を得られるということがわかったが、この回復作業のため、各サイトにおける品質保証測定の作業負荷が増大している。本質的な解決には、輸送中の静電気対策が不可欠であり、現在センサー製造元の企業と協議中である。

放射線耐性試験については、2022 年 7 月と 2023 年 1 月の 2 回に分け、合計 69 枚のテスト構造に対して、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにおいて 70 MeV 陽子線の照射試験を行った。合計 8 個の測定項目のうち、特に荷電粒子検出効率に対して重要となる、電荷収集効率の測定結果を図 68 (左) に示した。照射前には 23,000 e^- 程度の電荷収集量があったが、照射後にはどのサンプルも 12,000 e^- 程度となっており、これは期待通りの結果である。サンプルごとのばらつきも概ね 10% 以内となっており、良い一様性も確認できた。

量産時品質保証のために大量のシリコンテスト構造に対する放射線照射を行うことを利用し、海外大学・研究機関とも協力しながら、より詳細なシリコンセンサーの放射線損傷に関する研究も行っている。例えば、図 68 (右) はバイアス抵抗値の温度依存性を、様々な放射線種および照射量において測定したものである。バイアス抵抗値の絶対値のばらつきは個体差として期待される程度のものであり、放射線損傷の程度や種類によらず、同様の温度依存性を示すことを確認した。

12.1.2 シリコンピクセルセンサー量産および試作モジュール性能評価

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）がシリコンピクセルセンサーの性能評価からモジュール製造までを一貫して担当する。特に 2022 年度は、ピクセルモジュールの各構成部品の試験量産あるいは本量産が本格的に始まる重要な 1 年となった。

ITk 用シリコンピクセルセンサーは、 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ のサイズに $50 \mu\text{m}$ 角のピクセルを形成した構造を持つ。そ

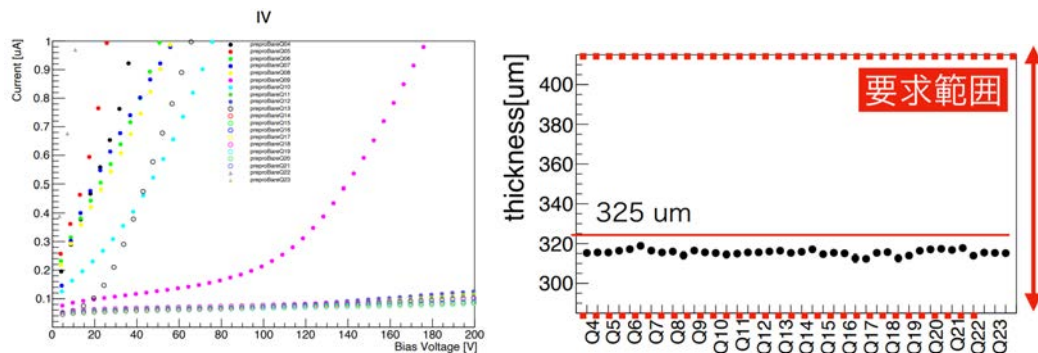


図 69 ベアモジュールの品質測定結果。(左) ベアモジュールの IV 測定結果。ブレイクダウン電圧が、別途測定した完全空乏化電圧（70 V 前後）からさらに +70 V 以上であることが要求されるが、いくつかのモジュールが早い段階でのブレイクダウンを示している。(右) ベアモジュールの厚さ測定結果。

ここに 2 cm 角の信号処理回路（ASIC）合計 4 枚を bumps bonding により貼り合わせる（フリップチップ）。この時点では、信号の読み出しや電源供給を行うためのフレキシブル基板が未装着のため、“ベアモジュール”と呼ばれる。ベアモジュール製造時、フリップチップ工程において不良があるとシリコンセンサーの特性を悪化させてしまう可能性があるため、ベアモジュールの電圧電流特性（IV 特性）を確認する必要がある。ただし、この時点ではピクセルセンサーへの電源供給に必要なフレキシブル基板が取り付けられていないため、そのままでは IV 特性を測定できない。そこで、プローバーを用いた IV 特性測定用セットアップを構築した。プローバーの用いる場合、ニードルとピクセルセンサーとの安定かつ安全な接触手順の策定や周辺温湿度のコントロールなど、大量のベアモジュールを系統的に試験するには様々な難しさを伴うが、試行錯誤の末に安定かつ迅速に IV 特性を測定可能なセットアップ及び測定手順を策定することができた。図 69（左）は最初の 1 ロット 20 個分のベアモジュールの測定結果を示す。ピクセルセンサーの時点では IV 特性が良好なもののみを選別してフリップチップを行ったのであるが、フリップチップ後は 9 個のベアモジュールについて、わずかなバイアス電圧を印加しただけで大きな漏れ電流が流れ、ブレイクダウンする傾向を示した。この結果はすぐに製造元にフィードバックし、次ロットからは良品率が大幅に向上した。

ベアモジュールおよびフレキシブル基板は、その形状に異状があると、両者を貼りあわせてモジュール化する際にうまく接着できなったり、モジュール化後の特性が悪くなったりする可能性があるため、その形状を正確に測定しておく。形状測定結果の一例として、試験量産されたベアモジュール全体の厚み測定結果（初期の 20 個分）を図 69（右）に示す。要求値は 235–365 μm であるが、実際には許容範囲に比べて十分に良い一様性が出ている。また、このときに表面の様子を写真撮影し、傷や汚れなどを記録することで、以後のピクセルモジュール製作過程で何か問題が見つかったとき、ベアモジュール時点での状態を確認できるようにする。形状測定および写真撮影の全工程で、1 ベアモジュール当たり 1 時間程度での測定を可能とした。

ベアモジュールおよびフレキシブル基板を接着し、ピクセルモジュールをつくる。2022 年度は、モジュールの試験量産を開始するための準備として、本番用と同等の機能を持った ASIC である ITkpix-v1 を用いたプロトタイプモジュールを複数製造し、その性能を詳細に試験した。ITk 用ピクセルモジュールにおける懸念事項の一つとして、使用中の温度変化などによりメカニカルな負荷がかかると bumps bonding 部がはがれてしまい、信号を読み出せなくなるという問題があった。これまでの研究で、モジュール完成後に高電圧の放電防止用として施されるパレンコーティングが、メカニカルな変形を抑制して bumps はがれを防ぐということがわかってきていた。2022 年度には、統計量を増やしてこの手法の有効性を検証するため、実機と同仕様

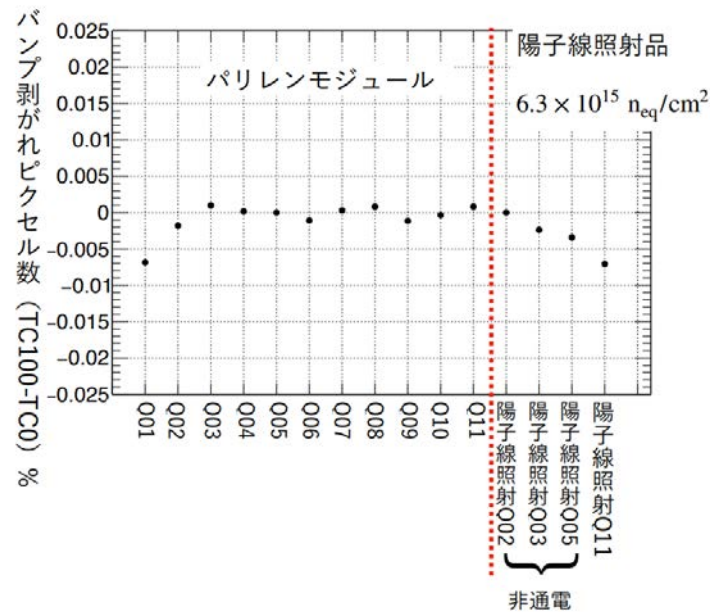


図 70 今回試作した 11 個のモジュールにおいて、熱サイクル 100 回終了後にパンプはがれピクセルと判定されたものの割合。Q02、Q03、Q05、Q11 の 4 モジュールに関しては、陽子照射後にさらに 100 回の熱サイクルを実施した後の結果を示す。

のモジュール 11 個を製造し、それらにシリコンコーティングを施した。これらに対して、実際の実験環境で想定されるものに対して、十分に保守的な実験となるよう、 -55°C から 60°C の温度変化を 100 サイクル以上にわたって与えながら、正しく信号を読み出せるピクセル数を計測した (図 70)。結果、11 個すべてのモジュールにおいて、パンプはがれピクセル数の有意な増加は見られず、シリコンコーティングの有効性を示すことができた。さらに、4 個のモジュールに対して、高輝度 LHC 実験期間中に想定される放射線量を与えたうえでさらに熱サイクルを継続したが、やはりパンプはがれピクセルは増加せず、シリコンコーティングが十分な放射線耐性を有することも確認した。この結果を受けてモジュールの設計が確定され、現在は 2023 年度の量産開始に向けた体制づくりが進んでいる。

さらに、筑波大グループは KEK グループと協力し、独自で ITk ピクセルモジュールのテストビームによる性能評価実験を、アメリカ・フェルミ国立加速器研究所で行った。この中では、120 GeV の高運動量で良質な陽子ビームを用い、有用なデータを取得することができた一方で、途中で検出器同士のタイミング同期がずれてしまうなど、DAQ 上の問題もわかり、これらは ITk ピクセル検出器の DAQ 開発チームにフィードバックした。データ解析は現在鋭意進行中であり、早期の結果公表を目指している。

12.2 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も飛躍的に向上する。LGAD では荷電粒子に対して 30 ps 程度の時間分解能が達成できる。高輝度 LHC

(HL-LHC) やさらに高輝度の加速器実験 (FCC 等) では、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成が要求されるので、時間情報に加え半導体検出器の優れた位置分解能を実現できれば、有効な検出器となると期待できる。

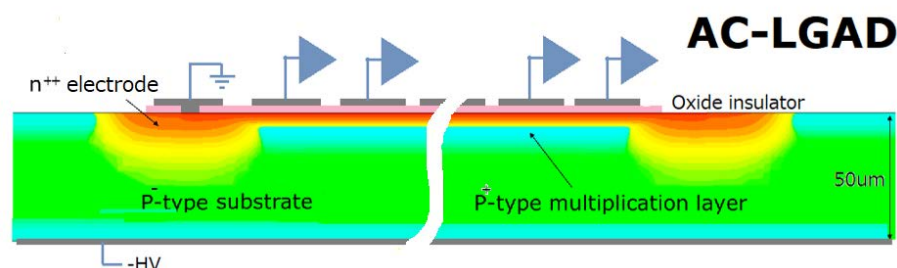


図 71 AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

LGAD を飛跡検出器とするためには電極の細分化が必要である。そのために、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・試作を 2019 年度から開始し、2022 年度には要求を満たすセンサーが実現できた。図 71 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すぎて位置情報を失う傾向になるが、低すぎると増幅が十分でなくなる。 n^+ 濃度、 p^+ 濃度、酸化膜厚をパラメータとして浜松ホトニクスで試作を実施し、 β 線や東北大 ELPH の電子ビーム、パルスレーザーを用いて評価を進めた。また、放射線耐性に関しても東北大 CYRIC の陽子線を通じて評価した。

n^+ 濃度と接合容量の組み合わせのうち表 6 で作成したピクセルセンサーの応答を ^{90}Sr の β 線を用いて評価した。E600 型のピクセルに対する応答を図 72 左に示す。 β 線が読み出し領域外を通過したノイズピークと信号分布がきれいに分離できている。図 72 右には、信号分布の最頻値 MPV を表 6 の全組み合わせに対して比較した。期待通り、大きな C_{cp} と n^+ 抵抗において MPV が最大になる。図 72 左から、信号波高はピクセルピッチにほとんど依らず、電極細分化が問題なく達成できている。

表 6 n^+ 抵抗と接合容量 C_{cp} の異なるサンプル例

n^+ 抵抗 [Ω/sq]	C_{cp} [pF/mm^2]		
	600	240	120
1600	E600	E240	E120
400	C600	C240	C120

80 μm ピッチで 10 mm 長の電極を配したストリップ型についても同様にベータ線に対する応答を評価した。図 73 左は連続する 16 チャンネルを読み出した際の最大信号の波高分布を示す。MPV はピクセルと比較すると約 1/3 であるが、これはストリップ電極の長さにより隣接チャンネルへのクロストーク量が無視できないためである。図 73 右は最大波高のチャンネルからの距離の関数としてクロストーク波高を比として示すもの (横軸単位は 80 μm) で、隣接には平均して 6 割が読み出される。このようにストリップでは複数チャンネル

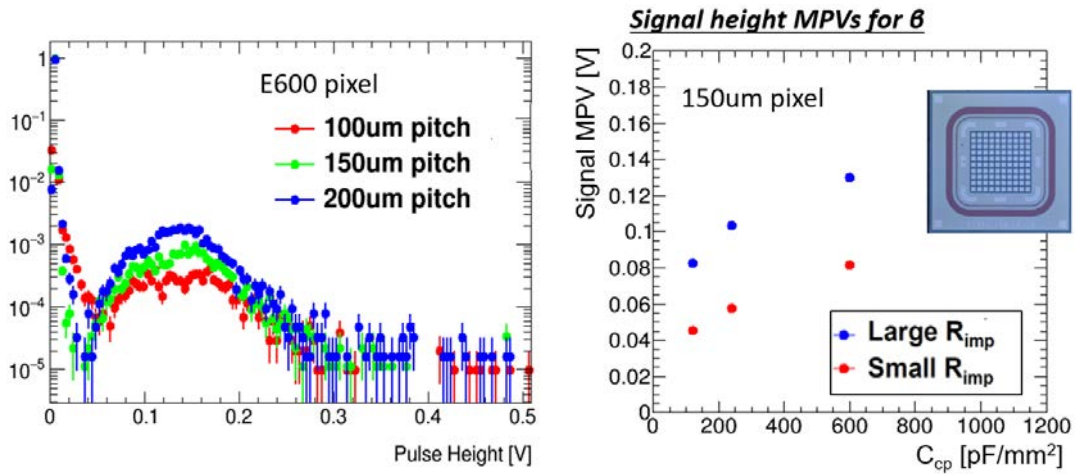


図 72 (左) E600 型のピクセルセンサーの β 線に対する波高分布。3 種類のピクセルピッチの比較。(右) 150 μm ピッチのピクセルセンサーでの波高分布の MPV を表の全組み合わせについて示す

ルに信号が分割されるが、左図のようにピクセルと同様に優れた信号分離が達成できている。

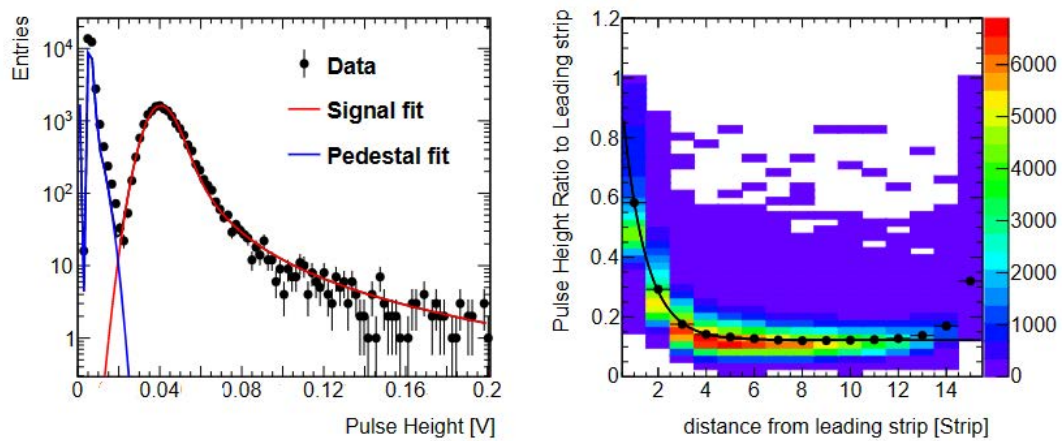


図 73 (左) E600 型のストリップセンサーの β 線に対する波高分布。(右) ストリップセンサーでのクロストークを最大波高チャンネルからの距離で示す (80 μm ピッチ)。

実際に異なるストリップ長のサンプルを用いて、MPV とクロストーク比 (= 両隣波高の和/最大波高) を測定した結果を図 74 に示す。ピクセルサイズ (100–200 μm) の長さになると、ピクセルと同等の信号と小さなクロストーク比が実現できている。

AC-LGAD の時間分解能を 500 μm 電極幅のセンサーに対して β 線と赤外パルスレーザーを用いて評価した。信号がある電圧に達するまでの時間精度が時間分解能であるが、これは主に 3 つの要素により決定される。(1) タイムウォーク (TW: 信号波高が小さいと到達時間が遅くなる)、(2) ジッター (ノイズにより波高がぶれると到達時間もぶれる)、(3) ランダウ (経路に沿って信号を生成する荷電粒子の場合、場所によって異なる信号量を生成する。増幅層までの距離で時間差が異なるので、この影響により信号波形 (= 到達時間) は事象ごとにふらつく)。TW は最大波高の一定割合の波高を基準電圧にとることでほぼ除外できる。赤

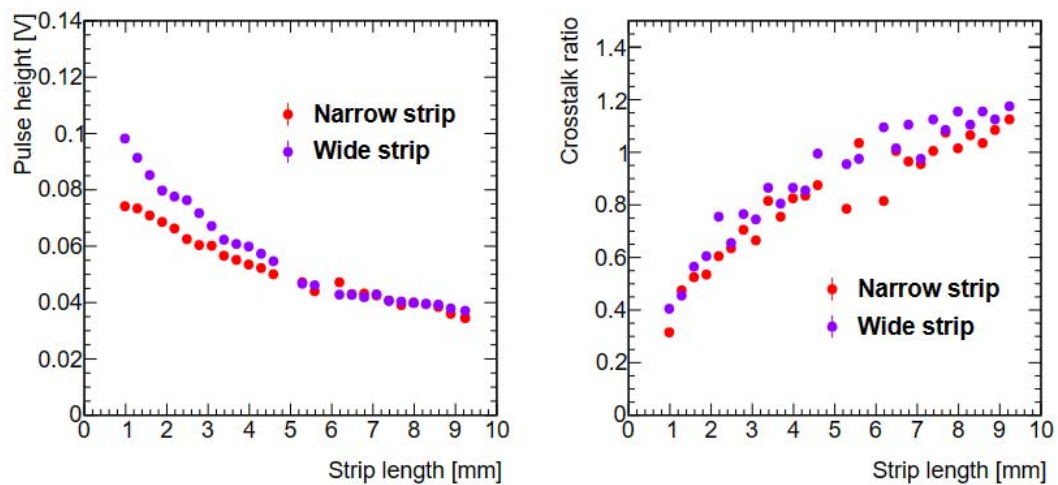


図 74 (左) E600 型のストリップセンサーの波高 MPV および (右) クロストーク比のストリップ長依存性。ストリップピッチ 80 μm に対して電極幅は Narrow で 40 μm 、Wide で 60 μm 。

外レーザーでは経路により発生信号量が一定なので、ジッター効果のみが時間分解能に影響する。また、ランダウはセンサーの厚みに依存する。

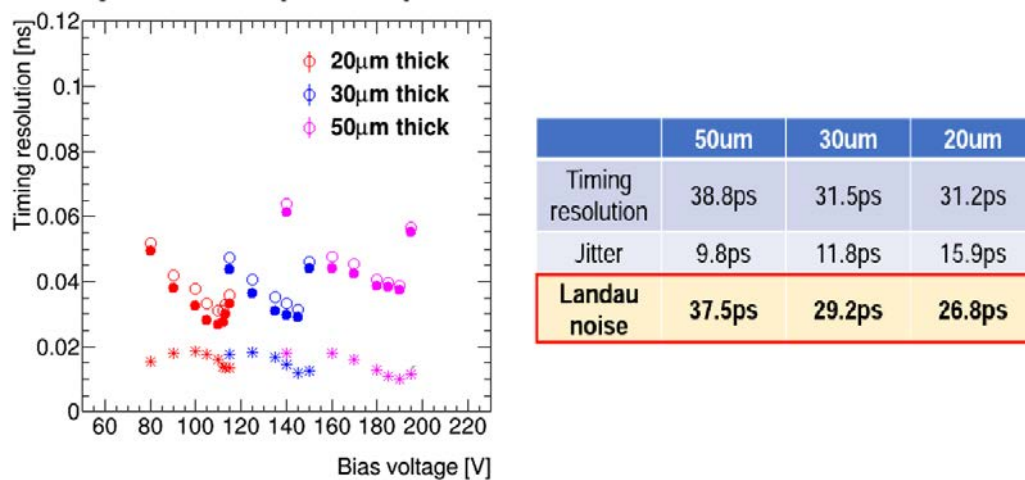


図 75 (左) 時間分解能のバイアス電圧依存性を 3 種類のセンサー厚で測定した。白抜き： β 線による測定、*：赤外レーザー、塗りつぶし：ランダウの効果を推定した値 (右) β 線による時間分解能が最小となる電圧での時間分解能、ジッター、ランダウによる寄与の各センサー厚での値。

図 75 左にはセンサー厚が標準の 50 μm に加え 30 μm と 20 μm の場合で測定した時間分解能のバイアス電圧依存性を示す。右表にはそれぞれの厚みでの最小の時間分解能をまとめるが、ジッターは赤外レーザーでの値から評価し、ランダウの影響は β 線と赤外レーザーでの測定値の差として求めた。信号の立ち上がりが速いほどジッターは小さく、信号量の多い 50 μm 厚が最小である。これに対して β 線に対する寄与はランダウが顕著であり、それは薄い 20 μm 厚が最小となる。

将来の加速器実験で用いるには検出器の放射線耐性は不可欠である。LGAD は増幅層である p^+ 不純物密度が照射により減少しその結果、増幅に必要なバイアス電荷が照射量に比例して増加する問題がある。海外の研究では、照射により格子からボロンが外れ非活性化することとそれらがウェハ内の酸素と結合してドナー準位を形成することを要因とした。実際に炭素を注入し酸素と結合させることで、放射線耐性の改善に成功している。実用にはさらなる耐性向上が必要である。浜松ホトニクスと協力し (1) 補償法 (ボロン除去は濃度を高くすると少なくなることが分かっているので、ボロン濃度を高くする。 p^+ 不純物密度を一定に保つためにリンも注入して補償させる試料)、(2) 部分活性ボロン法 (熱処理を調整することで最初に多めに注入したボロンの一部は非活性化させる。これらは酸素と結合するので照射により BO が増加することを防ぐ)。2つの方法による試料を CYRIC で $3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までの陽子線照射をしたところ、(1) は改善とならなかったが、(2) は極めて顕著な改善の初期評価結果を得た。今後は、より詳細に評価をし、炭素注入などもからめた改善法を研究する。

本研究は主に科研費および日米技術協力 (代表：中村) の資金を用い、米国のフェルミ研究所、LBL 研究所、UCSC 大学の研究員と連携しながら開発研究を推進してきた。

12.3 SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発

(原、山田)

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製する技術である。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きた。

12.3.1 KEK AR-TB に用いるトラッカー開発

SOI ピクセルセンサーの特長として高位置分解能と低物質量化が可能であることが挙げられる。KEK は 2022 年度に AR 蓄積リングに最大 5 GeV の電子ビームラインの運用を開始した。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。INTPIX4NA は $17 \mu\text{m}$ のピクセルサイズをもつ厚さ $300 \mu\text{m}$ の積分型 SOI センサーである。これを 32 mm 間隔に 5 台配置したトラッカーを製作した。2021 年度に、東北大 ELPH の $200 \sim 820 \text{ MeV}/c$ 陽電子ビームでトラッカー性能を評価したのに引き続き、AR-TB の $\sim 5 \text{ GeV}/c$ 運動量領域で性能評価した。

5 台のセンサーの内、1 台を試験用検出器 (DUT) と見なし、残りのセンサーで飛跡を再構成し DUT のヒット位置との残差をもとめる。多重散乱のために、台数を含めた飛跡再構成法は最小の残差を得るために重要で、ELPH での評価から DUT の直前 2 台と直後 1 台で飛跡を再構成する方式 (2*-1 法) は有効であることが分かっている。図 76 は 2*-1 法で評価した ELPH、AR-TB での残差の標準偏差の測定値を示す。 120 GeV 陽子のクーロン散乱の無視できる測定値と ELPH データを

$$\sigma_{\text{res}}(p) = \sqrt{\sigma_0^2 + (k/p)^2} \quad (6)$$

でフィットした関数も示した ($\sigma_0 = 1.92 \pm 0.19 \mu\text{m}$ 、 $k = 9, 25 \pm 0.09 \mu\text{m} \cdot \text{GeV}/c$)。データがこの関数で表

せられることは AR-TB や ELPH ではクーロン散乱の影響が支配的であることを示すが、AR-TB のデータはフィット関数よりやや上振れしている。

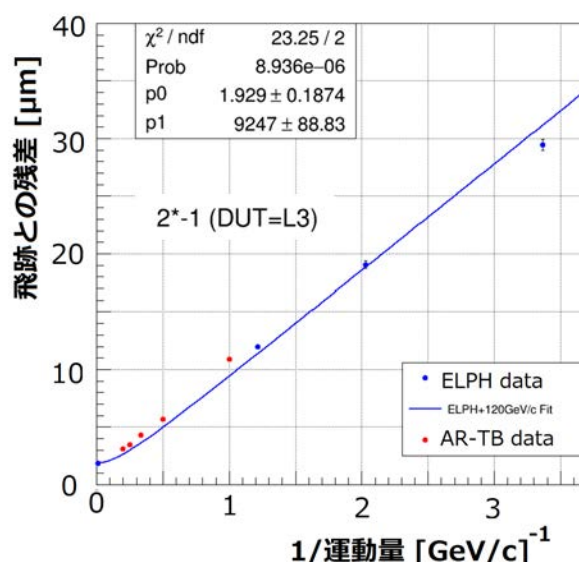


図 76 2*-1 法による再構成飛跡の残差分布の標準偏差を運動量逆数の関数で示した。曲線は ELPH と 120 GeV 陽子での測定値のフィット。

5 GeV/c 電子で 3 μm 程度の再構成精度 (DUT 自体の不確かさを含む) は世界最高位置分解能である。

再構成の際のさまざまな要素を検証をしたが、AR-TB データがフィット関数より上振れしていることは説明ができない。例えば、各センサーの位置合わせ精度は 1 μm 以内であり、1 GeV/c での 11 μm の測定値に有意な影響を与えない。3 台目と 4 台目の間に 4 mm 厚のアルミを挿入し、散乱角を求めることで運動量を評価した。図は 4 GeV/c に対する GEANT4 シミュレーションと AR-TB データとの比較である。散乱角の標準偏差は 1.11 ± 0.01 mrad, 1.38 ± 0.03 mrad と有意な差がある。ELPH の 820 MeV/c 電子に対しては両者は一致しているため、AR-TB の運動量絶対値にずれがあるものと思われる。

〈 競争的資金 〉

1. 科学研究費 研究活動スタート支援「高輝度 LHC における高精度ヒッグス粒子測定に向けたシリコン飛跡検出器開発」, 2020-2022 年度, 研究代表者: 廣瀬茂輝, 437 千円 (2022 年度)
2. 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, 分担者: 中村浩二, 3,120 千円 (直接経費 2,400 千円、間接経費 720 千円) (2022 年度)
3. 科学研究費 基盤研究 (B)「高時間分解能を実現する半導体検出器を用いた飛跡検出器の開発」, 2021 - 2023 年度, 研究代表者: 中村浩二, 分担者: 原和彦, 6,500 千円 (直接経費 5,000 千円、間接経費 1,500 千円) (2022 年度)
4. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型)「高時間分解能を実現する半導体検出器の開発と応用」, 2021 - 2022 年度, 研究代表者: 中村浩二, 5,720 千円 (直接経費 4,400 千円、間接経費 1,320 千円)

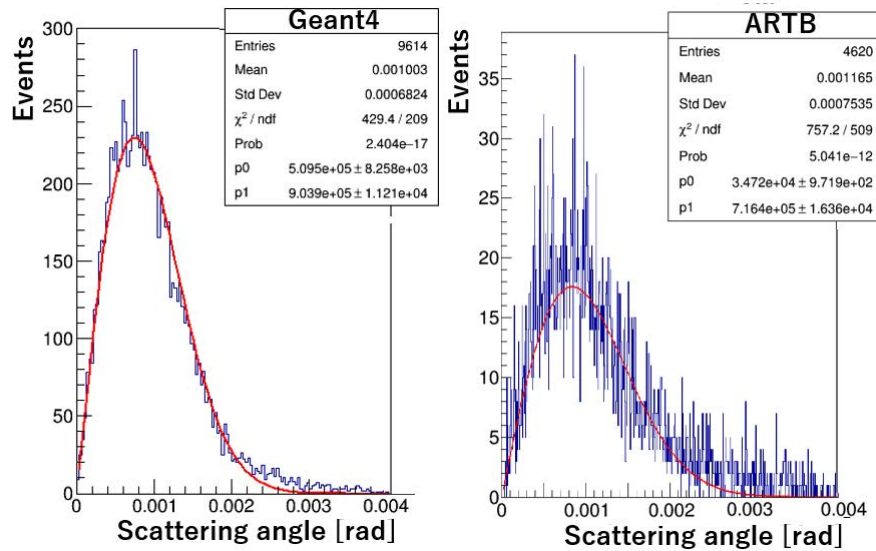


図 77 4 mm 厚のアルミを挿入した場合の上流 2 台、下流 2 台それぞれの飛跡の散乱角分布を 4 GeV/c で評価。(左) GEANT4、(右) AR-TB。

千円) (2022 年度)

5. 科学研究費 基盤研究 (A) 「Belle2 性能向上のための 3D 積層技術を用いた SOI ピクセルセンサーの開発」, 2019 - 2022 年度, 研究分担者: 山田美帆
6. 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」, 2022 年度, 研究代表: 中村浩二, 6,000 千円
7. 日仏素粒子物理学研究所事業, 「Development of precision timing silicon detector (LGAD) for future collider experiments」, 2022 年度, 研究代表: 中村浩二
8. 日仏素粒子物理学研究所事業, 「Monolithic Pixel Sensor Development for an Upgraded Belle II Vertex Detector」 2022 年度, 研究代表: 山田美帆, 400 千円

〈受賞〉

1. 北彩友海、2022 年秋の日本物理学会学生優秀発表賞 (素粒子実験領域) を受賞

〈論文〉

(査読論文)

1. P. Allport, *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Nakamura, K. Saito), “Pre-production results from ATLAS ITk Strip Sensors Quality Assurance Testchip”, JINST **17**, C11002 (2022).
2. M. Mikestikova, *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Nakamura), ATLAS ITk strip sensor quality control procedures and testing site qualification, JINST **17**, C12013 (2023).
3. D. Rouso, *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Nakamura, K. Saito), “Test and extraction methods for the QC parameters of silicon strip sensors for ATLAS upgrade tracker”, Nucl. Instrum.

- Methods Phys. Res. A **1045**, 167608 (2023).
4. Y. Unno *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, K. Nakamura), “Specifications and pre-production of n^+ -in-p large-format strip sensors fabricated in 6-inch silicon wafers, ATLAS18, for the Inner Tracker of the ATLAS Detector for High-Luminosity Large Hadron Collider”, JINST **18**, T03008 (2023).
 5. S. Kita, *et al.*, (I. Goya, K. Nakamura, K. Hara), “Optimization of capacitively coupled Low Gain Avalanche Diode (AC-LGAD) sensors for precise time and spatial resolution”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1048**, 168009 (2023).
 6. R. Heller, *et al.*, (I. Goya, K. Hara, S. Kita, K. Nakamura), “Characterization of BNL and HPK AC-LGAD sensors with a 120 GeV proton beam”, JINST **17** (2022) P05001.
 7. O.Jennifer, *et al.*, (I. Goya, K. Hara, S. Kita, K. Nakamura), “Investigation of signal characteristics and charge sharing in AC-LGADs with laser and test beam measurements”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1045**, 167541 (2023).
 8. H. Suzuki, T. Omori, K. Hara, H. Yamauchi, M. Yamada, *et al.*, “Precision beam telescope based on SOI pixel sensor technology for electrons in the energy range of sub-GeV to GeV”, PTEP 2022-10, 103C01 (2022).

〈学会発表〉

(国内)

1. 比江森友太：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの試作量産品における放射線耐性評価,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大
2. 柳瀬健太郎：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの放射線耐性評価のための冷却システムの開発とその自動制御方法の確立,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大
3. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産時品質保証に向けた 3 次元測定システムの開発と測定精度の検証,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大
4. 石井達也：高輝度 LHC ATLAS 実験シリコンストリップセンサーの実機量産中の品質評価,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大
5. 飯坂俊介：HL-LHC ATLAS 実験に用いるピクセルセンサーの量産に向けた放射線照射前後での性能評価,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
6. 熊倉泰成：HL-LHC ATLAS 実験に向けたピクセルモジュールの信号遅延時間の測定およびそれを考慮した閾値の測定手法の確立,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
7. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュールの形状測定の精度と試験量産品の品質評価,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
8. 鈴木尚紀：LHC-ATLAS 実験におけるシリコンストリップ検出器の TCAD シミュレーションによる放射線損傷の見積もり,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン

9. 比江森友太：ワイヤ保護機構を搭載した HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの熱サイクル耐性評価,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
10. 原和彦：時間分解能にも優れた高位置分解能 半導体飛跡検出器 AC-LGAD の開発 — 4 D 飛跡検出器, 第 1 回 TIA 光・量子計測 MG 研究会 (招待講演) (2022 年 9 月 1 日), KEK
11. 北彩友海：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の電極細密化に関する研究 ,
日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月 6-8 日), 岡山理科大
12. 北彩友海：新型 LGAD 飛跡検出器 (AC-LGAD) の電極細密化と時間分解能の研究 ,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
13. 今村友香：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性の研究 ,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
14. 中村浩二：Study of granularity for pixel type AC-LGAD detector, 宇宙史研究センター 2022 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2022 年 6 月 24 日), 筑波大
15. 大森匠：電荷積分型 SOI ピクセル検出器 INTPIX4NA を用いたテレスコープシステムの 1-5GeV 電子ビームによる性能評価 ,
日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月 22-25 日), オンライン
16. 中村浩二：AC-LGAD 検出器の開発, 宇宙史研究センター 2022 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2022 年 11 月 28 日), 筑波大
17. 原和彦：Vertex2022 を終えて, 宇宙史研究センター 2022 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2022 年 11 月 28 日), 筑波大
18. 熊倉泰成：HL-LHC 実験に向けたピクセルモジュールの信号遅延時間の測定およびそれを考慮した閾値の測定手法の確率, 宇宙史研究センター素粒子構造研究部門シンポジウム (2023 年 3 月 16 日), 筑波大
19. 大森匠：Performance evaluation of telescope system with SOI pixel sensors by 1-5 GeV/c electron beam, 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム (2023 年 3 月 17 日), 筑波大
20. 北彩友海：Recent results of timing resolution and radiation tolerance of finely segmented LGAD sensor (AC-LGAD), 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム (2023 年 3 月 17 日), 筑波大
21. 鈴木尚紀：Impact of radiation damage on SCT during Run3 operation estimated with TCAD simulation, 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム (2023 年 3 月 17 日), 筑波大
22. 廣瀬茂輝：Progress on productin of silicon strip sensors for HL-LHC ATLAS ITk, 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム (2023 年 3 月 17 日), 筑波大
23. 中村浩二：Preparation of pixel module production for the HL-LHC ATLASITk , 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム (2023 年 3 月 17 日), 筑波大
24. 原和彦：CDF での W ボゾン質量の精密測定, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2022 (2022 年 8 月 29 日-9 月 2 日), 京都大学

(国際会議・研究会)

1. Shigeki Hirose, “ATLAS ITk strip sensor quality assurance tests and results of ATLAS18 pre-production sensors”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct.2022, Tateyama, Japan.
2. Sayuka Kita, “Development of AC-LGAD detector with finer pitch electrodes for high energy

physics experiment”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct.2022, Tateyama, Japan.

3. Kazuhiko Hara, “Welcome to Vertex2022”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct.2022, Tateyama, Japan.
4. Kazuhiko Hara, “Summary Talk”, The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022), 24-28 Oct.2022, Tateyama, Japan.
5. Miho Yamada, “SOI based vertex detector for a collider experiment”, 10th International Workshop on Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2022), 12-16 Dec.2022, La Fonda Hotel, USA..
6. Kazuhiko Hara, “Improvement of timing resolution and radiation tolerance for finely segmented AC-LGAD sensors”, 19th “Trento” workshop on advanced silicon radiation detectors (TRED2023), 28 Feb.-2 Mar. 2023.

(国際会議の企画)

1. 原和彦 (Local Organizing Committee Chair)、中村浩二 (Local Organizing Committee) : The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022) 24-28 Oct.2022, Tateyama, Japan.

(筑波大学公開講座「宇宙の歴史」)

1. 原和彦：素粒子の質量とヒッグス粒子.

第 III 部

資料

13 センター細則

○国立大学法人筑波大学宇宙史研究センター細則

〔平成29年10月13日〕
数理物質系部局細則第4号

改正 平成30年数理物質系部局細則第1号

国立大学法人筑波大学宇宙史研究センター細則

(趣旨)

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

(目的)

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

(組織)

第3条 前条の目的達成のため、センターに研究組織及び研究支援組織を置く。

2 研究組織に次の部門を置く。

- (1) 南極天文学研究部門
- (2) 素粒子構造研究部門
- (3) クォーク・核物質研究部門
- (4) 光量子計測器開発部門

3 前項の部門間における連携並びに学内外連携に関し調整を図るため、融合研究企画調整室を置く。

4 第2項の部門に、当該部門における事業について総括整理させるため、部門長を置く。

5 第3項の融合研究企画調整室に、室を主宰する室長を置く。

6 部門長及び室長の任期は、2年とし、再任を妨げない。

7 研究組織及び研究支援組織に関し必要な事項は、センター長が別に定める。

(構成員)

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

(副センター長)

第5条 センターに副センター長を置くことができる。

2 副センター長は、センター長の職務を助け、センター長に事故あるときは、その職務を代理する。

3 副センター長の任期は、2年とし、再任を妨げない。ただし、任期の途中で欠員となった場合の後任の任期は、前任者の残任期間とする。

4 副センター長は、センター構成員からセンター長が指名する者とする。

(運営協議会)

第6条 センターに基本規則第52条に定める運営協議会として、センター運営協議会（以下「協議会」という。）を置き、センターの運営の大綱に関し、次に掲げる事項を協議するものとする。

- （1）運営の方針に関すること。
- （2）研究活動等の評価に関すること。
- （3）その他協議会委員長が必要と認める事項

第7条 協議会は、次に掲げる委員で組織する。

- （1）センター長
 - （2）副センター長
 - （3）各部門長
 - （4）数理物質系長
 - （5）国立大学法人筑波大学の職員以外の学識経験者 若干人
 - （6）その他センター長が推薦する本学の大学教員 若干人
- 2 センター長は、前項第6号の委員の選出に当たっては、当該大学教員の所属長の了承を得るものとする。
- 3 協議会に委員長を置き、委員の互選により選出する。

（運営委員会）

第8条 センターに、基本規則第53条に定める運営委員会として、センター運営委員会（以下「委員会」という。）を置き、センターの運営に関し、次に掲げる事項を審議するものとする。

- （1）事業計画に関すること。
- （2）予算に関すること。
- （3）施設の管理に関すること。
- （4）その他センター長が必要と認める事項

第9条 委員会は、次に掲げる委員で組織する。

- （1）センター長
 - （2）副センター長
 - （3）各部門長
 - （4）その他センター長が指名する者
- 2 センター長は、前項第4号の委員の選出に当たっては、当該大学教員の所属長の了承を得るものとする。
- 3 委員会に委員長を置き、センター長をもって充てる。
- 4 委員長は、委員会を主宰する。
- 5 委員長に事故があるときは、あらかじめ委員長の指名する委員がその職務を代行する。
- 6 委員会は、過半数の委員が出席しなければ、議事を開き、議決することができない。
- 7 委員会の議事は、出席した委員の過半数をもって決し、可否同数のときは、委員長の決するところによる。

（任期）

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

(事務)

第11条 センターに関する事務は、数理物質エリア支援室が行う。

(雑則)

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

附 則

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

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

附 則

この部局細則は、平成30年4月1日から施行する。

14 ロゴ

宇宙史研究センター（朝永センター）のロゴを図78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）。

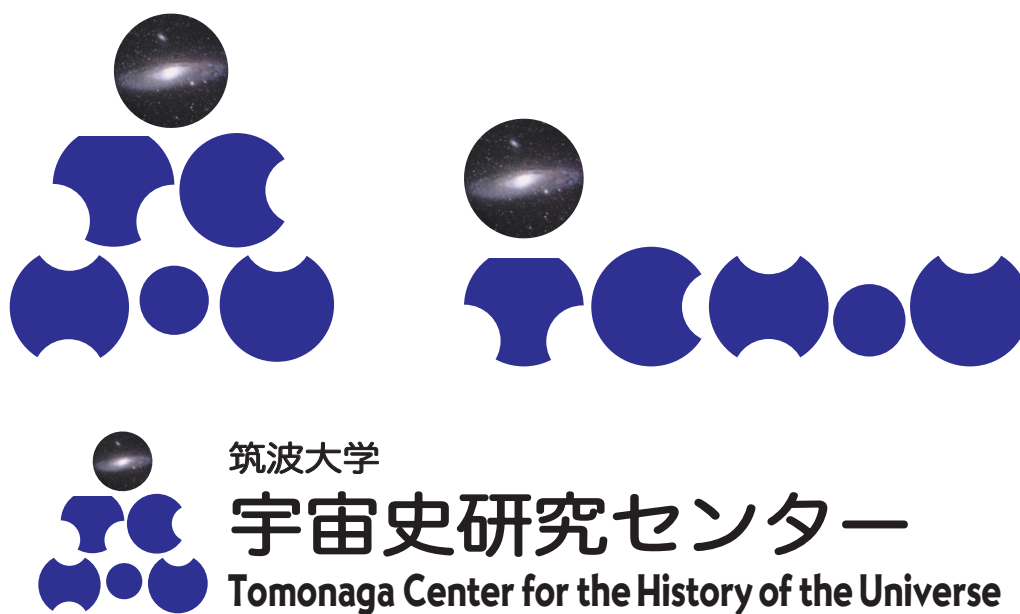


図 78 宇宙史研究センター（朝永センター）のロゴとロゴタイプ

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)
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	¥1,500,000
助教	橋本拓也		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	ジェームズズウェッブ宇宙望遠鏡とアルマ望遠鏡で明らかにする超遠方銀河の性質	¥5,330,000
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	¥2,000,000
助教	本多俊介	服部 誠	科研費補助金・学術研究助成金	国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))	原始重力波の発見を目指す-ミリ波の広帯域観測で理解して分離する CMB と星間塵	¥1,000,000
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)	異分野連携で挑む革新的水シンチレータ技術の実現	¥1,170,000
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)	PIKACHU 実験によるガドリニウム160 の二重ベータ崩壊の研究	¥3,250,000
助教	飯田崇史		その他	公益財団法人島津科学技術振興財団/研究開発助成(領域全般)	無機シンチレータでの発光波長と応答波形を用いた粒子識別技術の開拓	¥1,000,000
助教	飯田崇史		その他	公益財団法人旭硝子財団/物理・情報研究奨励	材料科学・機械学習との融合による新しいシンチレーション検出器と粒子識別	¥1,900,000
助教	飯田崇史		その他	公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団/コニカミノルタ画像科学奨励賞	放射線粒子の色を見る！ 革新的シンチレーション検出器の開発	¥500,000
教授	受川史彦	花垣 和則	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究計画研究	手法の開拓	¥200,000
准教授	武内勇司		科研費補助金・学術研究助成金	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	¥5,070,000
教授	石橋延幸		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	超弦の場の理論を用いた超弦理論のダイナミクスの研究	¥650,000
准教授	伊敷吾郎		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	行列模型による超弦理論の非摂動的定式化の研究	¥1,300,000
教授	藏増嘉伸		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(A)	テンソルネットワーク法による計算物理学の新展開	¥11,900,000
教授	金谷和至		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	グラジエントフローによるクォーク・ハドロン物質の熱力学	¥1,040,000
准教授	笹公和		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的研究(萌芽)	長半減期放射性セシウム135を加速器質量分析法により超高感度で検出する試み	¥1,100,000
准教授	笹公和		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	加速器質量分析法による人為起源ヨウ素129の評価方法の確立と環境移行過程の解明	¥5,200,000
准教授	笹公和	三宅 美沙	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(S)	過去1万年間の太陽活動	¥1,000,000
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と宇宙線イベントの解明	¥250,000
准教授	笹公和		その他	高エネルギー加速器研究機構加速器科学国際育成事業	VR技術で見るタンデム加速器	¥400,000
准教授	笹公和		その他	金沢大学環日本海地域環境研究センター共同研究(一般)	人為起源放射性ヨウ素 129 をトレーサーとした南大洋における海水循環	¥180,000
助教	森口哲朗	山口貴之	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(A)	エキゾチック核の励起状態の構造解明に向けた革新的な蓄積リング法の開拓	¥1,500,000
助教	森口哲朗		科研費補助金・学術研究助成金	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ピン厚測定	¥400,000
教授	江角晋一		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(S)	高次ゆらぎと粒子相関による高密度クォーク核物質の1次相転移と臨界点観測への挑戦	¥19,760,000
助教	新井田貴文		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	超高温高密度下における宇宙暴速渦とスピン偏極メカニズムの解明	¥1,100,000
講師	中條達也		科研費補助金・学術研究助成金	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	¥113,970,000
講師	中條達也		共同研究	TYL-FJPPL 事業(KEK-CNRS)	QGP Tomography with photons, jets, and heavy flavors	¥530,000
講師	中條達也	後藤雄二	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(A)	RHIC 偏極陽子衝突による超前方領域での粒子生成の起源の研究・解明	¥530,000
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	¥900,000
準研	廣瀬茂輝		科研費補助金・学術研究助成金	研究活動スタート支援	高輝度 LHC における高精度ヒッグス粒子測定に向けたシリコン飛跡検出器開発	¥437,000
准教授	原和彦		科研費補助金・学術研究助成金	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	¥3,120,000
准教授	原和彦	中村浩二	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	高時間分解能を実現する半導体検出器を用いた飛跡検出器の開発	¥6,500,000

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	
教授	江角晋一	GSI重イオン研究所(ドイツ)		2021~	FAIR-CBM実験、高密度クォーク・核物質研究	
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	日米科学技術協力	¥5,000,000	2021~	Development of precision timing silicon detectors for future high energy collider experiments	
准教授	原和彦/ 中村浩二(KEK)	Reisaburo Tanaka (LAL)	¥500,000	2019~2024	New Challenge for Internal Pixel Tracker construction	FJPL

17 各種受賞等

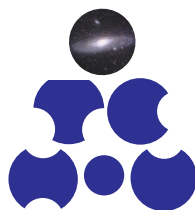
職名	構成員名	(共同の場合) 共同受賞者名	賞名	受賞課題・受賞論文名	受賞年・月・日	団体名	追記事項
助教	野中俊宏		2022 年八木浩輔クォークマターアワード	素粒子実験半導体センサーの発展とその社会貢献	2022.4	理研数理創造プログラム	
その他	浦 遼太		特別公開 最優秀ポスター発表賞		2022.7	国立天文台野辺山電波観測所	大学院生(M2)
その他	北彩友海		日本物理学会学生優秀発表賞	新型LGAD検出器(AC-LGAD)の電極細密化に関する研究	2022.10.14	日本物理学会	
助教	飯田崇史		2022年度 コニカミノルタ画像科学奨励賞	放射線粒子の色を見る！革新的シンチレーション検出器の開発	2023.3.1	コニカミノルタ科学技術振興財団	
助教	飯田崇史		2023年 日本アイソトープ協会奨励賞	48Caの極稀崩壊研究のための検出システムの高度化	2023.3.3	日本アイソトープ協会	
その他	浦 遼太		理工学群長賞		2023.3	筑波大学	大学院生(M2)
その他	浜田佳澄		物理学類卒業研究ベストプレゼンテーション賞		2023.3	筑波大学	学部4年生
その他	犬飼泰地		校友会賞		2023.3	筑波大学	

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
助教	本多俊介		NHK	サラメシ出演	2022年6月30日
教授	受川史彦	武内勇司, 原和彦, 佐藤構二, 金信弘, 他 CDF collaboration	ニュートン読売新聞, AP 通信, BBC, NHK(4 月 25 日) 等	CDF 実験グループが, 基本粒子 W ボソンの質量をかつてない精度で測定	2022年4月
助教	飯田崇史		TSUKUBA JOURNAL	シンチレーション光の波長情報による放射線粒子の識別に成功 ～高精度な放射線検出の可能性～	2023年2月8日

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	追記事項
教授	久野成夫	コンプライアンス委員会委員	日本天文学会	2021.6－	
教授	久野成夫	プロジェクト評価(先端技術センター)外部評価委員	国立天文台	2022.1－2022.6	
教授	久野成夫	J小委員会/委員長	国際電波科学連合URSI日本国内委員会	2021.4－	
教授	久野成夫	電波天文将来計画検討ワーキング・グループ委員	宇宙電波懇談会	2021.6－	
教授	石橋延幸	PTEP 執行編集委員	日本物理学会・理論物理学刊行会		
教授	石橋延幸	PTEP 編集委員	日本物理学会・理論物理学刊行会	2014.4－	
教授	石橋延幸	素粒子論領域副代表	日本物理学会		



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