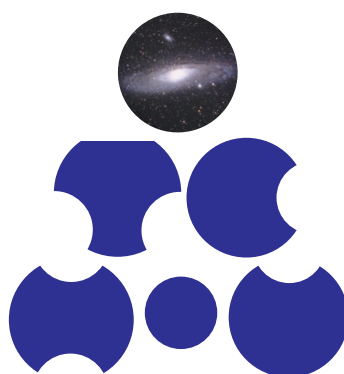


筑波大学 数理物質系
宇宙史研究センター

2021 年度
活動報告書



宇宙史研究センター

2022 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。宇宙史研究センターはまだまだ発展途上であり、宇宙史の統一的理解のためにさらなる研究力の向上が望まれます。これらの特色ある研究によって大きな成果をあげていき、将来的には分野間の交流を促進することで、宇宙史理解の鍵となるような新たな学問分野の創出を目指し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、2020 年度の活動実績をまとめたものです。昨年度に続き 2021 年度も新型コロナウイルスのため活動が大きく制限されることになりましたが、少しずつ例年の状態に近づきつつあります。難しい状況の中で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。

2022 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	2021 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	10
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
4.1	原 和彦准教授 令和 3 年度文部科学大臣表彰科学技術賞受賞 (2021/4)	13
4.2	橋本拓也助教 令和 3 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞 (2021/4)	13
4.3	原 和彦准教授 学長表彰 (2021/6)	13
4.4	橋本拓也助教 学長表彰および筑波大学若手教員特別奨励賞受賞 (2021/6)	14
4.5	橋本拓也助教 2021 年度日本天文学会欧文研究報告論文賞受賞 (2022/3)	14
5	各種会議	16
5.1	構成員会議	16
5.2	運営協議会	17
5.3	運営委員会	19
6	研究集会・セミナー	20
6.1	QCD 相転移や QGP 生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験共同研究会	20
6.2	Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2021 「宇宙の進化と物質の起源」	20
6.3	極地研研究集会「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」	21
6.4	TCHoU ワークショップ	21
6.5	宇宙史セミナー	21

7	一般向け広報活動	22
7.1	第12回天文学宇宙の七夕講演会	22
7.2	筑波大学学園祭「雙峰祭」におけるオンライン展示「宇宙史探訪」	23
8	2021年度会計報告	24
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)	37
11	クォーク・核物質研究部門 (Division of Quark Nuclear Matters)	62
12	光子計測器開発部門 (Division of Photon and Particle Detectors)	109
第III部 資料		123
13	センター細則	125
14	ロゴ	127
15	競争的資金獲得状況	128
16	共同研究・受託研究	129
17	各種受賞等	129
18	新聞等報道・特記事項	130
19	学会活動・各種委員等	130

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

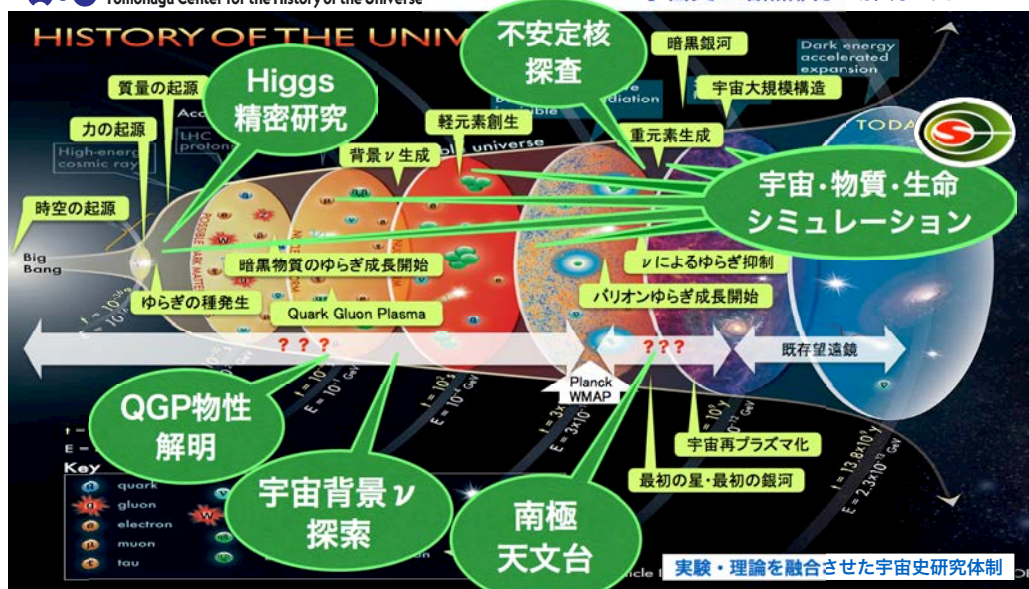
筑波大学宇宙史研究センター（Tomonaga Center for the History of the Universe: 朝永センター）は、2016年の筑波大学第3期中期計画・中期目標にむけた構想に従って2017年に行われた筑波大学数理物質系に属する二つ研究センター（学際物質科学研究センターと数理物質融合科学センター）の改組再編に基づき、数理物質融合科学センター（Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering: CiRfSE「サーフス」）の宇宙史国際研究拠点と光量子計測器開発推進室を核として、2017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スモシミュレータ計画が学術会議マスタープラン2017に採択、4つは筑波大が中核機関

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

図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

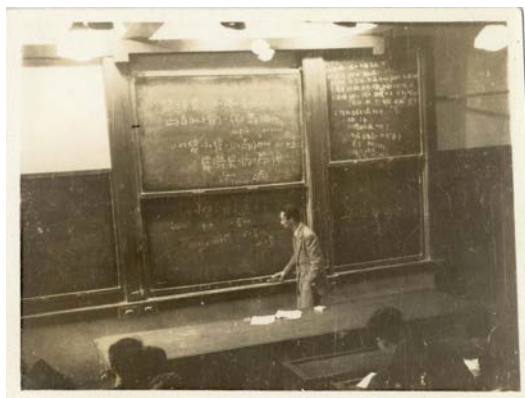


図2 朝永振一郎博士(1906-1979)。右は、東京教育大学理学部(大塚)での量子力学の講義、1960年頃。(写真:筑波大学朝永記念室蔵)

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

源を探求するために、ヒッグス粒子の精密研究や、超弦理論の研究などを推進する。また、ビッグバンから数秒後に生成されたと考えられている宇宙背景ニュートリノの発見に向けたロケット・衛星実験プロジェクトを推進する。

クォーク・核物質研究部門 – Division of Quark Nuclear Matters ハドロンや重い元素の起源を理解するために、ビッグバンから1万分の1秒程度に起こったと考えられているクォーク物質から核物質への相転移や、不安定核の反応プロセスを解明する。そのために、大型実験や格子QCDシミュレーションを推進する。

南極天文学研究部門（南極天文台） – Division of Antarctic Astronomy (Antarctic Observatory of Astronomy) ビッグバンから数億年後に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。

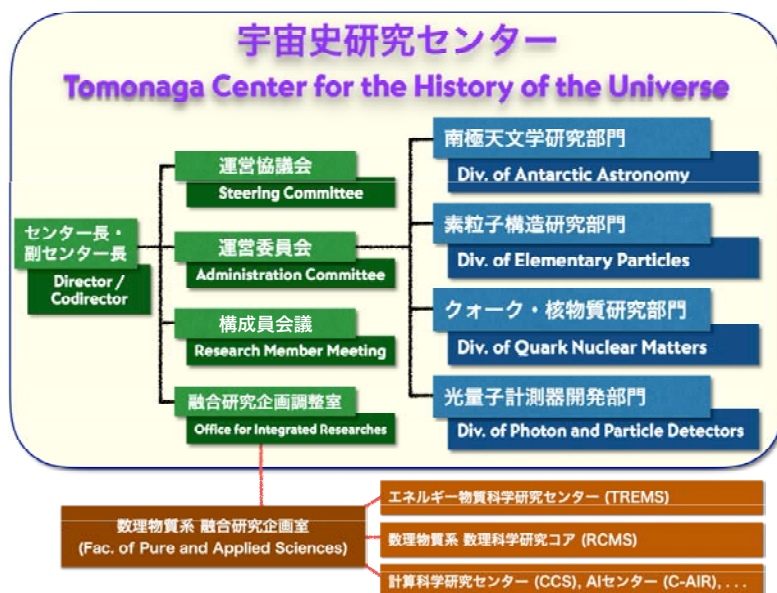


図4 宇宙史研究センターの運営体制

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。

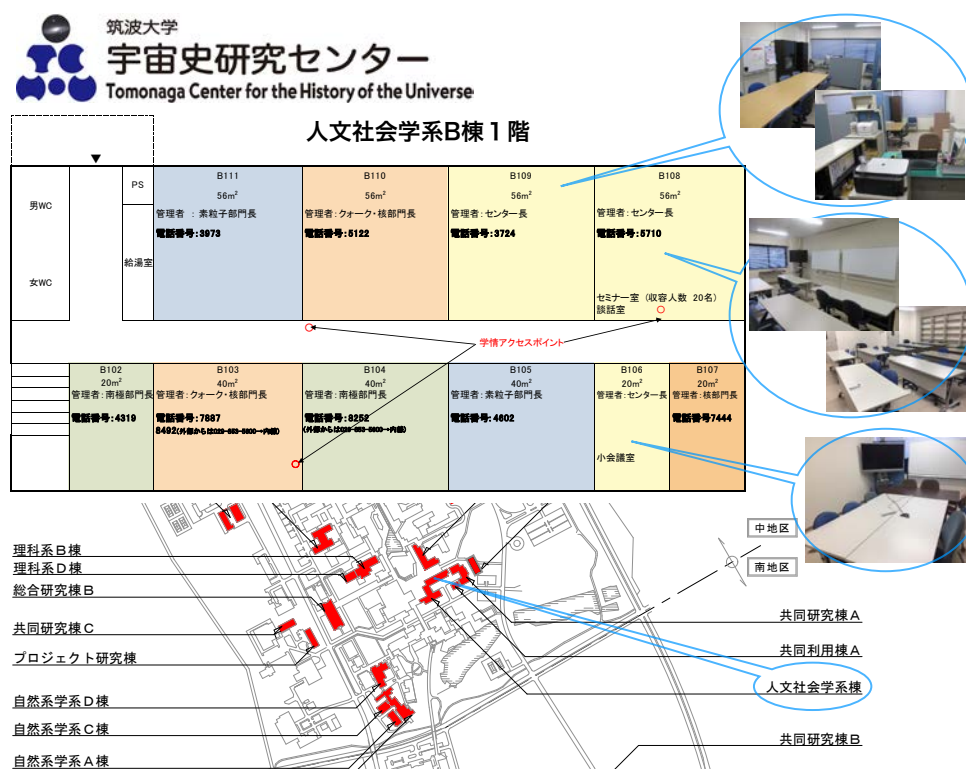


図 5 宇宙史研究センター活動スペース

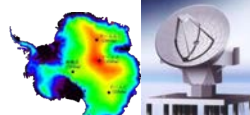
2 2021 年度活動概要

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 2021 年度活動概要を、以下にまとめる。

➤各研究部門の活動

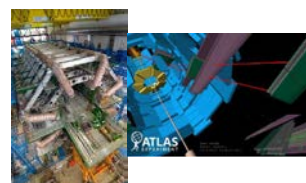
・南極天文学研究部門

- ・ 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

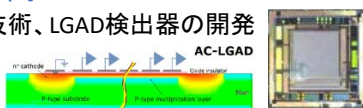


・クォーク・核物質研究部門

- ・ 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

- ・ 新田冬夢 助教 2021/11/30 退職
- ・ 浅野侑磨 助教 2021/10 構成員として素粒子構造研究部門に参加

➤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 2021年6月25日（全体報告＋11講演） オンライン
 - ・ 第2回 2021年11月26日（全体報告＋11講演） オンライン

➤運営委員会

- ・ センターの事業計画、予算、施設の管理、などに関することを審議・決定
- ・ 毎月1回開催（8月を除く） オンライン
 - ・ 2021年度 4/12, 5/17, 6/14, 7/19, 9/13, 10/11, 11/8, 12/13, 1/11, 2/14, 3/10

➤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 2022年3月18日 オンライン

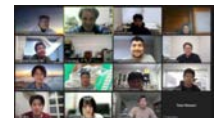
➤宇宙史セミナー（オンライン）

- 2021/11/12 北野龍一郎 教授(KEK素粒子原子核研究所)“Stochastic computation of $g-2$ in QED”
- 2022/2/25 松尾宏 准教授(国立天文台)“Far-infrared intensity interferometry for future space mission”
- 2022/3/2 板倉数記 教授(長崎総合科学大学)“高エネルギー極限からみた相対論的重イオン衝突の物理”



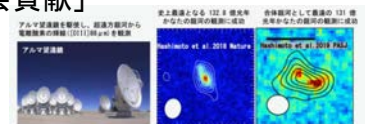
➤研究集会

- 2021/9/11 Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2021, “Universe Evolution and Matter Origin”
 - オンライン、参加者60名
- 2021/9/24 QCD相転移やQGP生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験共同研究会
 - オンライン、参加者 65名
- 2022/3/14 極地研研究集会「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」
 - 国立極地研究所+オンライン、参加者 48名
- 2022/3/16-24 TCHoHワークショップ @オンライン
 - 南極天文 3/16、素粒子構造 3/23、クォーク核物質 3/24、光量子 3/22



➤受賞など

- 2021/4/6 原 和彦 准教授
文部科学大臣表彰 科学技術賞
「素粒子実験半導体センサーの発展とその社会貢献」
- 2021/4/6 橋本拓也 助教
文部科学大臣表彰 若手科学者賞
「電離炭素の輝線を用いた様々な最遠方銀河の観測的研究」
- 2021/6/9 原 和彦准教授、橋本拓也助教
筑波大学学長表彰
- 2022/2/7 中條達也 講師
筑波大学 BEST FACULTY MEMBER
- 2022/3 渡辺展正(D3)
筑波大学大学院数理物質科学研究科研究科長賞
- 2022/3 菅野 聡(M2)
筑波大学物理学学位プログラムリーダー賞



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。2021 年度当初の構成教員・連携教員を図 6 に、2022 年度当初の構成教員・連携教員を図 7 に、それぞれ示す。新田冬夢助教が 2021 年 11 月で退職した。浅野侑磨助教が 2021 年 10 月から素粒子構造研究部門に加わった。2021 年度の研究員を表 1 に示す。

TCHoU 構成教員・連携教員・研究員

センター長：久野成夫(p) 副センター長：受川史彦(p)

南極天文学研究部門 部門長：久野成夫(p)

構成教員：新田冬夢(a)、橋本拓也(a)、俣徠和夫(apCA:北大)

連携教員：中井直正(p:関西学院大)、瀬田益道(p:関西学院大)、梅村雅之(p)、笠井康子(p客員:NICT)、西堀俊幸(ap客員:JAXA)、渡邊祥正(ap:芝浦工大)

研究員：高水裕一(CCS)、齋藤弘雄、Salak Dragan

素粒子構造研究部門 部門長：武内勇司(ap)

構成教員：石橋延幸(p)、受川史彦(p)、伊敷吾郎(ap)、原和彦(ap)、佐藤構二(l)、飯田崇史(a)、

廣瀬茂輝(a)、金信弘(p特命)、吉田拓生(pCA:福井大)、池上陽一(apCA:KEK)

連携教員：松浦周二(p客員:関西学院大)、佐藤勇二(ap:福井大)

フォーク・核物質研究部門 部門長：江角晋一(p)

構成教員：小澤 顕(p)、中條達也(l)、Norbert Novitzky(a海外unit副PI)、新井田貴文(a)、野中俊宏(a)、

轟木貴人(a)、三明康郎(p特命)、金谷和至(p特命)、山口貴之(apCA:埼玉大)、

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

Marco van Leeuwen(p海外unitPI: Utrecht大)

連携教員：藏増嘉伸(p)、谷口裕介(ap)、笹公和(ap)、森口哲朗(a)、杉立徹(p客員:広大)、

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

郡司卓(ap:東大)、志垣賢太(p:広大)、齋藤武彦(p客員:理研)、山口由高(ap客員:理研)

研究員：坂井真吾、Ashutosh Kumar Pandey

光量子計測器開発部門 部門長：原和彦(ap)

構成教員：江角晋一(p)、武内勇司(ap)、金信弘(p特命)

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

中村浩二(a:KEK)

CA: 筑波大学とのクロス・アポイントメント教員

2021/04

図 6 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2021/4) : 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。

3.1 国際テニュアトラック教員

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

TCHoU 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)

クォーク・核物質研究部門 部門長：江角晋一(p)

構成教員：小澤 顕(p)、中條達也(l)、Norbert Novitzky(a海外unit副PI)、新井田貴文(a)、野中俊宏(a)、
轟木貴人(a)、三明康郎(p特命)、金谷和至(p特命)、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 7 宇宙史研究センター構成教員・連携教員 (2022/4)

クォーク・核物質研究部門の体制強化のために 2018 年度の筑波大学「国際テニュアトラック教員への支援に関わる公募」へ応募し採択され国際公募を行った結果、新井田貴文助教が採用されている(2019 年 7 月 1 日着任)。

3.2 海外教育研究ユニット招致

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

韓国ソウル国立大学ニュートリノ研究センター (KNRC) Kim Soo-Bong 教授を PI とする海外教育研究ユニットを 2016 年度に招致し、Kim Soo-Bong 教授は宇宙背景ニュートリノ探索 COBAND プロジェクトを推進した。その後、Kim 教授は 2020 年 2 月 29 日にソウル国立大学から成均館大学に異動となったため、当センター海外教育研究ユニット招致 PI を退職したが、引き続き共同研究を推進するため成均館大学ニュートリノ研究センター PI として招致の手続きを進めている。

2017 年秋には、筑波大学の教育国際化に向けた Campus in Campus (CiC) 制度を活用して、オランダ ユトレヒト大学のサブアトミック物理学研究機構の Thomas Peitzmann 教授と、Marco van Leeuwen 教授を PI とし、クォーク・グルオン・プラズマ研究プロジェクトを推進する海外教育研究ユニット招致を行うこと

になった。両教授は2018年3月1日に着任し、2018年3月8日には、数理物質系とユトレヒト大学との部局間協定調印式が行われた。また、副PIとしてNorbert Novitzky 助教が2018年6月1日に筑波大学に着任している。

3.3 クロス・アポイントメント教員

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。これにより、南極天文学研究部門に徂徠和夫教授（北海道大学、2017年4月1日着任）が、素粒子構造研究部門に吉田拓生教授（福井大学、2016年10月16日着任）、池上陽一准教授（KEK、2016年12月1日着任）が、クォーク・核物質研究部門に山口貴之准教授（埼玉大学、2016年12月1日着任）、小沢恭一郎准教授（KEK、2016年12月1日着任）、佐甲博之教授（原研、2017年4月1日着任）が採用された。2017年10月にそれぞれ対応するTCHoUの研究部門に配属され、現在も各部門の研究力強化に貢献している。

3.4 その他の人事制度の活用

科研費助教 江角晋一部門長の科研費（基盤S）によって、クォーク・核物質研究部門に轟木貴人助教が採用されている（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、新たにクォーク・核物質研究部門に理化学研究所から齋藤武彦客員教授と山口由高客員准教授が配置された。客員教員枠は、外部機関との連携研究の進展に応じて、フレキシブルに運用している。

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

3.5 研究員

機能強化経費などに基づき、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 2021年度 宇宙史研究センター研究員

氏名	部門	所属	任期
高水裕一	南極天文学研究部門	計算科学研究センター	2017/11/1–
齋藤弘雄	南極天文学研究部門	物理学域	2019/4/1–2021/9/31
Dragan SALAK	南極天文学研究部門	物理学域	2019/10/1–2021/9/31
Ashutosh Kumar PANDEY	クォーク・核物質研究部門	物理学域	2019/11/19–2022/3/31
坂井真吾	クォーク・核物質研究部門	物理学域	2020/9/1–2022/3/31
鈴木伸司	クォーク・核物質研究部門	物理学域	2021/9/1–2021/11/30

4 受賞

4.1 原 和彦准教授 令和 3 年度文部科学大臣表彰科学技術賞受賞 (2021/4)

光量子計測器開発部門長の原和彦准教授が、「素粒子実験半導体センサーの発展とその社会貢献」で令和 3 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰で、科学技術賞を受賞した。

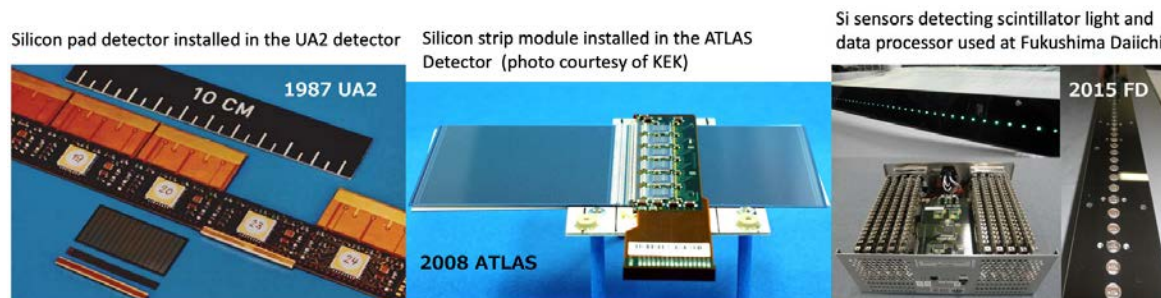


図 8 原 和彦准教授 文部科学大臣表彰科学技術賞受賞 (2021 年 4 月 6 日)

4.2 橋本拓也助教 令和 3 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞 (2021/4)

南極天文学研究部門の橋本拓也助教が、「電離酸素の輝線を用いた様々な最遠方銀河の観測的研究」で令和 3 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰で、若手科学者賞を受賞した。

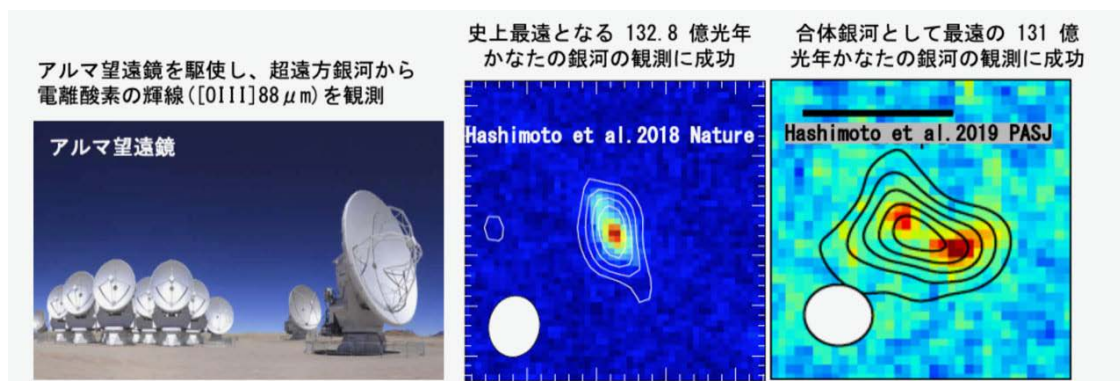


図 9 橋本拓也助教 文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞 (2021 年 4 月 6 日)

4.3 原 和彦准教授 学長表彰 (2021/6)

光量子計測器開発部門長の原和彦准教授が、令和 3 年度文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞した功績から学長表彰された。



図 10 原 和彦准教授 学長表彰 (2021 年 6 月 9 日)

4.4 橋本拓也助教 学長表彰および筑波大学若手教員特別奨励賞受賞 (2021/6)

南極天文学研究部門の橋本拓也助教が、令和 3 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した功績から学長表彰され、筑波大学若手教員特別奨励賞受賞を受賞した。



図 11 橋本拓也助教 学長表彰および筑波大学若手教員特別奨励賞受賞 (2021 年 6 月 9 日)

4.5 橋本拓也助教 2021 年度日本天文学会欧文研究報告論文賞受賞 (2022/3)

南極天文学研究部門の橋本拓也助教らが、2021 年度日本天文学会欧文研究報告論文賞を受賞した。

受賞論文: "Big Three Dragons: $Az = 7.15$ Lyman-break galaxy detected in [OIII] $88 \mu\text{m}$, [CII] $158 \mu\text{m}$, and dust continuum with ALMA"

アルマを用いて、約 130 億光年かなたの銀河から、世界で初めて酸素と炭素イオンの放つ輝線 ([OIII] $88 \mu\text{m}$, [CII] $158 \mu\text{m}$)、ならびに宇宙塵の熱放射を同時に検出することに成功した。これによって、宇宙初期の銀河の詳細な性質を明らかにした。



図 12 橋本拓也助教 2021 年度日本天文学会欧文研究報告論文賞受賞 (2022 年 3 月 4 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、新型コロナウイルスの感染防止のため、オンラインでの開催となった。

5.1.1 2021 年度第 1 回構成員会議

日時 2021 年 6 月 25 日（金）9:30–17:30

場所 オンライン（zoom）

出席者 受川、江角、久野、武内、原、ほか（計 35 名）

1. 前回議事メモ確認（久野）
2. 宇宙史研究センター概要（久野）
3. 2020 年度全体活動概要・2021 年度活動予定（久野）
4. 2020 年度各部門活動報告
 - 南極天文学研究部門（久野）
 - 素粒子構造研究部門（武内）
 - クォーク・核物質研究部門（江角）
 - 光量子計測器開発部門（原）
5. 審議・報告事項
 - 2021 年 3 月 29 日に行われた 2020 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 4 年度の概算要求等に向けた事業案として、「南極 10m テラヘルツ望遠鏡計画」を提案したことが報告された。
 - 受川副センター長より、センター予算について報告され、承認された。
6. 各プロジェクト成果報告 (11 講演)
 - 超弦理論の有限温度数値シミュレーション（浅野侑磨）
 - Cumulants of net baryon-number fluctuations from lattice QCD（大野浩史）
 - 南極 30cm サブミリ波望遠鏡計画（久野成夫）
 - 新型 LGAD 検出器が切り拓く次世代飛跡検出器（中村浩二）
 - COBAND プロジェクトにおける遠赤外光学系の開発（飯田崇史）
 - Small system flow at RHIC and LHC experiments（轟木貴人）
 - 活動銀河核ジェットにおけるシンクロトロン放射電子の空間分布（荻原大樹）
 - ATLAS 実験からの最近の結果と Run 3 実験に向けた準備状況（廣瀬茂輝）
 - CRIB の低エネルギー不安定核ビームを使った最近の天体核反応研究成果（山口英斉）
 - 超小型テラヘルツ波リモートセンシングのための基盤技術研究（西堀俊幸）
 - 「宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子炉の透視」を振り返って（原 和彦）

5.1.2 2021 年度第 2 回構成員会議

日時 2021 年 11 月 26 日（金）9:30-17:10

場所 オンライン（zoom）

出席者 受川、江角、久野、武内、原、ほか（計 30 名）

1. 2021 年度前期全体活動概要・2021 年度活動予定（久野）
2. 2021 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
 - 令和 4 年度学内教育研究設備整備に「宇宙史研究に用いる光量子検出器性能試験システム」および「南極 10m テラヘルツ望遠鏡システム」が、また、重点及び戦略的経費等事業計画として「宇宙史の解明に向けた国際研究拠点の形成」が提案されたことが報告された。
 - 2020 年度活動報告書が完成し、学長報告が行われたことが報告された。
 - 原和彦准教授と橋本拓也助教が、令和 3 年度学長表彰を受け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。
 - 次期センター長選考の手続きについて確認が行われた。
4. 各プロジェクト成果報告（11 講演）
 - ラージ N ゲージ理論の部分閉じ込め（渡辺展正）
 - Quenched lattice QCD 計算による高温媒質中での c/b クォーク（大野浩史）
 - ATLAS 実験の最近の物理成果（佐藤構二）
 - LHC-ALICE 実験からの最近の結果（坂井真吾）
 - 宇宙大規模構造形成における宇宙論的ニュートリノの数値シミュレーション（吉川耕司）
 - 遠方銀河観測の最前線と次世代望遠鏡計画の展望（橋本拓也）
 - 蓄積リングを用いた RI の質量測定に関する研究（鈴木伸司）
 - 高輝度 LHC での ATLAS 内部飛跡検出器 ITk 用ピクセル検出器の設計と建設（中村浩二）
 - ILC 用衝突点検出器の設計に向けた SOI ピクセル検出器としての取り組み（山田美帆）
 - COBAND 実験のための STJ 遠赤外単一光子検出器開発現状（武内勇司）
 - 100GHz 帯野辺山 MKID カメラの試験観測結果（新田冬夢）

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)）、数理解物質系長（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。

2021 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

表 2 2021 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

新井康夫特別教授と自然科学研究機構国立天文台の小林秀行特任教授に委員を務めていただいた。「センター長が指名する本学の職員」としては、当センターと密接な連携がある計算科学研究センターの梅村雅之教授と、人工知能科学センター長の桜井鉄也教授に務めていただいた。

5.2.1 2021 年度第 1 回運営協議会

日時 2022 年 3 月 18 日（金） 14:00-16:30

場所 オンライン（zoom）

1. 第 1 部 14:00-15:30 （公開）

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

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

- 予算執行状況報告、将来計画、その他

2021 年度の運営協議会を 2022 年 3 月 18 日に開催し運営協議会メンバーによる審議を行った。今年度は、新型コロナウイルスの影響でオンラインでの開催となった。

第 1 部はセンター教員から全体及び各部門の活動状況等報告で、TCHoU ワークショップと兼ねて一般に公開された。第 2 部は、運営協議委員とセンターの活動、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することまで、センターのほぼすべての活動について審議・決定する、センターの意思決定の中心機関である。2021 年度の運営委員会委員名簿を表 3 に示す。

表 3 2021 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。

2021 年度の開催実績は、以下のとおり：

2021 年度 4/12, 5/17, 6/14, 7/19, 9/13, 10/11, 11/8, 12/13, 1/11, 2/14, 3/10

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 QCD 相転移や QGP 生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験共同研究会

日時 2021 年 9 月 24 日 (金) 9:30–17:30

場所 オンライン

参加者 65 名

QCD 相転移や QGP 生成に関してモデル化を通して理論・実験の両方から理解を進めるために、本領域の先端の研究をされている方々に講演をしていただき、その議論を深めることを目的としたオンライン研究会を開催した。

6.2 Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2021 「宇宙の進化と物質の起源」

日時 2021 年 9 月 11 日 (土) 12:15–21:10

場所 オンライン

参加者 60 名

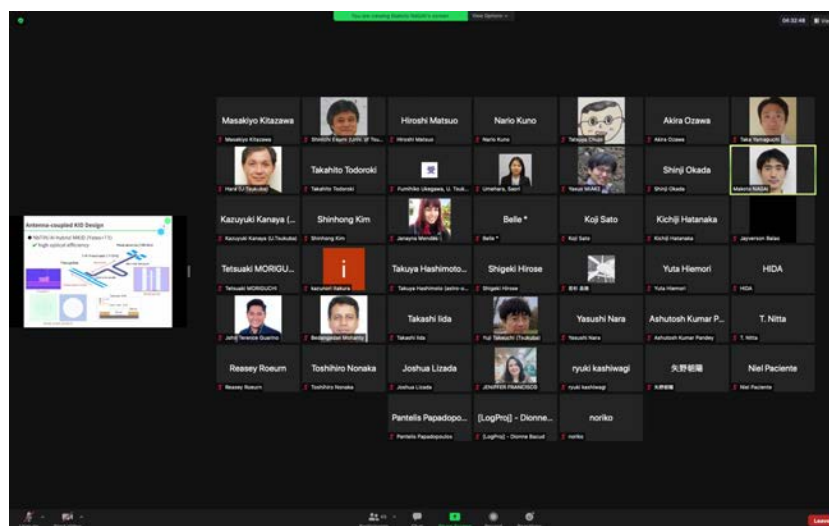


図 13 Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2021 「宇宙の進化と物質の起源」

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 4-11)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、光子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。

6.3 極地研研究集会「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」

日時 2021年3月14日(月) 9:30-17:35

場所 国立極地研究所とオンラインのハイブリッド

参加者 48名

南極天文学研究部門の主催により、標記ワークショップをオンラインで開催した。南極からのテラヘルツ・赤外線観測のサイエンスについて SPICA グループと議論が行われた。

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

6.4 TCHoU ワークショップ

日時 2022年3月16日(水) 10:00-14:35 南極天文学研究部門

2022年3月22日(火) 10:00-12:30 光量子計測開発部門

2022年3月23日(水) 13:30-18:15 素粒子構造研究部門

2022年3月24日(木) 10:30-18:00 クォーク・核物質研究部門

場所 オンライン

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

6.5 宇宙史セミナー

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。毎回、分野を超えた活発な議論が行われているが、残念ながら今年度は新型コロナウイルスの影響で、開催数が少なくなってしまった。

第1回

日時 2021年11月12日(金) 13:45-15:00

場所 オンライン

講演 北野 龍一郎 教授(高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所)

“Stochastic computation of $g-2$ in QED”

参加者 23名

第2回

日時 2022年2月25日(金) 13:30-15:00

場所 オンライン

講演 松尾 宏 准教授(国立天文台)

“Far-infrared intensity interferometry for future space mission”

参加者 24名

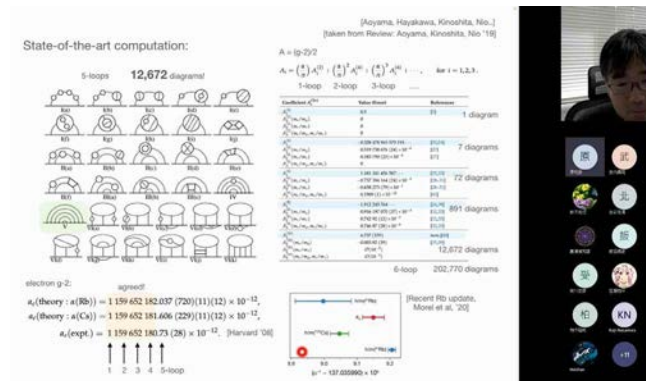


図 14 第 1 回 宇宙史セミナー (2021 年 11 月 12 日)

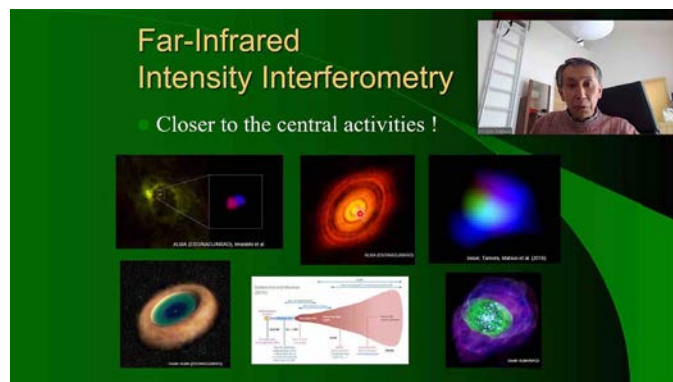


図 15 第 2 回 宇宙史セミナー (2022 年 2 月 25 日)

7 一般向け広報活動

TChOU では、学生・一般向けの広報活動も積極的に推進している。2021 年度は新型コロナウイルスのため活動が制限され、オンラインが中心となった。

7.1 第 12 回天文学宇宙の七夕講演会

日時 2021 年 7 月 11 日 13:30-16:30

場所 オンライン

プログラム

「巨大望遠鏡で探る宇宙初期の銀河」橋本拓也 (筑波大学)

「銀河の衝突とブラックホール」森 正夫 (筑波大学)

参加者数 90 名

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。

7.2 筑波大学学園祭「雙峰祭」におけるオンライン展示「宇宙史探訪」

日時 2021 年 11 月 6 日～7 日

場所 オンライン

学生・一般向けの広報活動として、「雙峰祭」で、宇宙史研究センターの研究活動紹介をオンラインで行った。



図 16 筑波大学学園祭「雙峰祭」企画展示「宇宙史探訪」（2021 年 11 月 6 日～7 日）

8 2021 年度会計報告

TCHoU には、国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」の 2021 年度分として、2434.9 万円が配分された。この機能強化経費は、2016 年度から CiRfSE 宇宙史研究拠点に配分されているもので、CiRfSE の宇宙史研究拠点と宇宙史プロジェクトはそのまま宇宙史研究センターに移行した。また、機能強化経費事業の補助金として 1000 万円、戦略イニシアティブ経費として 428.5 万円が配分された。この他に、2020 年度からの繰越し金が収入となる。

支出は、主に研究員雇用、クロスアポイントメント教員経費などの人件費に使われ、残りを、各部門の活動費、センターの整備などにあてた。支出の詳細は、表 4 を参照。

表 4 2021 年度予算執行報告

[illegible][illegible]

第 II 部

研究部門活動報告

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

部門長

久野 成夫 (数理物質系物理学域 教授)

構成教員

新田 冬夢 (数理物質系物理学域 助教)

橋本 拓也 (数理物質系物理学域 助教)

徂徠 和夫 (数理物質系物理学域 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)

齋藤 弘雄

Dragan SALAK

南極天文学研究部門では、野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡や南米チリの高地に建設されたアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) などの電波望遠鏡と、すばる、VLT、SOFIA などの光赤外望遠鏡を駆使して、遠方銀河、近傍銀河、銀河系、星形成領域などの観測的研究を進めている。また、地上では南極でのみ実現可能なテラヘルツ天文学を推進するために、地上で最も天体観測に適した南極内陸部に 10 m 級テラヘルツ望遠鏡を建設する計画を進めている。南極テラヘルツ望遠鏡に搭載する予定の超広視野超伝導電波カメラの開発に向けた野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡用 100-GHz MKID カメラの開発や、30 cm サブミリ波望遠鏡を南極内陸部に設置し、銀河系における星間ガスの進化に関する研究を進めている。

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。

2021 年 9 月 30 日に研究員の齋藤弘雄氏と Dragan SALAK 氏が異動した。また、2021 年 11 月 30 日に新田冬夢助教が退職、2021 年 3 月 31 日に徂徠和夫教授のクロスアポイントメントが終了した。

(1) 近傍銀河・銀河系の研究

主に ALMA や ASTE を用いた近傍銀河の研究、野辺山 45 m 鏡を用いた銀河系の研究を進めてきた。ここでは二つの近傍銀河に関する研究を紹介する。

近傍銀河 M83 の $[\text{CI}](^3P_1 - ^3P_0)$ 輝線によるマッピング観測 (論文 10)

$[\text{CI}](^3P_1 - ^3P_0)$ 輝線は、近年分子ガスの新しいトレーサーとして注目されている。近傍銀河 M83 からの $[\text{CI}](^3P_1 - ^3P_0)$ 輝線を ASTE によって観測し、 $\text{CO}(J = 1 - 0)$ 輝線と比較することでその有用

性について検証した。その結果、分子ガスの質量評価において $[\text{CI}](^3P_1 - ^3P_0)$ 輝線は $\text{CO}(J = 1 - 0)$ 輝線ほどの精度は得られず (図 1)、比較的温度的の高い中心領域などでのみ有効なトレーサーである可能性が示された。

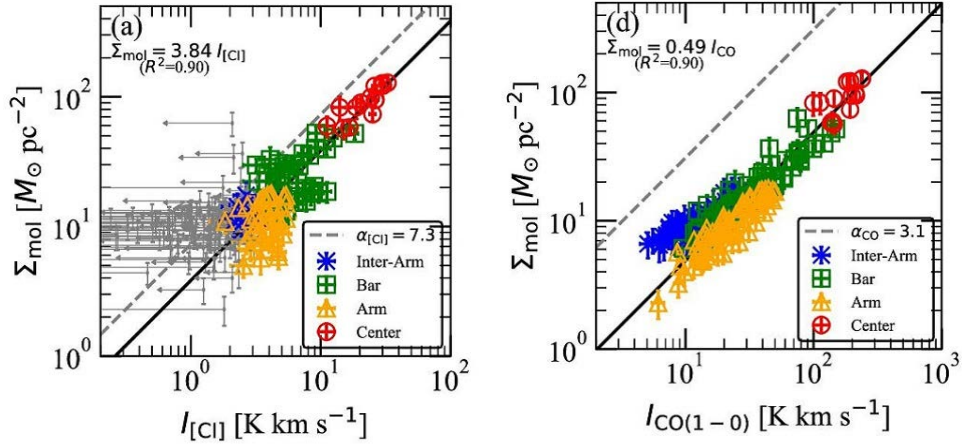


図 17 $[\text{CI}](^3P_1 - ^3P_0)$ と $\text{CO}(J = 1 - 0)$ の積分強度と分子ガス面密度の相関 (論文 10)

棒渦巻銀河中心部におけるガスの運動と星形成活動の関係 (論文 12)

棒渦巻銀河では、非軸対象ポテンシャルによって角運動量が抜かれた分子ガスが中心部に集中し、活発な星形成を誘発することが知られている。ただし、すべての棒渦巻銀河に当てはまるわけではなく、分子ガスが豊富であるにもかかわらず、星形成が活発化していない銀河も見つかっている。その違いが何によるのかを明らかにするために、近傍棒渦巻銀河 NGC613 の中心部における分子ガスの運動と星形成活動との関係を ALMA を用いて詳細に調べた (図 2)。その結果、棒状構造のオフセットリッジに沿って中心部に落ち込んできた分子ガスと中心のリング構造にある分子ガスの速度差が大きすぎる場合 ($\sim 170 \text{ km/s}$)、星形成が抑制されてしまうことがわかった。

(2) ALMA、VLT などの望遠鏡を用いた遠方銀河の観測的研究

本年度は、大別して二つのテーマを推進した。(1) ALMA を用いた遠方銀河の微細構造線の観測 (論文 4, 6、修士論文 1, 2、学士論文 3)、(2) 学生の研究テーマとして、遠赤外成層圏天文台 (SOFIA) のデータを用いた研究の推進。ここでは (1) を詳述する。修士学生のプロジェクトとして、ALMA Band 9 アーカイブデータ (未発表: PI. K. Ferkinhoff) を用いた赤方偏移 $z = 6$ にあるクェーサーの観測研究を行った。近年、 $[\text{OI}] 63 \mu\text{m}$ 輝線は遠方銀河観測の新しい手法として注目を浴びているが (Rybak et al. 2020; Katz et al. 2019)、本データは初めて遠方クェーサーで $[\text{OI}] 63 \mu\text{m}$ 輝線を観測したものである。輝線は未検出だったものの、得られた光度の上限値は十分に深く、既に得られていた $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$ 光度や赤外光度と組み合わせることで、光解離領域 (PDR) モデリングを行い、本天体の星間媒質の性質に制限を試みた。近傍 ULIRG と比較して、同程度のガス密度を持ち、強い紫外輻射場を持つことを明らかにした (図 3)。

(3) 野辺山 45 m 鏡用超伝導電波カメラの開発

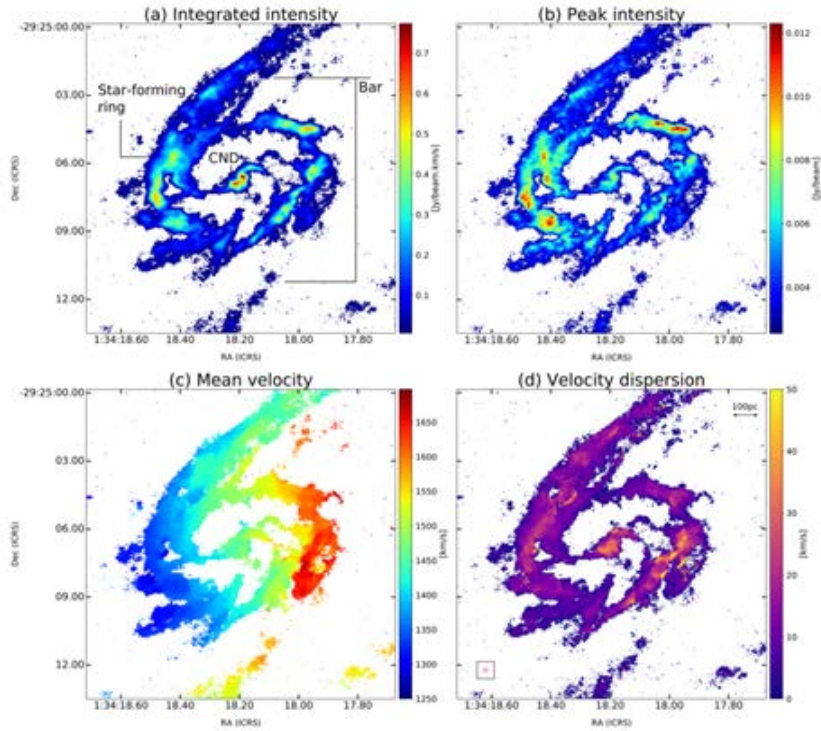


図 18 ALMA による NGC613 の観測結果。(a) 積分強度図、(b) ピーク温度、(c) 視線速度、(d) 速度分散（論文 12）

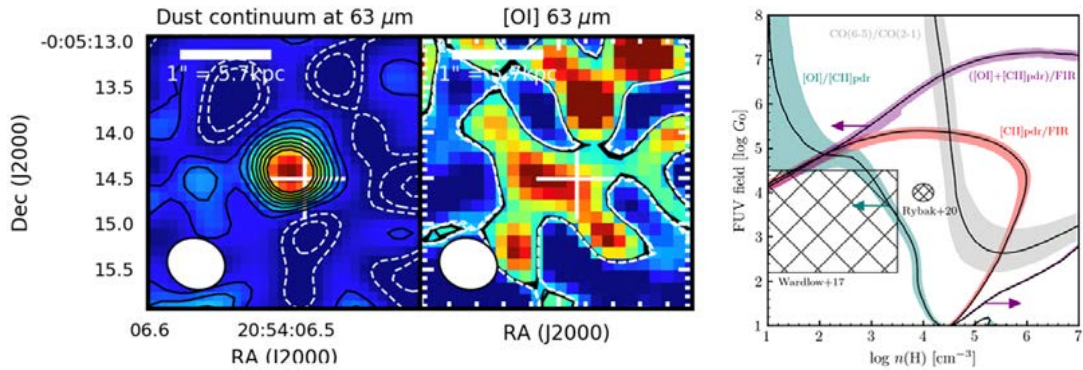


図 19 赤方偏移 $z = 6$ にあるクェーサー J2054-0005 の ALMA Band 9 観測の結果。左 (中央) パネルはダスト連続光 ([OI] $63 \mu\text{m}$ 輝線) の様子。世界で初めて、遠方クェーサーの [OI] $63 \mu\text{m}$ のデータを調べ、右図の通り天体の星間媒質の性質に制限を与えた。

今年度は、筑波大学でハイブリッド型に改良したアンテナカップル型 MKID とグルノーブル大学から提供してもらった集中定数型 KID (LeKID) の性能評価を行った（修士論文 6）。現時点では、アンテナカップル型 MKID のほうが感度が高いことが確認されたため、アンテナカップル型 MKID を用いて野辺山 45 m 鏡への搭載試験を実施した（修士論文 8）。2018 年に行った試験観測時に比べ、感度がおおよそ 10 倍向上していることが確認できた（図 4）。また、ビームサイズも $16.3 \pm 2.0 \text{ arcsec}$ と理論値に近づき、主ビーム能率とアンテナ開口能率もそれぞれ 0.42 ± 0.06 と 0.37 ± 0.06 と 2018 年時に

比べ向上していることが確認できた。

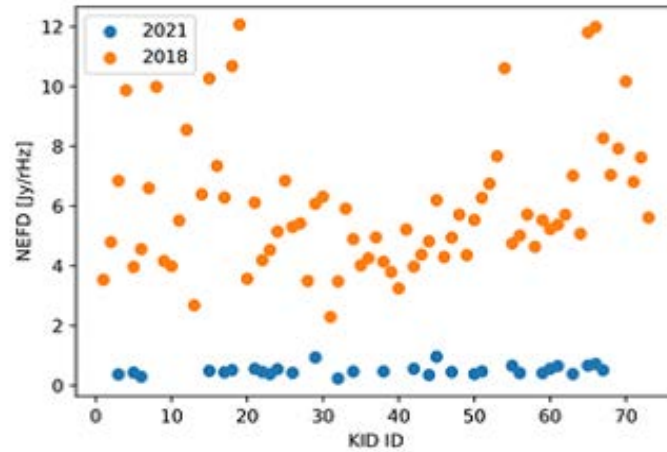


図 20 2018 年と 2021 年の測定結果の比較。横軸は MKID 素子の ID。縦軸は Noise Equivalent Flux Density (NEFD)。

(4) 南極天文学の推進

今年度は、主に 30 cm 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計画を推進した。 $\text{CO}(J=4-3)$ 輝線は、星形成に密接に関係した高温高密度分子ガスの観測に適しており、 $[\text{CI}](^3P_1-^3P_0)$ 輝線は分子雲形成や破壊に関係する希薄な分子ガスの観測に適した輝線である。これらとこれまでに行われてきた $\text{CO}(J=1-0)$ 輝線による銀河面サーベイのデータを比較することで、銀河における星間ガスの進化過程を解明することを目指している。今年度は、2 輝線同時観測に向けた受信機の広帯域化を国立天文台先端技術センターおよび関西学院大学との共同研究として進めた（修士論文 4、学士論文 5）。また、南極の夏季に光学ポインティングを行う必要があるため、昼間でも測定可能なシステムの開発を行い、筑波大学構内における試験観測によって、必要とされる感度を達成していることを確認することができた（修士論文 7、学士論文 1、図 5）。国立極地研究所の一般観測研究に応募し、書類審査を通過しヒアリングを受けたが、残念ながら不採択となった。

10m 級テラヘルツ望遠鏡計画に関しては、日本学術会議マスタープラン 2023 への掲載を希望し意思表明し宇宙電波懇談会からの推薦を受けたが、マスタープラン 2023 は作成されないことになった。



図 21 筑波大学構内での光学ポインティング試験観測の様子（学士論文 1）

〈査読付き論文〉

1. Kerutt, J., Wisotzki, L., Verhamme, A., Schmidt, K. B., Leclercq, F., et al. (Hashimoto, T. 9 番目), “Equivalent widths of Lyman α emitters in MUSE-Wide and MUSE-Deep”, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 659, id.A183, 28 pp. (2022 March)
2. Yajima, H., Abe, M., Khochfar, S., Nagamine, K., Inoue, K. A., et al. (Hashimoto, T.10 番目), “FOREVER22: galaxy formation in protocluster regions”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 509, Issue 3, pp.4037-4057 (2022 January)
3. Goto, H., Shimasaku, K., Yamanaka, S., Momose, R., Ando, M., et al. (Hashimoto T. 7 番目), “SILVERRUSH. XI. Constraints on the Ly α Luminosity Function and Cosmic Reionization at $z = 7.3$ with Subaru/Hyper Suprime-Cam”, *The Astrophysical Journal*, Volume 923, Issue 2, id.229, 13 pp. (2021 December)
4. Sugahara, Y., Inoue, Akio K., Hashimoto, T., Yamanaka, S., Fujimoto, S., et al., “Big Three Dragons: A [NII] 122 μm Constraint and New Dust-continuum Detection of a $z = 7.15$ Bright Lyman-break Galaxy with ALMA”, *The Astrophysical Journal*, Volume 923, Issue 1, id.5, 14 pp. (2021 December)
5. Onoue, M., Matsuoka, Y., Kashikawa, N., Strauss, M.A., Iwasawa, K., et al. (Hashimoto, T. 11 番目), “Subaru High- z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). XIV. A Candidate Type II Quasar at $z = 6.1292$ ”, *The Astrophysical Journal*, Volume 919, Issue 1, id.61, 11 pp. (2021 September)
6. Izumi, T., Matsuoka, Y., Fujimoto, S., Onoue, M., Strauss, M.A., et al. (Hashimoto, T. 20 番目), “Subaru High- z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). XIII. Large-scale Feedback and Star Formation in a Low-luminosity Quasar at $z = 7.07$ on the Local Black Hole to Host Mass Relation”, *The Astrophysical Journal*, Volume 914, Issue 1, id.36, 17 pp. (2021 June)
7. Kojima, T., Ouchi, M., Rauch, M., Ono, Y., Nakajima, K., et al. (Hashimoto T. 9 番目), “EMPRESS. II. Highly Fe-enriched Metal-poor Galaxies with $-1.0(\text{Fe}/\text{O})_{\odot}$ and $0.02(\text{O}/\text{H})_{\odot}$: Possible Traces of Supermassive ($>300 M_{\odot}$) Stars in Early Galaxies”, *The Astrophysical Journal*, Volume 913, Issue 1, id.22, 20 pp. (2021 May)
8. Yajima, Y., Sorai, K., Miyamoto, Y., Muraoka, K., Kuno, N., Kaneko, H., Takeuchi, T. T., Yasuda, A., Tanaka, T., Morokuma-M., K., Kobayashi, M. I. N., “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). IX. $^{12}\text{CO}(J = 2 - 1)/^{12}\text{CO}(J = 1 - 0)$ line ratio on kiloparsec scales”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 73, Issue 2, pp.257-285 (2021)
9. Kondo, H., Tokuda, K., Muraoka, K., Nishimura, A., Fujita, S., Tosaki, T., Zahorecz, S., Miura, R. E., Kobayashi, M. I. N., Onodera, S., Torii, K., Kuno, N., et al., “ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. III. Spatially Resolved Features of the Star formation Inactive Million-solar-mass Cloud”, *The Astrophysical Journal*, Volume 912, Issue 1, id.66, 11 pp. (2021)
10. Miyamoto, Y., Yasuda, A., Watanabe, Y., Seta, M., Kuno, N., Salak, D., Ishii, S., Nagai, M., Nakai, N., “Atomic

carbon [CI]($^3P_1 - ^3P_0$) mapping of the nearby galaxy M83”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 73, Issue 3, pp.552-567 (2021)

11. Sato, K., Hasegawa, T., Umemoto, T., Saito, H., Kuno, N., Seta, M., Sakamoto, S., “FUGIN hot core survey. I. Survey method and initial results for $l = 10^\circ - 20^\circ$ ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 73, Issue 3, pp.568-583 (2021)
12. Sato, K., Miyamoto, Y., Kuno, N., Salak, D., Wagner, A. Y., Seta, M., Nakai, N., “Relating gas dynamics to star formation in the central region of the barred spiral galaxy NGC613”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 73, Issue 4, pp.1019-1035 (2021)
13. Hasebe, T., Hayashi, T., Shohmitsu, Y., Nitta, T., Matsuo, H., Sekimoto, Y., “Fabrication of three-layer silicon antireflection structures in 200–450 GHz using deep reactive ion etching”, Applied Optics, 60(33), pp.10462-10467, 2021

〈学位論文〉

[博士論文]

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 保田敦司：Observational Study of Effects by Spiral Structures on the Star Formation Activity in Nearby Spiral Galaxies

[修士論文]

数理物質科学研究群・物理学学位プログラム

1. 石井希実：ALMA を用いた $z = 6$ クェーサーの [OI] $63\ \mu\text{m}$ 輝線観測と星間媒質の性質の解明
2. 河原沙帆：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. 権代大河：銀河系の渦状構造と分子雲の BDI の関係に関する研究
4. 瀧口風太：銀河面サーベイ観測用サブミリ波サイドバンド分離型広帯域受信機の開発
5. 丹羽綾子：強度干渉計による画像合成に向けたテラヘルツ光子検出器と吸着冷凍器の開発
6. 野地涼平：144 素子集中定数型 KID アレイを用いた野辺山 45 m 鏡用ミリ波帯カメラの光学性能評価
7. 小山 徹：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡の光学ポインティングシステムの開発
8. 宮澤 啓：100 GHz 帯 MKID 電波カメラの野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載試験による性能評価
9. 秋場 学：CO 多輝線観測による銀河系での分子ガスの物理状態に関する研究

[学士論文]

1. 加藤良寛：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡の光学ポインティングシステム用 CMOS カメラの設定パラメーターの最適化
2. 石川みなみ：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡構造体の熱解析に関する研究
3. 松村達也：最遠方のダスト銀河の検証
4. 永井るい：近傍銀河におけるアウトフロー中星間ダストの観測的研究
5. 相原大地：南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用ヘテロダイン受信機の間周波数帯の広帯域化と性能評価
6. 後藤虎斗：近傍スターバースト銀河 NGC1808 における星形成効率の多様性に関する研究
7. 高橋咲也：渦状銀河 M81 におけるガス量と星形成率の関係についての研究

〈研究成果発表〉

[国際学会・研究会]

1. Kuno, N., “Progress Report of Antarctic 30-cm Submm Telescope Project”, 6th Workshop of the SCAR AAA, Sep. 8-10, 2021
2. Hajime Ezawa, Hiroshi Matsuo, Masahiro Ukibe, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Ayako Niwa, “Properties of SIS Devices for Terahertz Photon Detection”, 19th International Workshop on Low Temperature Detectors, Online, July 19-29, 2021 (ポスター)
3. Ayako Niwa, Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Tomonori Tamura, “SIS photon detector for THz observation beyond gap energy”, 22st East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop, Online, November 25-26, 2021
4. Tomohiro Koseki, Hiroshi Matsuo, Atsuhisa Terui, Ryouhei Noji “Development of cryogenic readout circuit for Photon Counting THz Interferometry” 22nd East Asia Submillimeter-wave Receiver Workshop, Online, November 26 2021

[国内学会・研究会]

1. 久野成夫、「南極 10 m テラヘルツ望遠鏡 (ATT10)」、電波天文将来計画検討シンポジウム 2021、2021 年 7 月 31 日、(オンライン開催) (招待講演)
2. 久野成夫、「南極テラヘルツ望遠鏡」、日本学術会議 天文学・宇宙物理学分科会 大型中型計画シンポジウム、2021 年 8 月 10 日、(オンライン開催) (招待講演)

3. 久野成夫、新田冬夢、橋本拓也、齋藤弘雄、Dragan SALAK、中井直正、瀬田益道、俣俣和夫、永井 誠、梅本智文、松尾 宏、「南極テラヘルツ望遠鏡計画」、日本天文学会 2021 年秋季年会、2021 年 9 月 13 日-15 日、(オンライン開催)
4. 宮本祐介、保田敦司、渡邊祥正、瀬田益道、久野成夫、Salak Dragan、石井 峻、永井 誠、中井直正、「近傍渦巻銀河 M83 の [CI] mapping 観測」、日本天文学会 2021 年秋季年会、2021 年 9 月 13 日-15 日、(オンライン開催)
5. 梅本智文、久野成夫、齋藤弘雄、俣俣和夫、瀬田益道、中井直正、「南極からの [NII] 1.46THz 輝線による銀河面サーベイ」、日本天文学会 2021 年秋季年会、2021 年 9 月 13 日-15 日、(オンライン開催)
6. 村岡和幸、小西亜侑、藤田真司、北野尚弥、大西利和、徳田一起、濤崎智佳、三浦理絵、西合一矢、佐野栄俊、河村晶子、小野寺幸子、久野成夫、西村 淳、出町史夏、山田 麟、立原研悟、福井康雄、柘植紀節、「Atacama Compact Array による渦巻銀河 M33 の ^{12}CO , ^{13}CO $J = 2 - 1$ 広域観測 (3): 分子雲のサイズ-線幅関係」、日本天文学会 2021 年秋季年会、2021 年 9 月 13 日-15 日、(オンライン開催)
7. 泉 拓磨 他、「 $z = 7z = 7$ クエーサーにおける大規模アウトフローと始原的共進化関係」X01a、2021 年 9 月、広島大学、(オンライン開催)
8. 石井希実 他、「ALMA を用いた赤方偏移 6 にあるクエーサーの [OI] $63\ \mu\text{m}$ 輝線観測と星間媒質の性質の解明」X02a、2021 年 9 月、広島大学 (オンライン開催)
9. 新田冬夢、「100GHz 帯野辺山 MKID カメラの試験観測結果」、2021 年度第 2 回宇宙史研究センター成果報告会、2021 年 11 月 26 日、(オンライン開催)
10. 松尾 宏、江澤 元、Shan Wenlei、村田泰宏、丹羽綾子、「光子計数型干渉計を実現する遠赤外線超伝導検出器の開発」、第 22 回宇宙科学シンポジウム、2022 年 1 月 6 日-7 日、(オンライン開催) (ポスター)
11. 丹羽綾子、松尾 宏、江澤 元、田村友範、「南極テラヘルツ強度干渉計搭載用 1.5 THz 光子検出器の開発」、第 22 回ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ、2022 年 2 月 21 日-22 日、(オンライン開催)
12. Yosuke Murayama, Tom Nitta, Makoto Nagai, Ryuji Suzuki, Ryotaro Hikawa, Hiromu Miyazawa, Ryohei Noji, Nario Kuno, Wenlei Shan, Hiroshi Matsuo, Akihira Miyachi, Shohei Ezaki, Yutaro Sekimoto, Takashi Noguchi, Masato Naruse, Naomasa Nakai, 「100-GHz 帯連続波観測用 NbTiN-Al ハイブリッド型 MKID アレイの開発」、第 22 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2022 年 2 月 21 日-22 日 (オンライン開催) (ポスター)
13. H. Miyazawa, T. Nitta, M. Nagai, Y. Murayama, R. Noji, G. Zhai, P. Mandal, R. Suzuki, R. Hikawa, R. Suzuki, M. Aoki, N. Kuno, N. Nakai, Y. Sekimoto, H. Matsuo, T. Tsuzuki, H. Kiuchi, M. Fukushima, K. Mitsui, S. Ezaki, A. Miyachi, W. Shan, T. Noguchi, M. Naruse, C. Miyazawa, S. Fuji, K. Tatematsu, T. Takahashi, J. Maekawa, 「100 GHz 帯 MKID 電波カメラの野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載試験による性能評価」、第 22 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2022 年 2 月 21 日-22 日、(オンライン開催) (ポスター)
14. 野地涼平、新田冬夢、永井 誠、村山洋佑、鈴木隆司、樋川遼太郎、鈴木理花、宮澤 啓、青木美和、久野成夫、中井直正、関本裕太郎、松尾 宏、都築俊宏、Alessandro Monfardini, Juan Macias-Perez, 「144 素子集中定数型 KID アレイを用いた野辺山 45 m 鏡用ミリ波帯カメラの光学性能評価」、第 22 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2022 年 2 月 21 日-22 日、(オンライン開催) (ポスター)
15. 永井 誠、野地涼平、今田大皓、新田冬夢、村山洋佑、成瀬雅人、「電波点回折干渉計のための超伝導回路を用いた相関型偏波計の設計」、第 22 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2022 年 2 月 21 日-22 日、(オンライン開催) (ポスター)
16. 照井惇寿、松尾 宏、小関知宏、「テラヘルツ光子計数型検出器の開発に向けた回路作成」、第 22 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2022 年 2 月 21 日-22 日、(オンライン開催) (ポスター)
17. 保田敦司、久野成夫、俣俣和夫、宮本祐介、Dragan Salak、竹内努、諸隈佳菜、矢島義之、他 COMING チーム、「NRO レガシープロジェクト COMING (31): 近傍銀河における星形成活動に対する渦巻腕の影響に関する観測的研究」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
18. 権代大河、久野成夫、齋藤弘雄、梅本智文、「銀河系の渦状構造と分子雲の BDI の関係」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
19. 小関知宏、松尾 宏、照井惇寿、野地涼平、「光子計数型テラヘルツ強度干渉計のための極低温読み出し回路の開発」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 3 日、(オンライン開催)
20. 田村陽一 他、「ALMA による $z = 8.31$ のライマンブレイク銀河の 300 pc 分解能撮像」日本天文学会 2022 年春季年会、X04a、2022 年 3 月、新潟大学、(オンライン開催)
21. 小野宜昭 他、「Deep CO Observations for Luminous Lyman-break Galaxies at $z=6.0293z=6.0293-6.20376.2037$ 」X09a、2022 年 3 月、新潟大学、(オンライン開催)
22. 丹羽綾子、松尾 宏、江澤 元、田村友範、「テラヘルツ強度干渉計のための 1.5 THz 光子計数型検出器の設計」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
23. 村山洋佑、新田冬夢、永井 誠、鈴木隆司、樋川遼太郎、鈴木理花子、野地涼平、宮澤 啓、青木美和、久野成夫、中井直正、関本裕太郎、松尾 宏、江崎翔平、宮地晃平、Shan Wenlei、都築俊宏、野口 卓、成瀬雅人、「野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯 109 素子電波カメラの開発: 実験室における雑音評価」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
24. 宮澤 啓、新田冬夢、永井 誠、村山洋佑、野地涼平、Zhai Guangyuan, Pranshu Mandal, 鈴木隆司、樋川遼太郎、鈴木理花子、青木美和、久野成夫、中井直正、関本裕太郎、松尾宏、都築俊宏、木内 等、福嶋美津広、三ツ井健司、江崎翔平、宮地晃平、Shan Wenlei、野口 卓、成瀬雅人、宮澤千栄子、藤 茂、立松健一、高橋敏一、前川 淳、45 m 運用メンバー、「Al-NbTiN ハイ

- ブリッド型 MKID アレイを用いた 100-GHz 帯連続波カメラの野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載試験」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
25. 野地涼平、新田冬夢、永井 誠、村山洋佑、鈴木隆司、樋川遼太郎、鈴木理花子、宮澤 啓、青木美和、久野成夫、中井直正、関本裕太郎、松尾 宏、都築俊宏、Alessandro Monfardini、Juan Macias-Perez、「144 素子 LeKID アレイを用いた野辺山 45 m 鏡用ミリ波カメラの光学性能評価」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
 26. 青木美和、永井 誠、新田冬夢、野地涼平、宮澤 啓、村山洋佑、松尾 宏、「力学インダクタンス検出器アレイの多素子同時読み出しにおける雑音低減に関する研究」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
 27. 永井 誠、野地涼平、今田大皓、新田冬夢、村山洋佑、成瀬雅人、「電波点回折干渉計のための超伝導回路を用いた相関型偏波計の試作に向けた設計」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催) (ポスター)
 28. 丹羽綾子、松尾 宏、江澤 元、田村友範、小関知宏、「NII [205 μ m] 輝線をターゲットとした南極テラヘルツ強度干渉計試験観測計画」、宇宙史研究センター南極天文学研究部門ワークショップ、2022 年 3 月 16 日、(オンライン開催)
 29. 瀧口風太、久野成夫、瀬田益道、「銀河面サーベイ観測用サブミリ波望遠鏡用広帯域受信機の開発」、宇宙史研究センター南極天文学研究部門ワークショップ、2022 年 3 月 16 日、(オンライン開催)
 30. 瀧口風太、久野成夫、瀬田益道、「Development of wide IF band Receiver of Submillimeter Telescope for simultaneous observation of CO and CI lines in 500GHz band」、宇宙史研究センター光量子計測開発部門ワークショップ、2022 年 3 月 22 日、(オンライン開催)
 31. 丹羽綾子、松尾 宏、江澤 元、田村友範、「1.5 THz photon counting detectors for Antarctic THz Intensity Interferometry」、宇宙史研究センター光量子計測開発部門ワークショップ、2022 年 3 月 22 日、(オンライン開催)
 32. 矢島義之、徂徠和夫、Dragan Salak、「スターバースト銀河 NGC1808 における巨大分子雲の性質 II. Atacama Compact Array による広がった分子ガスの有無の影響」、日本天文学会 2022 年春季年会、2022 年 3 月 2 日-5 日、(オンライン開催)
 33. 徂徠和夫、「低赤方偏移銀河の THz 帯観測」、南極天文ワークショップ「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」、2022 年 3 月 14 日、国立極地研究所とオンラインのハイブリッド開催

〈研究会開催実績〉

1. 国立極地研究所研究集会「南極から遠赤外線テラヘルツ波で探る宇宙」2022 年 3 月 14 日 (オンライン開催) 参加者 48 名

〈講演会開催実績〉

1. 第 12 回天文学の七夕講演会 2021 年 7 月 1 日 (オンライン開催) 参加者 90 名

〈外部委員〉

久野成夫

1. 日本天文学会年会開催地理事 2019 年 6 月 - 2021 年 5 月
2. 日本天文学会研究奨励賞選考委員会委員 2017 年 6 月 - 2021 年 5 月
3. 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 -
4. 日本天文学会 コンプライアンス委員会委員 2021 年 6 月 -
5. 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 -
6. 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. 次世代大型電波干渉計 ngVLA 日本国内科学検討チーム
2. 次世代大型単一鏡 LST 科学検討チーム

〈外部資金〉

1. 国立極地研究所 国立極地研究所研究集会：久野成夫 (研究代表者)「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」(交付金 18,9 万円)
2. 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」2019-2024 年度 (R3 交付金 200 万円) (3/5 年)
3. 科学研究費補助金 研究活動スタート支援：橋本拓也 (研究代表者)「成層圏赤外線天文台で暴く近傍銀河の電離光子放射メカニズム」(研究課題 20K22358) 2020 2021 年度 (R2 交付金 143 万円) (2/2 年)
4. 科学研究費基盤研究 (C)(一般)：徂徠和夫 (研究代表者)「星間ガス質量の高精度な導出とそれを用いた銀河の大局的星生成過程の定量的理解」2021-2023 年度 4,420 千円

〈受賞〉

橋本拓也

1. 令和 3 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 “電離酸素の輝線を用いた様々な最遠方銀河の観測的研究” 2021 年 4 月
2. 令和 3 年度 筑波大学 若手教員特別奨励賞

3. 2021 年度 日本天文学会 欧文研究報告論文賞 “Big Three Dragons: $z=7.15$ Lyman-break galaxy detected in [OIII] 88 μm , [CII] 158 μm , and dust continuum with ALMA”

〈その他特記事項〉

久野成夫

1. 関西学院大学、物理学特殊講義 XV、2021 年 9 月 6 日-7 日

橋本拓也

1. NHK BS コズミックフロント「すばるとアルマから 親愛なる宇宙へ」出演 5 月 27 日
2. 筑波大学 第 12 回天文学の七夕講演会「巨大望遠鏡で探る宇宙初期の銀河」7 月 1 日 (オンライン開催)
3. 九州工業大学の留学生向けの天文学授業 1 月 24 日 (英語 オンライン開催)
4. 10 月 7 日付の読売新聞朝刊 (全国紙) で「隠れ銀河：札幌ネイチャー」の論文について第三者としてコメント
5. 日本天文学会 会誌『天文月報』2021 年 2 月号 JWST 特集へ記事を寄稿
6. 日本天文学会 2021 年秋季年会 座長

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 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 テニユアトラック助教)

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) クロスアポイントメント教員

池上 陽一 (KEK 准教授) クロスアポイントメント教員

連携教員

松浦 周二 (関西学院大学 教授) 客員教授

佐藤 勇二 (福井大学 准教授) 連携教員

【人事異動】

浅野侑磨助教がセンター構成員として当部門に参加した (2021 年 10 月)。

吉田拓生教授がクロスアポイントメント教員を任期満了に伴いセンター構成教員ではなくなったが、引き続きセンター連携教員として当部門に参加する (2021 年 10 月)。

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、2022 年から開始する Run-3 運転に向けて、アップグレードのためのシャットダウン中となっていた。今後は Run-3 実験で、さらに多くの陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。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量子計測器開発部門のプロジェクトの一つとして密接な連携のもと進められている。

(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、2021 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 2 名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。

教 授 吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員, 福井大学)

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

吉田教授は、COVID-19 の影響により本学への来訪は出来なかったが、ニュートリノ崩壊探索のプロジェクトの共同研究者として、福井大が所有する世界に類を見ない遠赤外分子レーザーの強みを活かし、主にオンラインによるコミュニケーションを通じて、ニュートリノ崩壊光検出器・分光装置の校正用光源の検討に従事した。また 2022 年 3 月にセンター教員と大学院生が福井大学遠赤外領域開発研究センターを訪問し測定を行った際は、現地において当部門教員、本学大学院生と協働しての測定にあたった。池上准教授は、高エネルギー加速器研究機構において本部門教員と共に ATLAS 実験のシリコン検出器増強に従事し、当プロジェクトに参加する本学大学院生の指導をおこなった。

(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 年代半ばまで稼働を続け、より高い精度での研究を行う計画である。

2021 年度は、LHC 加速器と ATLAS 実験は、2022 年から始まる Run-3 運転に備え、アップグレードのためのシャットダウン中であつた。これまでに得られているデータを用いた様々な物理解析が進行中

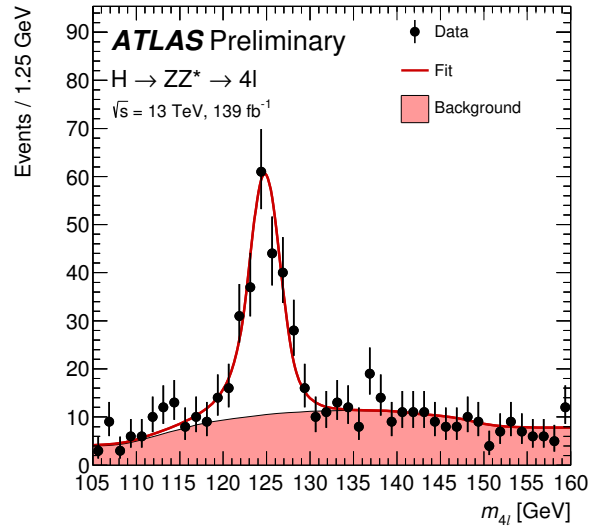


図 22 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ 崩壊チャンネルでの 4 つのレプトンの不変質量の分布。フィットの結果が赤線で示されている。赤く塗った領域は、バックグラウンドの寄与を表している。

である。ここではヒッグス粒子の精密測定、2 個のヒッグス粒子が同時に生成される物理過程の探索、標準理論を超えるヒッグス粒子の探索に絞って、物理解析の現状をまとめる。筑波大学グループでは、シリコンストリップ検出器の運転を行っており、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。

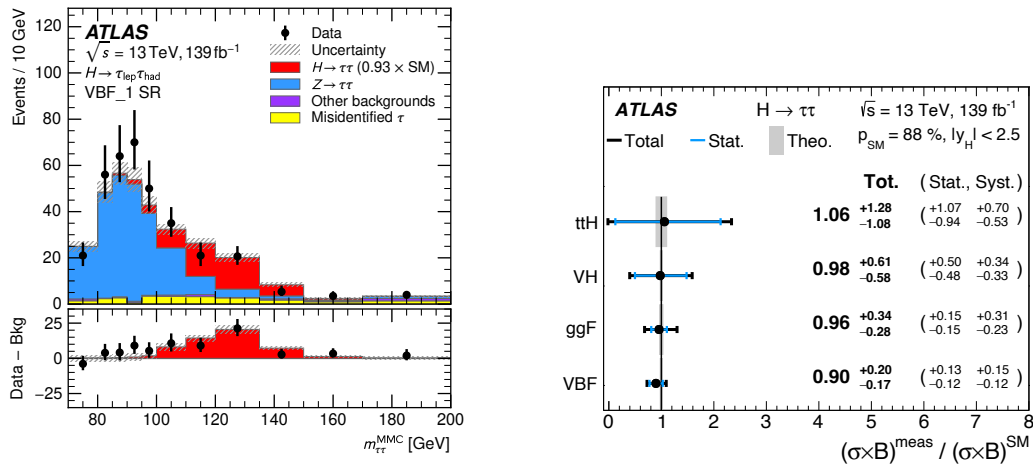


図 23 (左) ヒッグス粒子が VH またはベクトル・ボソン融合過程で生成され、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊したと考えられる候補事象での、2 個の τ 粒子の不変質量分布。(右) $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊事象を使って測定した 4 種類のヒッグス粒子生成過程の信号強度。どの過程の測定結果も、標準理論とよく一致している。

LHC-ATLAS 実験の状況と将来計画

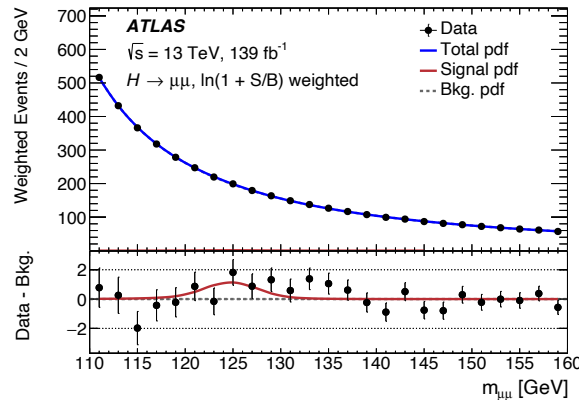


図 24 ATLAS 実験での $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析での 2 つの μ 粒子の不変質量分布。フィットで得られた信号とバックグラウンドの寄与を S と B とし、候補事象に $\ln(1 + S/B)$ の重みをかけてヒストグラムにした。下部パネルは、分布からバックグラウンドの寄与を差し引いた図である。

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り、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した。2020 年には、CERN は研究所の運営に必要最低限の人員のみに入構を絞った時期もあったが、2021 年度にはウィズ・コロナの生活形態の容認が広まるとともに、CERN における入構制限も平時に近づきつつある。

今回のシャットダウンで、ATLAS 実験では、加速器での瞬間ルミノシティの増強に伴うバックグラウンド・レートの増加に対応するためのトリガーのアップグレードを行っている。バックグラウンドとなる QCD ジェットをいままで以上に効率よく排除しながら電子とミュオンにトリガーをかけるために、カロリメータ・トリガー用電子回路と、超前方のミュオン・トリガー検出器のアップグレードが主な作業である。作業は概ね順調に進んでおり、本稿執筆中の 2022 年 6 月には、アップグレードしたシステムのコミショニングを行いながら Run-3 の陽子・陽子衝突に備えている最中である。

今後は、2022-2025 年に Run-3 実験を行い、重心系エネルギー 13.6 ～ 14 TeV でさらに 300 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。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。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。

ヒッグス粒子の精密測定

標準理論の最後の未発見粒子であったヒッグス粒子は、ATLAS および CMS 両実験により、2012 年に LHC 加速器での陽子・陽子衝突データを用いて発見された。LHC 実験での重要なテーマのひとつは、発見したヒッグス粒子の性質を詳しく測定し、標準理論を厳しく検証することである。ATLAS 実験では、ヒッグス粒子のさまざまな性質を、データの増加とともに精度を上げて測定を更新している。本節

では、ヒッグス粒子の精密測定のうち、重要な結果をいくつか紹介する。

2020 年春には、 139 fb^{-1} を解析した $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ 崩壊チャンネル単独の質量測定で、ヒッグス粒子の質量は $124.92^{+0.21}_{-0.20} \text{ GeV}/c^2$ と測定された。図 22 にこの解析での不変質量分布を示す。

ATLAS と CMS の解析結果をコンバインし、ヒッグス粒子の質量の世界平均は、 $125.25 \pm 0.17 \text{ GeV}/c^2$ が得られている。

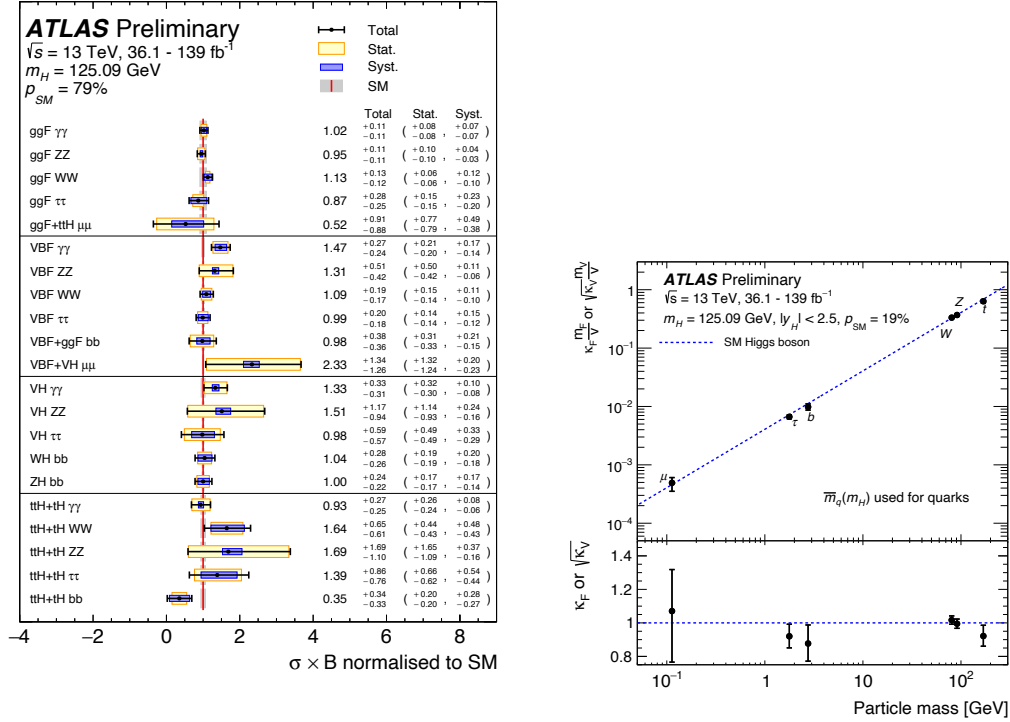


図 25 ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子測定の結果を総合的に解析した結果。(左) さまざまな生成・崩壊過程の組み合わせに対して測定された信号強度。(右) さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

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

ヒッグス粒子がゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$, $H \rightarrow WW^*$ の崩壊およびトップクォークのループ・ダイアグラムを介する $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊が、Run-1 データの詳細な解析により確認されていた。同じく Run-1 のデータ解析により、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊も ATLAS と CMS 両実験の複合結果で観測されたことで、Run-2 がはじまる前にはヒッグス粒子がフェルミオンと結合することが確認された。2018 年

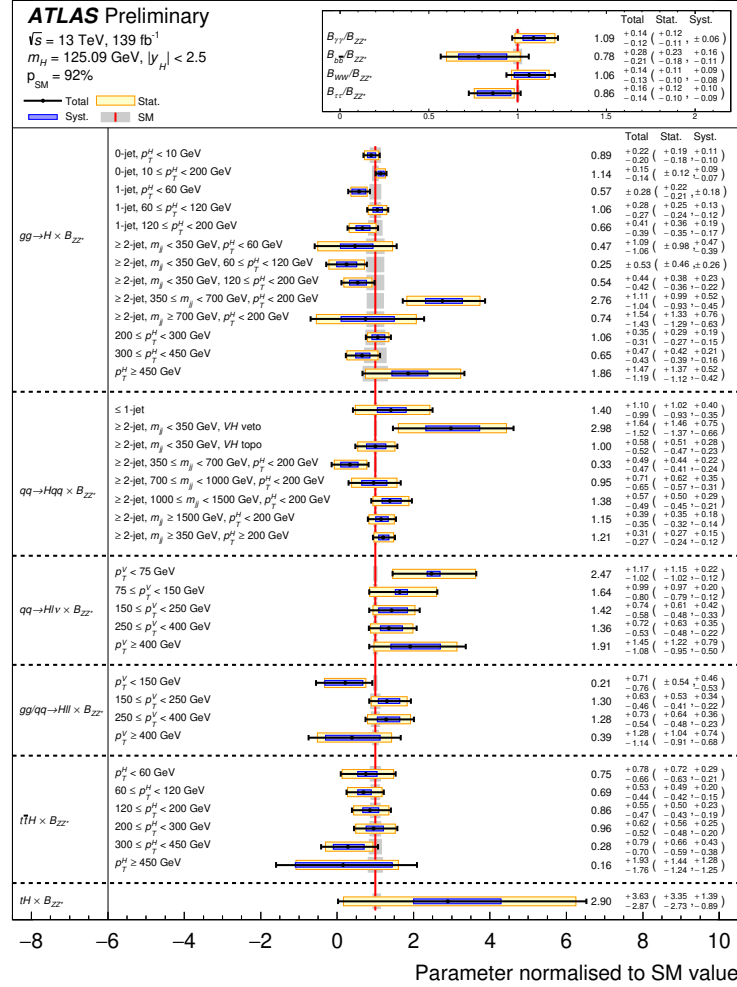


図 26 ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

度には、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する事象と、ヒッグス粒子がトップクォーク対と同時に生成される過程が、 5σ 以上の有意度でそれぞれ観測された。これらによりヒッグス粒子がクォークとも湯川結合することが確認され、LHCでの研究が難しいニュートリノを除いて、第3世代のフェルミオンとヒッグス粒子の間の結合がすべて確認できた。

すでに発見されているヒッグス粒子の生成・崩壊チャンネルをより精密に測定することで、標準理論を高い精度で検証することが重要である。2021年度には、重心系エネルギー13 TeVの 139 fb^{-1} のデータを用い、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊チャンネルの生成断面積測定をアップデートした。図23にヒッグス粒子が VH またはベクトル・ボソン融合過程で生成され $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊した事象の2個の τ 粒子の不変質量分布と、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊した事象を解析することで得られたさまざまなヒッグス粒子生成過程の信号強度を示す。重心系エネルギー13 TeVの陽子・陽子衝突における $pp \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$ 過程の生成断面積は、 $2.65 \pm 0.41 \text{ (stat)}^{+0.91}_{-0.67} \text{ (syst)} \text{ pb}$ と測定された。この値は、標準理論の予言値 $3.17 \pm 0.09 \text{ pb}$ とよく一致している。

LHCでは、第2世代のフェルミオンの質量の起源もヒッグス粒子であることを確かめるべく、研究に

取り組んでいる。2020 年に ATLAS 実験では、 139 fb^{-1} のデータを用いた $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析を公表した。この解析では、 $t\bar{t}H$ 、 VH 、グルーオン融合、ベクトル・ボソン融合の 4 つのヒッグス粒子生成過程を個別に解析し、最後に統一的に統計解釈することで解析感度を最適化した。図 24 に、すべての生成過程の解析チャンネルを複合した 2 つの μ 粒子の不変質量分布を示す。信号強度 μ は、 $\mu = 1.2 \pm 0.6$ と測定され、 $H \rightarrow \mu\mu$ 信号の有意度は 2σ であった。標準理論の予言値の 2.2 倍より大きい信号強度を 95% の信頼度で棄却した。 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程は、CMS 実験でも 2020 年に探索結果を公表し、 3σ の有意度で信号の兆候が確認されたと報告されている。Run-3 でデータを増やし、測定精度を向上していくことが重要である。

ATLAS 実験では、ここまで述べてきた通り、さまざまなヒッグス粒子の生成・崩壊過程を個別に測定し、標準理論の予言と比べている。同時に、これら複数の解析チャンネルでの測定結果を総合的に解析することで、より精度よくヒッグス粒子と他の標準理論の粒子の間の結合の強さを測定することができる。2021 年度には、 139 fb^{-1} のデータを用いた複合測定による結合測定をアップデートした。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 ZZ^* 、 WW^* 、 $\tau\tau$ 、 $b\bar{b}$ 、 $\mu\mu$ 、 $Z\gamma$ および、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊過程の探索の各チャンネルの解析で得られた結果を同時にフィットすることで、ヒッグス粒子に関する重要な物理パラメータを解析した。2020 年の複合結果から、 $H \rightarrow Z\gamma$ 過程の解析結果が新たにコンパインに加わった。図 25 に、得られたフィットの結果を示す。左の図は、全解析の結果を同時にフィットすることで、さまざまなヒッグス粒子の生成過程と崩壊過程の組み合わせに対して、信号強度を測定した結果である。信号強度は生成断面積と崩壊分岐比の積を標準理論の予言値で規格化した量と定義しているの、標準理論の予言値は図中では 1 である。右の図は、さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合を測定した結果である。ヒッグス粒子のさまざまな粒子への結合の測定結果は、いまのところ標準理論とよく一致している。解析に使用できるデータ量が増加したことで、いままでよりも詳しくヒッグス粒子の生成過程を測定できるようになってきている。ヒッグス粒子の生成過程をいくつかの運動学的な領域に分割し、それぞれの領域での生成断面積を、さまざまなヒッグス粒子の崩壊過程での測定を同時にフィットすることで測定した結果が図 26 である。運動学的な領域の分割は、多くの場合ヒッグス粒子または随伴する粒子の運動量によって定義している。結果は、標準理論の予言とよく一致している。

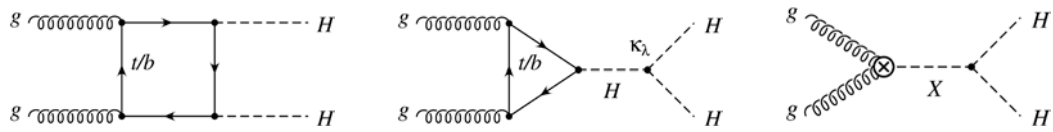


図 27 LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

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

ATLAS 実験では 36 fb^{-1} 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、 $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 、 $HH \rightarrow W^+W^-W^+W^-$ 、 $HH \rightarrow W^+W^-\gamma\gamma$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$

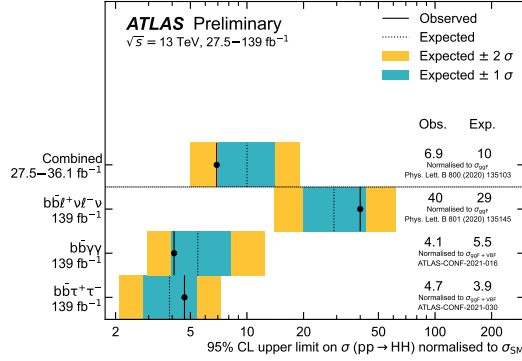


図 28 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。

の各崩壊モードで探索した解析結果を 2019 年に公表していた。その後、Run-2 の全 139 fb⁻¹ のデータを解析して 2 ヒッグス事象の探索解析をアップデートしているところである。2020 年には $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$ 解析を、2021 年には $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ および $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ の解析をアップデートした。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。図 28 にこれら解析で得られた 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限を示す。 $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ と $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ のそれぞれの解析チャンネルでは、すでに単独で 36 fb⁻¹ を使用した全解析をコンバインした結果よりも高い感度で探索がなされている。他の解析チャンネルも現在 Run-2 全データを使って解析を行っており、それら結果が揃った段階で、新しく全チャンネルのコンビネーションが行われる予定である。多くのデータを蓄積し、2 ヒッグス事象の発見と、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り、Run-3 とそれに続く HL-LHC での重要課題である。

標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

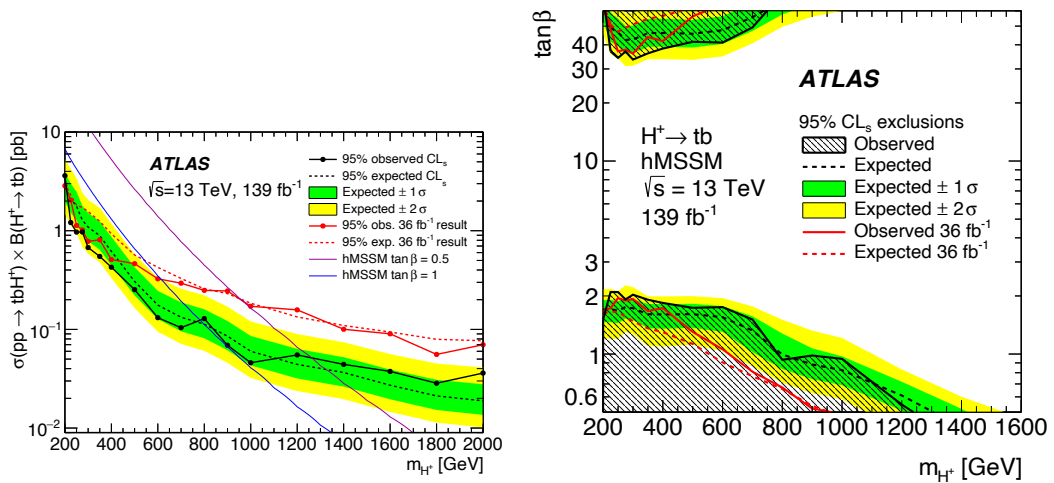


図 29 $H^\pm \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索結果。比較のために 36 fb⁻¹ のデータによる結果を赤線で示している。(左) 荷電ヒッグス粒子の質量の関数として得られた生成断面積の上限値。(右) hMSSM シナリオに対する制約。

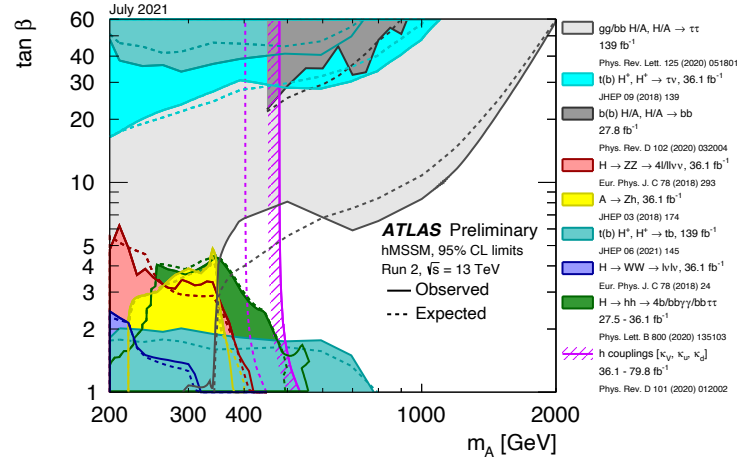


図 30 ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

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

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

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。この解析で得られた生成断面積の上限と h_{MSSM} シナリオのパラメータに対する棄却域を図 29 に示す。

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 30 である。

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。したがって、様々なデータを使ってシリコンセンサーの現在の状態を詳細に理解しておくことは、これからはじまる Run 3 運転にむけて重要なインプットとなる。

ATLAS 実験の環境において、SCT センサーに入射する粒子の多くは陽子または中性子であるため、シ

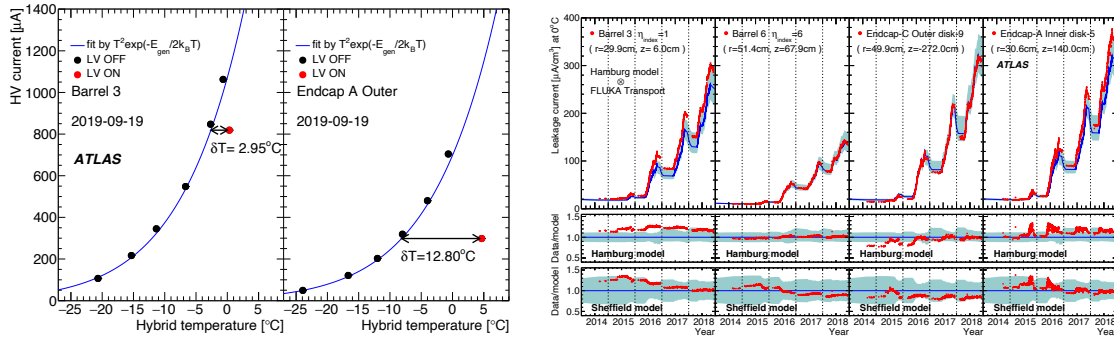


図 31 (左) モジュール上で測定された温度 (Hybrid temperature) と漏れ電流 (HV current) の関係を測定した結果。左はバレル部、右はエンドキャップ部の、それぞれ代表的なモジュールにおける測定結果を示す。黒点は ASIC に対する電圧 (LV) が OFF の状態で測定した結果、赤点は典型的な SCT 運転時の冷却温度において LV が ON の状態で測定した結果に対応する。(右) 温度 0°C に換算した漏れ電流の、2014 年から 2018 年までの時間経過。放射線量や形状が異なる 4 個のモジュールにおける結果を示す。赤点がデータによる実測値、エラーバンド付きの青線はハンブルグモデルにもとづいた予測値である。Run 2 運転におけるデータ収集が本格化した 2016 年以降、最大で毎年約 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ずつ漏れ電流が上昇していった様子がわかる。

リコンセンサーのバルク部に作られる講師欠陥が、主要な放射線損傷の寄与であり、特に漏れ電流が増大する。漏れ電流は温度に非常に敏感なため、その正確な測定にはセンサー温度の情報も重要であるが、SCT 運用中は信号処理用 ASIC などからの発熱により、シリコンモジュール上で測定される温度 (モジュール温度, T_{mod}) は真のセンサー温度 (T_{sensor}) よりも高くなる。そこで、以下の手法によりモジュール温度とセンサー温度の温度差 δT を見積もった。測定結果を図 31(左) に示す。

- ASIC への電源を切り、シリコンセンサーにバイアス電圧をかける。このとき、ASIC からの発熱がないため、 $T_{\text{mod}} = T_{\text{sensor}}$ とみなせる。
- SCT の冷却温度を約 -20°C から約 0°C まで変えながら、モジュール温度と漏れ電流との関係を測定する。これにより、図 31(左) 中に青線で示された関係が得られる。
- ASIC への電源を入れて発熱させる ($T_{\text{sensor}} < T_{\text{mod}}$)。一定時間経過して熱平衡状態になった後、再度モジュール温度と漏れ電流の関係を測定する。

この測定は、LHC が停止している時間を利用して行う。よって測定中の放射線量はゼロであるため、新しい放射線損傷が生じることはなく、したがって漏れ電流はシリコンセンサーの温度によってのみ決まる。よって、図 31(左) の青を使うことで、漏れ電流から T_{sensor} を逆算でき、温度差 $\delta T = T_{\text{mod}} - T_{\text{sensor}}$ が決まる。SCT 運用中は T_{mod} のみがモニターされていたわけだが、本手法で求めた δT を使うことで、対応する T_{sensor} が求められるようになり、さらにそこから 0°C に換算した漏れ電流を正確に計算し、様々な比較をすることが可能になった。 0° 換算した漏れ電流の、Run 2 運転中の推移を示したものが図 31(右) であり、ハンブルグモデルと不定性の範囲で一致し、漏れ電流の特性がよく理解できていることが示された。

SCT で使われているシリコンストリップセンサーは、 n 型シリコンでできたバルク部にアクセプターを打ち込んで p 型ストリップを形成した構造である。バルク損傷が進むと、実効的なアクセプター濃度が上昇してバルクが p 型に“型変換”を起こし、型変換後には印加電圧に応じて裏面からストリップ側に向かって空乏化が進むようになる。現在の SCT は既にすべてのセンサーが型変換を起こしていると考えられ、したがって常に完全空乏化電圧よりも十分に高いバイアス電圧を印加しなければ、荷電粒子

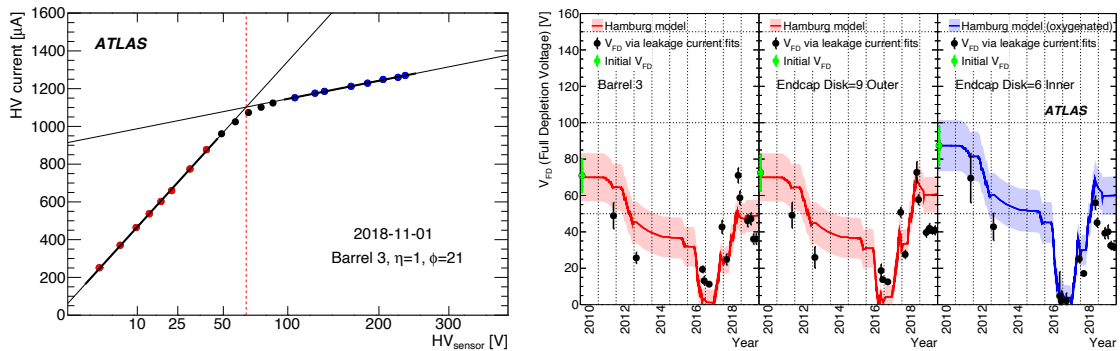


図 32 (左) 漏れ電流 (HV current) のバイアス電圧 (HV_{sensor}) 依存性の一例。赤丸および青丸で示されたそれぞれの区間でフィットした直線同士の交点 (赤点線) の値を、完全空乏化電圧の見積もりとする。(右) 見積もられた完全空乏化電圧の、2010 年から 2019 年までの時間経過。放射線量や形状が異なる 3 個のモジュールにおける結果を代表例として示す。黒点が実測値、エラーバンド付きの赤もしくは青線はハンブルクモデルにもとづいた予測値である。

検出効率が低下してしまう。今後始まる Run 3 運転では、放射線量に応じて完全空乏化電圧が上昇していくため、現在の状態や今後の推移を正確に予測しておくことは、SCT の安全な Run 3 運転に向けて重要となる。完全空乏化電圧 V_{FD} は、図 32 に示すような漏れ電流のバイアス電圧依存性から見積もられる。漏れ電流は空乏化した体積に比例するため、低電圧領域 ($V < V_{\text{FD}}$) では、漏れ電流が線形で増加する。バルク部が完全に空乏化した後は、それ以上空乏層体積は増えないため、一定値を取る（実際には表面電流の増加により、緩やかに上昇する）。したがって、図 32 (左) に見られる漏れ電流の増加傾向の変化点から、 V_{FD} の値を推定することができる。

このようにして見積もった完全空乏化電圧の時間発展を図 32 (右) に示した。データによる測定値は、ハンブルクモデルで予測された完全空乏化電圧の増加および減少傾向に追従しており、2016 年ごろに起きた型変換による完全空乏化電圧も、測定結果によく表れている。一方で、2018 年終わりから 2019 年初めにかけての完全空乏化電圧の減少傾向が実データでかなり大きく出ている点など、予測と一致しない点も見受けられる。これらの違いについて、現在も詳細な解析を続けている。

これら一連の、シリコンストリップセンサーに対する放射線損傷にかんする研究に加え、Run 2 運転中におけるデータ収集システムの改良や高輝度環境への対応をまとめた論文が、2022 年 1 月に Journal of Instrumentation より出版された。

2019 年から 3 年間続いた長期シャットダウン期間中は終わりに近づき、2021 年終盤にはいよいよ Run 3 運転 (2022–2025 年) に向けた、ATLAS 検出器全体でのコミッショニングが始まった。11 月には、LHC のビームを ATLAS 検出器上流のコリメータに意図的に衝突させ、大量の二次粒子を ATLAS 検出器全体に入射させる「ビームスプラッシュ」が実施された (図 33)。これは、検出器各パートの動作確認や、信号タイミングの同期確認などのために行われる。このとき SCT は、大きな信号電流による破損を防ぐため、電源を落とした安全な状態に維持されていたが、ATLAS 検出器 Run 3 運転にむけた、非常に重要なマイルストーンとなった。

この長期シャットダウン期間中、SCT に対する大きなアップグレードは行っておらず、Run 2 運転終了時の状態をほぼそのまま Run 3 に引き継ぐ。ただし、故障部品の交換や、ATLAS 中央データ収集システムとのインタフェースを担うボードの更新、シリコンモジュールと後段信号処理ボードとの間の配線変更など、細かい改良や変更があったため、ATLAS 検出器コミッショニング初期にその正常な動作を確認する必要がある。現在は、主に宇宙線信号による SCT の基礎性能や動作チェック、他検出器と

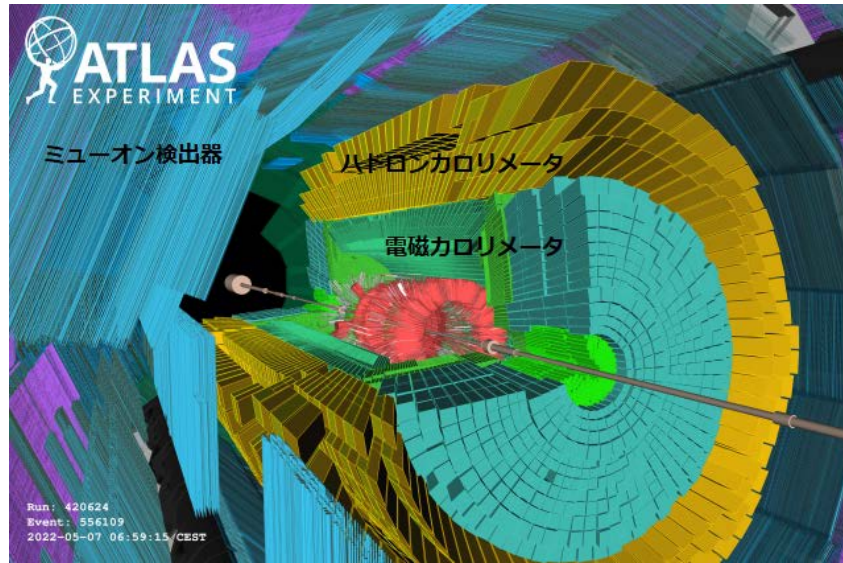


図 33 ビームブラッシュ時のイベントディスプレイ。ミューオン検出器やカロリメータのほぼすべてのチャンネルにおいて、二次粒子に由来する信号が検出されている。

の同期状態の確認が進められている。

(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 実験は、筑波大学宇宙史研究センター素粒子構造部門を中心とする国際共同プロジェクトであり、現在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（ $\Delta = 20$ μ eV, $T_c = 0.165$ K）を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。これらの超伝導体を用いた検出器の開発、及び SOI 技術を用いた超伝導体検出器の極低温信号読出系の開発は、光量子計測器開発部門のプロジェクトの一つとして当部門との密接な連携のもと進められている。これらの開発状況の詳細については、光量子計測器開発部門の報告に「COBAND 実験 遠赤外域光検出器の開発」プロジェクトとして記載されているので、ここでは割愛し、以下ではロケット実験に向けたその他の取り組みについて報告する。Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が実現すれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。ロケット実験に向けた望遠鏡の光学系及び Nb/Al-STJ による分光測定のための回折格子を含むロケット実験用の光学系の開発も福井大、関西学院大等との共同研究により進められている。これまでの成果として、波動光学シミュレーションに基づいた 50 μ m 域回折格子設計・製作、及び福井大の遠赤外線分子レーザ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 STJ 素子表面に施す反射防止膜として 10 ミクロン厚単結晶シリコン薄膜の試作を行った。

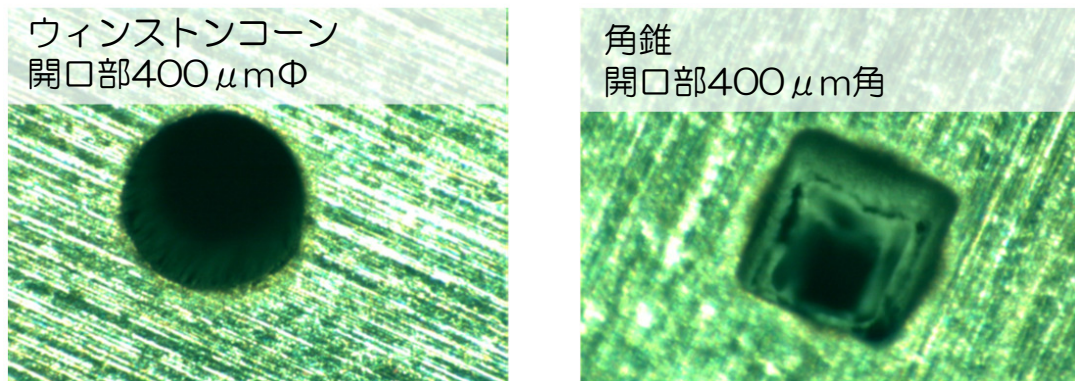


図 34 光学シミュレーションの計算に基づき設計され、レーザーアブレーション法によりアルミ板に形成されたサブミリサイズ集光器試作品の拡大写真。

2021 年度における成果としては、反射防止膜最適化のため Nb や Hf 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・可視光 (波長 465 nm) 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。また、望遠鏡光学系によって集光された光は、回折限界により焦点位置で 400 ミクロンΦの広がりを持つが、これを 40 ミクロン角 STJ 表面に集めるための集光器の試作を行った (図 34)。福井大遠赤外センターの遠赤外分子レーザー装置 (波長 47.6 μm , 118.8 μm) を用いた室温環境下での集光器・反射防止膜・Nb 光学定数測定を 2022 年 3 月に実施している。

(3) 超弦理論の研究 (石橋, 伊敷, 浅野, [大学院生: 渡辺, 足立, 菅野])

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, 行列模型における重力理論と宇宙論的重力解, BFSS/BMN 行列模型の数値計算, flag state を用いた弦の場の理論の摂動的真空解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な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るが, この方法は非常に限られた状況においてのみしかこれまで理解されていなかった。特に, 弦や 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った。伊敷と大学院生の足立, 菅野は Dublin 高等研究所 (アイルランド) の松本高興研究員とともにこの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。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プラシアンも行列を用いて記述できるようになった (論文 78, 79)。この結果により, 行列模型と弦理論のより深い関係が得られると期待される。

行列模型における重力理論と宇宙論的重力解

これまで知られている摂動的に定式化された超弦理論には重力が無矛盾に含まれていることが知られているが, 超弦理論を非摂動的に定式化すると予想されている行列模型においては, 重力を満足のいく形

で記述することが難しく、行列模型を出発点とした重力理論の実現は長年研究されてきた重要課題の一つである。この問題を解決するために行列模型から重力理論を導出するフレームワークはいくつか提案されている。そのうちの一つとして $SO(4,2)$ 対称性を備えた 4 次元の重力理論を導くものがあり、この重力理論では天文学的長さスケールで変形重力になることが近年示された。浅野はウィーン大学の Harold Steinacker 研究主幹と共同でこの重力理論を研究し、静的で球対称な一般解を導いた (論文 80)。特に、得られた一般解にはワームホールの重力解も含まれており、興味深い物理が内包されていることが分かった。

BFSS/BMN 行列模型の数値計算

BFSS 行列模型やその 1 パラメータ変形である BMN 行列模型は 0+1 次元の超対称 Yang-Mills 理論であり、ゲージ/重力対応を通じて IIA 型超重力理論との双対関係が予想されている。この文脈において、有限温度系の行列模型が格子モンテカルロ計算により数値的に解析されてきたが、従来では非閉じ込め相が精力的に調査され、ゲージ/重力対応の正当性を示す結果が得られてきた。渡辺は、ドイツ Regensburg 大学の Norbert Bodendorfer 研究員やイギリス Surrey 大学の花田政範研究員をはじめとした Monte Carlo String/M-theory Collaboration (MCSMC) のグループでの数値計算により、これまで数値的に確認されてこなかった閉じ込め相が出現することを発見した (論文 81)。この閉じ込め相の存在は、前述のゲージ/重力対応に加え、超弦理論の背後に存在する非摂動的定式化として予言されている M 理論と行列模型との間の関係性 (BFSS 予想) に基づいて考察することで、行列模型が M 理論を記述するパラメータ領域に到達した可能性を示唆している。今後さらに行列サイズを上げた数値解析を実施して閉じ込め相の性質を調べた際に、M 理論の物理現象を真に捉えているかを判定する方向性についても同論文で提案した。

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実現が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、金児隆志准教授、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、理化学研究所の筒井翔一郎研究員、横田猛研究員らとともに、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。この数値的手法が適用できるパラメータ領域にはある程度制限があることが分かっているが、本年度における研究の進展により、スタaggered フェルミオンと Wilson フェルミオンそれぞれにおける適用可能範囲がより詳細に解明された (論文 82)。また、カラー超伝導の相転移温度の理論的及び数値的決定にも進展があり (論文 83, 84)、カラー超伝導相の存在の実証に向けた研究が着実に進行している。

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。この問題に対して、弦理論の定式化の一つとされる行列模型を用いてアプローチしようという試みがある。行列模型には当然 NS5 ブレーンも含まれているはずであるが、先行研究により、上述の BMN 行列模型には NS5 プレーン

ンを記述する極限が存在することが予想されていた。伊敷，浅野，渡辺は松本研究員とともに，この行列模型の数値解析を行い，ある物理量の値が提案されている極限の下で有限値に収束することを確かめた。これは NS5 プレーンを記述する極限が本当に存在することの強い証拠を与えている。

基本スカラー場を含む模型の部分閉じ込めの研究

部分閉じ込めは，ラージ N ゲージ理論での非閉じ込め相転移の過程で閉じ込め領域と非閉じ込め領域が共存する二相共存現象として発見された。この現象は，ゲージ/重力対応を通じて，重力理論におけるブラックホールの生成/蒸発現象と双対だと予想されている。これまで弱結合な理論の解析的計算や行列模型の数値計算の研究により，部分閉じ込めを引き起こす系を具体的に構成し，その性質を明らかにする方法論の確立が進められてきた。渡辺は，これまで部分閉じ込めが起こる簡単な系として解析されてきた Gaussian 行列模型に N_f 個の基本スカラー場を導入した自由場の模型を解析的・数値的に調べた。そして，カノニカル分布で熱力学的に安定な相として部分閉じ込めが実現する系であることを示し，その性質を調査した。今後さらに相互作用項を加えた非自明な設定に格上げし，模型の相構造の解明と相互作用の存在に寄らずに部分閉じ込めが中間相で発生するかを検証する。

flag state を用いた弦の場の理論の摂動的真空解

弦の場の理論は，弦理論に含まれる無限個の粒子の作用・運動方程式を比較的簡単な形に書くことができ，弦理論の非摂動的な定式化として期待されている。最近，Witten 型の弦の場の理論において，flag state と呼ばれる状態を用いてかなり一般的な運動方程式の解を求める方法が提案された。安藤は，この flag state を用いた真空解について調べ，通常の真空解とは異なる性質を持つことを指摘した。

Kaku 模型における古典解

弦の場の理論には様々な定式化が知られており，最近それら相互の関係がホモトピー代数の手法を用いて議論されている。特に，Erler と松永は Witten 型の弦の場の理論と光円錐型の弦の場の理論の間の関係を，それらの間をつなぐ Kaku 模型と呼ばれる理論を用いて明らかにした。安藤は Kaku 模型を調べ，その古典運動方程式の解が Witten 型の弦の場の理論の運動方程式の解から求めることができることを示した。

弦の場の理論と JT gravity

最近，非臨界次元の弦の理論のある極限が JT gravity と呼ばれる 2 次元の重力理論で記述できることがわかってきた。JT gravity は AdS/CFT との関係から最近非常に活発に議論されている。石橋は，JT gravity と非臨界弦を記述する行列模型との間の関係を調べ，JT gravity の確率過程量子化を用いた定式化を導き出した。

(4) ガドリニウム含有シンチレータを用いた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 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

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。

各種 GAGG 結晶のシンチレータ性能比較本研究ではまず、東北大学金属材料研究所の Cz 炉を活用し、組成がわずかに異なる下記 3 種類の GAGG 結晶について 5mm 角のものを作製した。実際の結晶写真を図 35 に示す。

- GAGG : 通常の組成
- HR-GAGG : Ga/Al 比を変えて、エネルギー分解能を高めたもの
- GFAG : Mg を共添加し、時定数を短くしたもの

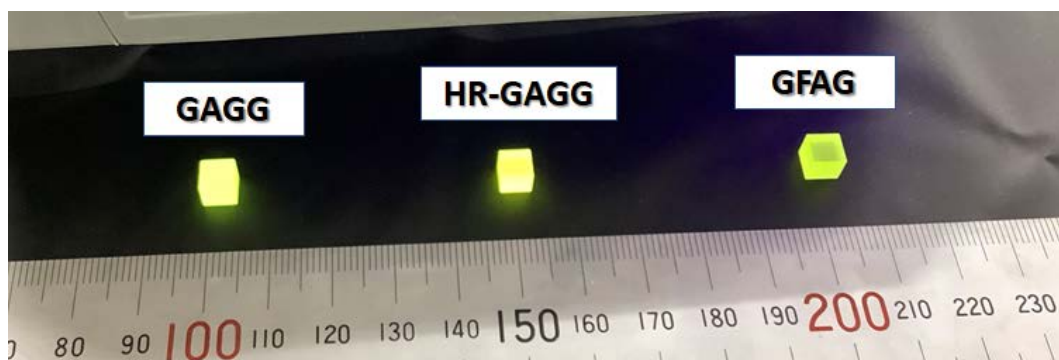


図 35 左から実験で用いた GAGG, HR-GAGG, GFAG の各結晶。上方からブラックライトを照射している。

この三種の結晶に対して、浜松ホトニクス製の R669 というマルチアルカリ光電面を持つ PMT と組み合わせて性能評価を行った。 ^{137}Cs の 662 keV γ 線を用いたエネルギー分解能測定および ^{137}Cs / ^{241}Am の γ 線 / α 線を用いた波形粒子識別能を調査した。

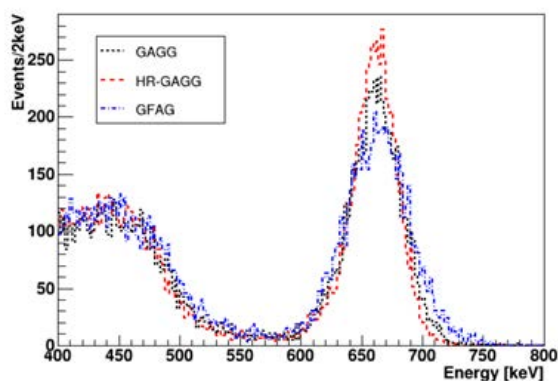


図 36 三種の結晶に Cs 線源を照射した時の、光電ピーク付近のエネルギースペクトル。

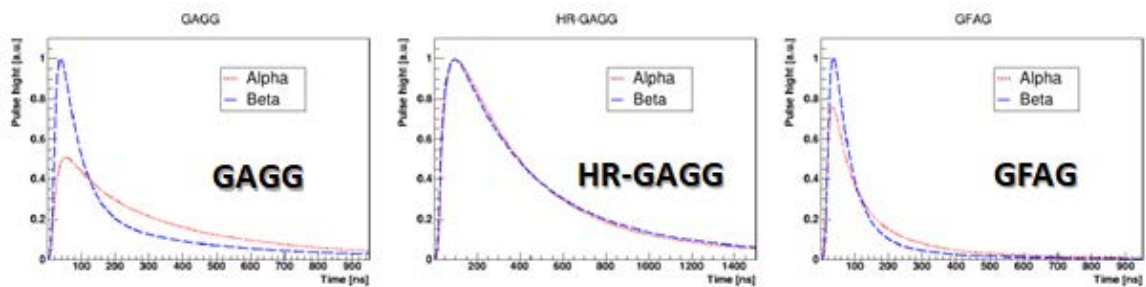


図 37 三種の結晶毎の平均波形。アルファ線照射時が赤，ガンマ線照射時が青で描かれている。

三種の結晶に対し ^{137}Cs の 662 keV γ 線を照射した際のエネルギースペクトルを図 36 に示す。光電ピークをガウス分布+指数関数でフィットしてエネルギー分解能を見積もった。その結果，赤線で示す HR-GAGG が $\sigma=2.5\%$ と最も良い分解能を示し，その次に GAGG ($\sigma=3.0\%$)，GFAG ($\sigma=3.4\%$) という順番になった。 ^{137}Cs と ^{241}Am 線源を照射した際の事象に対して作成した平均波形を図 37 に示す。結晶の種類によって粒子ごとの波形が大きく異なっていることが分かる。波形前半と全体の面積比の情報を用いて粒子識別能を定量的に評価したところ，結晶毎の波形識別能は GAGG，GFAG，HR-GAGG の順で優れていた。

大型 GFAG 結晶を用いた放射性不純物量の評価 6.5 cm $\phi \times$ 14.5 cmL の大きな GFAG 結晶 (図 38 左) の育成を行い，その性能を評価した。そのため側面に反射材を巻く，アクリルのライトガイドを用いる，などして集光効率を高めた検出器を作製した。内部の放射性不純物によるバックグラウンドを測定するため，この検出器を岐阜県神岡にある地下 1000m の実験室において宇宙線の影響の少ない低バックグラウンド環境下で測定を行った。東北大学カムランド実験エリアにある放射線シールド (厚さ：鉛 15cm, 銅 5cm) 内に検出器を設置し，約 12 時間のデータ取得を行った (図 38 右)。



図 38 (左) 金研で作製した大型 GFAG 結晶に反射材のテフロンテープを巻いているところ。(右) 神岡地下実験室の鉛シールドで 7 月に行った実験の様子。

まず大型の結晶において，エネルギー分解能は $\sigma=5.7\% @ 662 \text{ keV}$ を実現し，これは先行研究の小さいサイズの GSO 結晶を用いた実験と比較して良い分解能であった。また，地上から地下へ検出器を移しシールド内に設置することにより，バックグラウンドを低減できることを確認した。図 39 左は，つくば (地上) および神岡 (地下) で行ったバックグラウンド測定のエネルギースペクトルである。赤の地

上実験に比べ、青い地下実験でのスペクトルには環境 γ 線のピーク (^{40}K , ^{208}Tl etc.) が消えて、全体的にバックグラウンドレートが下がっていることが分かる。特に ^{208}Tl 由来の γ 線 (2615 keV) に関しては、地上のレートと比べ、実に 1/30 に低減することが出来た。また、地下で取得したデータに対し、ウラン/トリウム系列の放射性不純物量を詳細に調査した。 ^{238}U および ^{232}Th の崩壊系列には、どちらも Bi-Po の β - α 連続崩壊が存在し、その半減期はそれぞれ 164 μs , 0.3 μs である。典型的な Th 系列の連続崩壊事象の例を図 39 右に示す。この連続崩壊事象の発生頻度を測定することにより、それぞれの不純物レベルを測定したところ、以下の結果が得られた。

- ウラン系列 : 約 0.4 mBq/kg
- トリウム系列: 約 40 mBq/kg

よって本研究で用いた GFAG 結晶は Th 系列の放射性不純物によって汚染されており、二重ベータ崩壊実験に用いるためには、これを約二桁低減する必要があることが判明した。今後、高純度な材料を手し、それを用いた結晶育成を行っていく予定である。

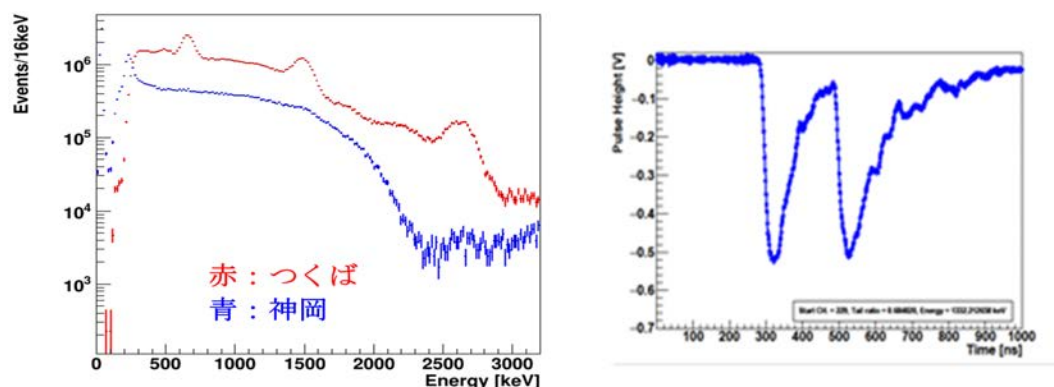


図 39 (左) 大型結晶を用いた実験で得られたバックグラウンドデータ。赤は地上、青は地下で行った実験である。(右) Th 系列の Bi-Po 連続崩壊事象と思われる波形の例。

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、論文の発表も終幕を迎えつつある。2021 年には 1 篇の原著論文が公表された。また、 W ボゾンの精密測定などのいくつかのテーマで解析が継続されている。

〈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で掲載した。

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Measurement of the charge asymmetry of electrons from the decays of W bosons produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$," *Phys. Rev. D* **104**, 092002 (2021)
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the jet mass in high transverse momentum $Z(\rightarrow b\bar{b})\gamma$ production at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ using the ATLAS detector," *Phys. Lett. B* **812**, 135991 (2021)
3. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement

- of the relative $B_c^\pm/B^\pm$ production cross section with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *Phys. Rev. D* **104**, 012010 (2021)
4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Longitudinal Flow Decorrelations in Xe+Xe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 122301 (2021)
 5. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ process via vector-boson fusion production using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 108 (2020) [erratum: *JHEP* **01**, 145 (2021); erratum: *JHEP* **05**, 207 (2021)]
 6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP -violating phase ϕ_s in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 342 (2021)
 7. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Higgs boson production cross-section measurements and their EFT interpretation in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 957 (2020) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 29 (2021); erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 398 (2021)]
 8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair single- and double-differential cross-sections in the all-hadronic channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 033 (2021)
 9. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new non-resonant phenomena in high-mass dilepton final states with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 005 (2020) [erratum: *JHEP* **04**, 142 (2021)]
 10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-section measurements for the electroweak production of dijets in association with a Z boson in proton–proton collisions at ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 163 (2021)
 11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in association with a W boson in the single-lepton channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 720 (2021)
 12. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet energy scale and resolution measured in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 689 (2021)
 13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of WH and ZH production in the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay channel in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 178 (2021)
 14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **812**, 135980 (2021)
 15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of hadronic event shapes in high- p_T multijet final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 188 (2021)
 16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of the universality of τ and μ lepton couplings in W -boson decays with the ATLAS detector,” *Nature Phys.* **17**, 813–818 (2021)
 17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the associated production of a Higgs boson decaying into b -quarks with a vector boson at high transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **816**, 136204 (2021)
 18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of light-by-light scattering and search for axion-like particles with 2.2 nb^{-1} of Pb+Pb data with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 050 (2021)
 19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for type-III seesaw heavy leptons in dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 218 (2021)
 20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Medium-Induced Modification of Z -Tagged Charged Particle Yields in Pb+Pb Collisions at 5.02 TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 072301 (2021)
 21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Optimisation of large-radius jet reconstruction for the ATLAS detector in 13 TeV proton–proton collisions,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 334 (2021)
 22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a pair of Z bosons in the $\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ and $\ell^+\ell^-\nu\bar{\nu}$ final states using 139 fb^{-1} of proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 332 (2021)

23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for phenomena beyond the Standard Model in events with large b -jet multiplicity using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 11 (2021) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 249 (2021)]
24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of scalar leptoquarks decaying into first- or second-generation leptons and top quarks in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 313 (2021)
25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged-lepton-flavour violation in Z -boson decays with the ATLAS detector,” *Nature Phys.* **17**, 819-825 (2021)
26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of photon-induced W^+W^- production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **816**, 136190 (2021)
27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Dark Matter Produced in Association with a Dark Higgs Boson Decaying into $W^\pm W^\mp$ or ZZ in Fully Hadronic Final States from $\sqrt{s} = 13$ TeV pp Collisions Recorded with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 121802 (2021)
28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson production in association with a high-energy photon via vector-boson fusion with decay into bottom quark pairs at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 268 (2021)
29. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 139 fb^{-1} of $\sqrt{s}=13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 143 (2021)
30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with an energetic photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 226 (2021)
31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a heavy Higgs boson decaying into a Z boson and another heavy Higgs boson in the $\ell\ell b\bar{b}$ and $\ell\ell WW$ final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 396 (2021)
32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs bosons decaying to bottom quarks from vector boson fusion production with the ATLAS experiment at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 537 (2021)
33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Displaced Leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 051802 (2021)
34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a single top quark in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 860 (2021)
35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for trilepton resonances from chargino and neutralino pair production in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **103**, 112003 (2021)
36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Exclusive dimuon production in ultraperipheral Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. C* **104**, 024906 (2021)
37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Muon reconstruction and identification efficiency in ATLAS using the full Run 2 pp collision data set at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 578 (2021)
38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with top quark pairs in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 174 (2021)
39. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 600 (2021) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 956 (2021)]
40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS Fast TracKer system,” *JINST* **16**, P07006 (2021)
41. 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 from ATLAS measurements of differential $W^\pm$ and Z boson production in association with jets,” *JHEP* **07**, 223 (2021)
42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Two-particle azimuthal correlations in photonuclear ultraperipheral Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. C* **104**, 014903 (2021)

43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of third-generation scalar leptoquarks decaying into a top quark and a τ -lepton in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 179 (2021)
44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly and singly charged Higgs bosons decaying into vector bosons in multi-lepton final states with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **06**, 146 (2021)
45. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with b -jets and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **05**, 093 (2021)
46. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with two opposite-charge leptons, jets and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **04**, 165 (2021)
47. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons decaying into a top quark and a bottom quark at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 145 (2021)
48. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with an energetic jet and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **103**, 112006 (2021)
49. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS RPC detector and Level-1 muon barrel trigger at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JINST **16**, P07029 (2021)
50. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances decaying into photon pairs in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **822**, 136651 (2021)
51. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross-sections in four-lepton events in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 005 (2021)
52. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom-squark pair production in pp collision events at $\sqrt{s} = 13$ TeV with hadronically decaying τ -leptons, b -jets and missing transverse momentum using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **104**, 032014 (2021)
53. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for Higgs boson decays to a low-mass dilepton system and a photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **819**, 136412 (2021)
54. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $W^+W^- + \geq 1$ jet production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 003 (2021)
55. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with four or more charged leptons in 139 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 167 (2021)
56. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the inclusive and differential production cross sections of a top-quark–antiquark pair in association with a Z boson at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, 737 (2021)
57. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the decays of stopped long-lived particles at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 173 (2021)
58. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in events with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into two photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 013 (2021)
59. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for New Phenomena in Final States with Two Leptons and One or No b -Tagged Jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV Using the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **127**, 141801 (2021)
60. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino–neutralino pair production in final states with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, 1118 (2021)
61. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Configuration and performance of the ATLAS b -jet triggers in Run 2,” Eur. Phys. J. C **81**, 1087 (2021)
62. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for R-parity-violating supersymmetry in a final state containing leptons and many jets with the ATLAS experiment using $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ proton–proton collision data,” Eur. Phys. J. C **81**, 1023 (2021)

63. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of sensor radiation damage in the ATLAS inner detector using leakage currents,” JINST **16**, P08025 (2021)
64. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}t\bar{t}$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 118 (2021)
65. 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 long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using displaced vertices in the ATLAS inner detector,” JHEP **11**, 229 (2021)
66. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section of pairs of isolated photons in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 169 (2021)
67. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charginos and neutralinos in final states with two boosted hadronically decaying bosons and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **104**, 112010 (2021)
68. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in pp collisions in final states with tau leptons, b-jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **104**, 112005 (2021)
69. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of b -quark fragmentation properties in jets using the decay $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **12**, 131 (2021)
70. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a Standard Model Higgs boson decaying into b-quarks using the full Run 2 dataset from the ATLAS detector,” JHEP **11**, 209 (2021)
71. K. Fushimi, T. Iida, *et al.*, “Development of highly radiopure NaI(Tl) scintillator for PICOLON dark matter search project” , Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 043F01 (2021)
72. M.R. Anderson, T. Iida, *et al.*, “Development, characterisation, and deployment of the SNO+ liquid scintillator” , Journal of Instrumentation **16**, P05009 (2021)
73. S. Ajimura, T. Iida, *et al.*, “Low background measurement in CANDLES-III for studying the neutrinoless double beta decay of ^{48}Ca ” , Physical Review D **103**, 092008 (2021)
74. V. Albanese, T. Iida, *et al.*, “The SNO+ experiment” , Journal of Instrumentation **16**, P08059 (2021)
75. K. Fushimi, T. Iida *et al.*, “PICOLON dark matter search project” , J. Phys.: Conf. Ser. **2156**, 012045 (2021)
76. Y. Minami, T. Iida *et al.*, “Status of ^{48}Ca double beta decay search in CANDLES” , J. Phys.: Conf. Ser. **2156**, 012145 (2021)
77. 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 浅野千紗, 笠島誠嘉, 前川群, 中原瑳衣子, 山根綾太, 吉田拓生, 他 26 名 (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 2020 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2020 SA6000162000, III-4 (2021), 査読なし
78. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, “Matrix regularization for tensor fields”, arXiv:2110.15544 [hep-th]
79. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, “Laplacians on Fuzzy Riemann Surfaces”, Phys. Rev. D **103**, no.2, 126003 (2021) [arXiv:2110.15544 [hep-th]]
80. Y. Asano and H.C. Steinacker, “Spherically symmetric solutions of higher-spin gravity in the IKKT matrix model”, arXiv:2112.08204 [hep-th]
81. G. Bergner, N. Bodendorfer, M. Hanada, S. Pateloudis, E. Rinaldi, A. Schfer, P. Vranas and H. Watanabe, “Confinement/deconfinement transition in the D0-brane matrix model – A signature of M-theory?”, arXiv:2110.01312 [hep-th]
82. Y. Namekawa, Y. Asano, Y. Ito, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Nishimura, A. Tsuchiya, S. Tsutsui and T. Yokota, “Flavor number dependence of QCD at finite density by the complex Langevin method”, PoS (Lattice 2021) in press
83. T. Yokota, Y. Asano, Y. Ito, H. Matsufuru, Y. Namekawa, J. Nishimura, A. Tsuchiya and S. Tsutsui, “Perturbative predictions for color superconductivity on the lattice”, PoS (Lattice 2021) in press.
84. S. Tsutsui, Y. Asano, Y. Ito, H. Matsufuru, Y. Namekawa, J. Nishimura, A. Tsuchiya and T. Yokota, “Color superconductivity in a small box: a complex Langevin study”, PoS (Lattice 2021) in press.

1. 飯田崇史, 「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 (0 ν DBD) 探索によるマヨラナ性検証とニュートリノ質量測定実験」
原子核研究特集号 (第 66 巻 2 号) 「日本の核物理の将来レポート (2021 年版)」, 原子核談話会, pp.297-303, 2021 年 12 月

〈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, 2022 年 3 月

1. 渡辺 展正: Two-Phase Coexistence of Colors at Large N

[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, 2022 年 2 月

1. 山根 綾太: COBAND 実験における反射防止膜設計のための Nb と Hf の光学定数測定
2. 菅野 聡: 行列模型と非可換幾何学
3. 藤本 和馬: 行列模型の符号問題について

〈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. Shigeki Hirose (ATLAS Collaboration), “Measurements and searches of Higgs boson production involving fermion couplings with the ATLAS detector”, XXVIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2021), online, April 12-16, 2021.
2. Takashi Iida, “CANDLES : Low background double beta decay experiment using Ca-48” (poster presentation), The 28th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2021), online, June 9, 2021.
3. Satoshi Kanno, “Various Generalization of Matrix Regularization”, Strings and Fields (online, Aug. 23-27, 2021, Kyoto, Japan)

[国内学会・研究会]

1. 飯田崇史: COBAND プロジェクトにおける遠赤外光学系の開発,
宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日), オンライン開催
2. 廣瀬茂輝: ATLAS 実験からの最近の結果と Run 3 実験に向けた準備状況,
宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日), オンライン開催
3. 和田 牙: LHC-ATLAS 実験における荷電レプトンフレーバーを破るウィークボソン散乱過程の多変量解析を用いた探索感度評価,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
4. 山内大輝: LHC-ATLAS 実験における高運動量トップクォーク再構成手法を用いた荷電ヒッグス粒子探索感度の評価結果,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
5. 廣瀬茂輝: LHC ATLAS 実験 Run 1 および Run 2 運転を通じたシリコンストリップ検出器の性能評価と Run 3 運転への展望,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
6. 和田 牙: ATLAS 実験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評価,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
7. 佐藤 構二: ATLAS 実験の最近の物理成果,
宇宙史研究センター 2021 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 11 月 26 日), オンライン開催
8. Takashi Iida, 「無機シンチレータの発光波長情報を用いた粒子識別技術の開発」,
KEK 測定器開発室 Platform A 第 2 回研究会 オンライン 2021 年 12 月 27 日
9. 柏木隆城: ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外光集光器の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2022(2021 年 1 月 27 日), オンライン開催
10. 山内大輝: LHC-ATLAS 実験における高運動量トップクォーク再構成手法を用いた荷電ヒッグス粒子探索での $t\bar{t}$ 背景事象の見積手法開発,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
11. 飯田崇史: PIKACHU 実験による Gd-160 の二重ベータ崩壊探索,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
12. 山根綾太: COBAND 実験における反射防止膜設計のための Nb と Hf の光学定数測定,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
13. 柏木隆城: ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外光集光器の開発およびシミュレーション,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
14. 柳瀬健太郎: HL-LHC に向けた放射線照射済み ITk ピクセルモジュール評価のためのクーリングシステム開発,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
15. 比江森友太: HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの 70 MeV 陽子線照射環境下での放射線耐性評価,

- 筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
16. 飯坂俊介: 高輝度 LHC ATLAS 実験用ピクセルセンサー量産に向けた品質保証システムの構築,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 17. 斉藤功太: HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けたモジュールのバンプ接合の熱耐性評価,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 18. 原 和彦: ヒッグス粒子- ATLAS 実験とこれから -,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 19. 武内勇司: 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索イントロダクション,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 20. 柏木隆城: 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の開発,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 21. 山根綾太: COBAND 実験における反射防止膜設計のための Nb と Hf の光学定数測定,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 22. 大森 匠: SOI ピクセル検出器を用いた KEK PF-AR テストビームライン用望遠鏡システムの性能評価,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 23. 五屋郁美: 新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の光検出器への応用に関する研究,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 24. 植田 樹: 新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性の研究,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 25. 倉持花梨: HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産 に向けた形状測定の精度検証と測定の効率化,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン開催
 26. 金信弘: 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,
第 3 回観測ロケットシンポジウム, JAXA/ISAS(2021 年 3 月 24-25 日), オンライン
 27. 浅野侑磨, 伊敷吾郎, 松本高興, 渡辺展正: BMN 行列模型における NS5 プレーン極限の数値解析,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
 28. 渡辺展正: ラージ N ゲージ理論の部分閉じ込め,
宇宙史研究センター 2021 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 11 月 26 日), オンライン開催
 29. 渡辺展正: 基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込めの数値的解析,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
 30. 渡辺展正: 基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込め,
熱場の量子論とその応用 2021 (2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日), オンライン開催
 31. 渡辺展正: モンテカルロ計算のすすめ,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (2021 年 8 月 6-10 日), オンライン開催
 32. 渡辺展正: 基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込め,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (2021 年 8 月 6-10 日), オンライン開催
 33. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 菅野聡: 曲がった Fuzzy 空間における Seiberg-Witten 写像,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
 34. 安藤雄史: flag 状態を用いた摂動的真空解,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (2021 年 8 月 6-10 日), オンライン開催
 35. 安藤雄史: Kaku 模型における古典解,
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン開催
 36. 菅野聡: Berezin-Toeplitz 量子化による行列正則化の一般化,
Poisson 幾何とその周辺 21 (2021 年 12 月 4-5 日), オンライン開催
 37. 菅野聡: BT 量子化による弦理論の記述,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (2021 年 8 月 6-10 日), オンライン開催
 38. 須田友也: Witten 型ボソン開弦の場の理論におけるタキオン凝縮,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (2021 年 8 月 6-10 日), オンライン開催

〈受賞〉

1. 渡辺展正: 筑波大学大学院数理物質科学研究科 研究科長賞 (2021 年度博士論文), 2022 年 3 月
2. 渡辺展正: KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」, ポスター賞, 課題名「基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込め」, 2021 年 9 月
3. 菅野聡: 令和 3 年度物理学学位プログラムリーダー賞, 2022 年 3 月
4. 渡辺展正: 学術振興会特別研究員 (DC2) 採用, 研究課題名:「行列模型から探るホログラフィー原理と非閉じ込め相転移」課題番号: 21J13014
5. 足立宏幸: 学術振興会特別研究員 (DC2) 採用, 研究課題名:「ローレンツ共変性が明白な M 理論の行列模型の解析」課題番号: 1152990

6. 安藤雄史：筑波大学数理物質科学研究群 数理フェローシップ採用，2021 年 5 月
7. 菅野聡：令和 3 年度つくばスカラシップ受賞，2022 年 3 月

〈国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動〉

1. 石橋延幸：PTEP 編集委員

〈競争的資金〉

1. 科学研究費 新学術領域研究「ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHC による真空と時空構造の解明～」，2016–2020 年度，計画研究 B01：「ヒッグス粒子で探る真空と世代構造」，研究分担者：受川史彦 260 千円（直接経費 200 千円，間接経費 60 千円）（2021 年度，繰越）
2. 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技術の実現」， 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） （2021 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 - 2022 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 年度）
4. 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 - 2021 年度，研究代表者：廣瀬茂輝，1,430 千円（直接経費：1,100 千円、間接経費：330 千円）（2021 年度）
5. 科学研究費 基盤研究（C）「超弦の場の理論を用いた超弦理論のダイナミクスの研究」，2018 - 2022 年度，研究代表者：石橋延幸
1,170 千円（直接経費 900 千円，間接経費 270 千円）(2021 年度)
6. 科学研究費 基盤研究（C）「行列模型による超弦理論の非摂動的定式化の研究」，2019 - 2022 年度，研究代表者：伊敷吾郎
520 千円（直接経費 400 千円，間接経費 120 千円）(2021 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)

坂井 真吾 (数理物質系物理学域 研究員)

山口 貴之 (埼玉大学 准教授) クロスアポイントメント教員

小沢 恭一郎 (高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所 准教授) クロスアポイントメント教員

佐甲 博之 (日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・ハドロン原子核物理研究グループ 研究主幹) クロスアポイントメント教員

Thomas Peitzmann (オランダ・ユトレヒト大学 教授) 海外教育研究ユニット招致 PI

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)

杉立 徹 (広島大学・学術・社会連携室 特任教授) 客員教授

濱垣 秀樹 (長崎総合科学大学・新技術創成研究所 特命教授) 客員教授

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

若杉 昌徳 (京都大学・理学研究科 教授) 客員教授

齋藤 武彦 (理化学研究所 主任研究員) 客員教授

山口 由高 (理化学研究所・仁科加速器研究センター 技師) 客員准教授

稲葉 基 (筑波技術大学・産業情報学科 准教授) 客員准教授

永宮 正治 (高エネルギー加速器研究機構 名誉教授、理化学研究所 研究顧問)

郡司 卓 (東京大学・理学系研究科・原子核科学研究センター 准教授)

志垣 賢太 (広島大学・理学研究科 教授)

クロスアポイント教員のオランダ・ユトレヒト大学の Thomas Peitzmann 氏、Marco van Leeuwen 氏は、筑波大学グループと LHC-ALICE 実験を共同で推進するとともに、ALICE 実験における将来計画である FoCal 検出器の開発研究を共同で進めた。また、原子力研究開発機構の佐甲博之氏、高エネルギー加速器研究機の小沢恭一郎氏は、J-PARC 施設における高密度核物質研究に関する共同研究を進め、埼玉大学の山口貴之氏は、理研の RIBF 施設における元素合成に関する共同研究を進めた。理化学研究所の齋藤武彦氏を客員教授として、同じく山口由高氏、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。Abderrahmane Ghimouz 氏が研究員として加わった。

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

数理物質系との密接な連携のもと、格子 QCD の大型シミュレーション研究を推進している。2020 年に引き続き、2021 年度も筑波大学を中心とした PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、「富岳」の一般利用や Oakforest-PACS(OFP) の学際共同利用を用いた大型プロジェクト研究を推進した。OFP は 2016 年秋から JCAHPC (最先端共同 HPC 基盤施設:筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織) において運用され、HPC(High Performance Computing) 向けとしては「富岳」に次ぐ性能を有していたが、2021 年度末で稼働を停止した。今後は、OFP の後継機が設置されるまでの間、「富岳」とともに、JCAHPC において新たに運用を開始した Wisteria(「富岳」と同じアーキテクチャで、OFP と同程度の演算性能を有する)を用いてプロジェクトを継続していく予定である。これと並行して、テンソルネットワーク (TN) 形式に基づく格子ゲージ理論・スピンモデルの研究、有限温度・有限密度 QCD の研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを共有する為のデータグリッド ILDG/JLDG の構築・整備を推進した。なお、2021 年度も新型コロナウイルス COVID-19 の世界的な感染拡大が継続し、大半の国際会議や国内学会・研究会がオンライン開催となった。また、日々の研究活動においてもオンラインでの議論・会議が強く推奨されるなど、研究遂行に大きな制約が生じた。

PACS Collaboration による「富岳」および Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション

2020 度に引き続き、2021 度も PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、「富岳」の一般利用や OFP の学際共同利用を用いて物理点における 2+1 フレーバー QCD の大規模シミュレーションを推進した。「富岳」向けのプログラム最適化は、2020 度の早期利用課題制度を利用して既に完了しており、2021 年度は本格計算を開始した。

過去 30 年以上にわたり、格子 QCD は主にハドロン単体の諸性質解明を目指して来た。現在の世界的な状況においては、2 つの大きな問題点が存在する。まず、物理点直上でのシミュレーションが可能になったことは事実だが、実際には物理点のみで物理量の評価を行えるほどの精度を得るレベルには至っていない。次に、現在の格子 QCD シミュレーションにおける物理量計算は” テーラーメイド” であると評されている。これは、目的とする物理量計算に応じて、適当と思われる物理パラメータ (クォーク質量や空間体積など) を選んでシミュレーションすることを意味している。この場合、例えば、同じゲージ配位を用いた計算であっても、ある物理量に対しては良く実験値と合うが、他の物理量に関しては実験値を再現しないということが起こりうる。「富岳」や OFP を用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物理点直上で $(10\text{fm})^3$ 超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記 2 つの課題を克服した計算を実現する。

ゲージ配位は異なる格子間隔 3 点 ($a = 0.085\text{fm}, 0.063\text{fm}, 0.043\text{fm}$) において生成し、系統誤差となる格子間隔依存性を取り除くために連続極限 ($a \rightarrow 0$) を取る。既に (格子間隔, 格子サイズ) = $(0.085\text{fm}, 128^4)$ 、 $(0.063\text{fm}, 160^4)$ のゲージ配位生成は完了しており、現在は (格子間隔, 格子サイズ) = $(0.043\text{fm}, 256^4)$ での物理点シミュレーションに注力している。並行してこれまで生成した格子サイズ 128^4 と 160^4 のゲージ配位を用いて、以下に説明するような物理量計算を行うとともに、 256^4 のゲージ配位を用いたテスト計算を開始した。

現実的クォーク質量を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算

山崎は PACS Collaboration において現実的クォーク質量での K 中間子セミレプトニック崩壊の動的 2+1 フレーバー大規模格子 QCD シミュレーションを行うことで、CKM 行列要素の一つである V_{us} の決定を行った。この物理量はクォークの世代間混合を表す行列である CKM 行列の行列要素のうち、アップクォークとストレンジクォークの混合の度合いを表す量である。この行列は標準理論においてユニタリー性を持つので、ユニタリー性の確認を行うことで標準理論を超える物理の検証を行うことができる。2018 年に $|V_{ud}|$ の値が更新されたことにより、ユニタリー性から見積もられる $|V_{us}|$ の値も大きく動いた (図 40 の水色帯)。

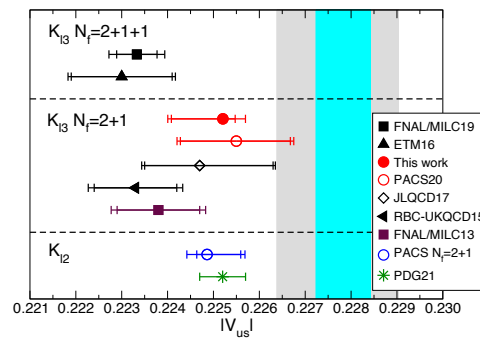


図 40 $|V_{us}|$ の比較。灰色帯と水色帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

2020 年度までの格子間隔 0.085fm の計算から得られた $|V_{us}|$ (中抜き赤丸) は、これまでの多くの計算結果 (K_{l3} $N_f = 2 + 1 + 1$, $N_f = 2 + 1$) と異なり、K 中間子レプトニック崩壊から決定される $|V_{us}|$ (青丸、緑星) と一致する結果であった。しかし、有限格子間隔に起因する系統誤差により大きな不定性がついていた。この不定性を取り除くため、2021 年度は格子間隔 0.063fm の計算を重点的に行い、2 つの格子間隔の計算結果から連続極限の $|V_{us}|$ を見積もった (塗りつぶし赤丸)。有限格子間隔に起因する系統誤差の一部は取り除くことができたが、2 つの格子間隔のみの結果からでは、格子間隔依存性を精密に決定することが難しく、結果にはまだ大きな不定性が残っている。今後、さらに小さな 格子間隔のゲージ配位を用いた計算によりこの不定性を小さくし、標準理論を超える物理の検証を行っていく。

現格子 QCD を用いた核子構造研究

陽子と中性子 (核子) はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いた計算が必要である。これまでに格子 QCD を用いて、核子構造に関する核子形状因子研究が行われてきたが、非常に良い精度で測定されている実験値を再現できていなかった。

蔵増、山崎、新谷は、広島大学 石川健一准教授、東北大学 佐々木勝一准教授、理研計算科学研究センター 青木保道チームリーダー、東北大学大学院生 辻竜太郎氏と共に、PACS Collaboration において、現実的クォーク質量直上で核子形状因子計算を行った。2020 年度の格子間隔 $a=0.085\text{fm}$ での形状因子計算結果から明らかになった荷電半径計算に含まれる系統誤差の原因を探るため、2021 年度は格子間隔 $a=0.063\text{fm}$ での形状因子計算を進めるとともに、核子スカラー電荷と核子テンソル電荷 (論文 10) に加え核子構造関数に関する物理量計算 (論文 11) を実行した。

また、これまでとは異なる観点から計算を実行するため、新しい荷電半径計算方法の開発研究を行い、荷電半径などの形状因子の運動量移行微分で定義される物理量を、形状因子のフィットを介さずに、直接計算する方法の試験計算を行った (論文 1)。

中間子電磁的形状因子の直接微分計算法の開発研究

大学院生 佐藤と山崎は電磁的形状因子の原点の傾きで定義される荷電半径を格子 QCD 計算から直接計算する方法の開発研究を行った。一般的な荷電半径の計算では、電磁的形状因子を離散的な運動量移行で数点計算し、電磁的形状因子の運動量移行依存性に対し関数を仮定したフィットにより荷電半径を求めている。しかし、この計算方法ではフィット関数の選択による系統誤差が含まれてしまう。荷電半径の精密決定のためには、このような系統誤差のない計算方法が望まれている。

2020 年に形状因子の微分を直接計算する方法が提案された。この方法を詳しく調べた結果、無視できない有限体積効果が含まれる場合があることを確認し、その効果を抑制する改良された直接微分計算法を提案した。さらに、その方法を π 中間子質量 0.51GeV での格子 QCD 計算に適用し、実際の π 中間子荷電半径計算で機能することを確認した。

格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

蔵増、山崎は宇川名誉教授との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そののち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであった。その後、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD

シミュレーションを行い、試験的計算より現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および2核子系の束縛エネルギー計算に成功した。この計算は π 中間子質量 0.5GeV と 0.3GeV のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14GeV に相当) よりも重い質量を用いていた。この成果を踏まえ、京コンピュータで生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた現実に近い π 中間子質量 0.146GeV での軽原子核束縛エネルギー計算を進めている。この計算は統計誤差を抑えることが非常に難しく、ヘリウム原子核については有意な結果は得られていないが、重陽子については現状で実験値から予測された値を再現する結果が見え始めている。

一方、現実よりも重い π 中間子を用いた他グルーブの計算からは束縛状態を観測できないという問題が報告されている。この計算には2体核子散乱を考慮した計算になってはいるが、束縛エネルギー計算で問題となるのは核子励起状態散乱の寄与と考えられる。今後、この状態を考慮した計算方法を開発し、束縛エネルギーに含まれる、それら状態の系統誤差を見積もる予定である。

改良 Wilson 型クォークを用いた格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究
ビッグバン直後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。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。谷口、金谷らは、改良 Wilson 型格子クォークを用いた有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究を行っており、QCD の相構造やクォーク物質の熱力学特性を引き出すために、2021 年度も、有限温度・有限密度格子 QCD の研究と、そのための技術開発を進めた。

*1 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く、それを取り除いて物理量を計算するために膨大な計算資源が要求されるという困難があった。また、並進対称性に伴う保存カレントとして定義されるエネルギー運動量テンソルは系の力学特性を調べる上で基本的な観測量だが(例えば、対角成分はエネルギー密度や圧力などの情報を含み、2点相関関数から様々な粘性率が導かれる)、格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、従来の方法では、5種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非摂動的に決定するという、複雑な繰り込み操作を行わなければ意味のある評価が出来なかった。

谷口、金谷らは、九州大学 鈴木博教授、大阪大学 北澤正清助教、新潟大学 江尻信司准教授、広島大学 梅田貴士准教授らと、Gradient flow(勾配流)に基づいて鈴木博らにより開発された SFtX 法 (small flow-time expansion method) を応用して、これらの課題を克服した大きなブレイクスルーを目指している。Gradient flow とは、仮想的な時間パラメータ t (flow-time) を導入して、作用の勾配で与えられる発展方程式 (フロー方程式) により場の量を変形させる理論的手法である。この発展方程式は一種の拡散方程式になっており、 $t_t \rightarrow 0$ までフローさせた結果は、元の場の量を $\sqrt{8t}$ の物理的領域で平準化

(smear) させたものと解釈することができる。さらに、フローさせた場で作る演算子が紫外発散も同一点特異性も持たないという目覚ましい特性を持っていることが、Lüscher と Weisz により証明された。SFtX 法は、Gradient flow のこの有限性を活用して、連続極限の繰り込まれた物理量に対応する量を格子上で評価する一般的な計算方法である。連続理論で何らかの物理量を非摂動論的に評価しようとする、通常は、その物理量を格子理論で定義し、格子上で評価された値を連続極限まで外挿 ($a \rightarrow 0$) するが、数値的な繰り込みに加えて、格子上で重要な対称性が壊されている場合にはそれによる不要な演算子との混合を数値的に除去する必要がある、十分な精度を出すためにはしばしば重い計算となる。SFtX 法では、フローさせた演算子が有限であることを利用して、対応する演算子を格子上で計算することにより、繰り込み操作や混合の除去無しに直接評価する。ただし、フローさせた演算子は求める物理量そのものではないので、格子の結果を、連続極限 ($a \rightarrow 0$) とフロー時間ゼロ極限 ($t \rightarrow 0$) に 2 重外挿する。

SFtX はどんな物理量にも使うことができるので、格子化で並進対称性が陽に壊されるためにこれまで扱いが難しかったエネルギー運動量テンソルの格子計算に、最初に応用された。我々は、SFtX 法が並進対称性の破れだけでなく、Wilson 型クォークによるカイラルの破れの困難にも有効であることに着目し、2+1 フレーバーの動的なクォークを含む現実的 QCD に SFtX 法を応用した一連の研究を推進している。

我々は、動的クォークを含む QCD への応用の第一段階として、2016～2017 年度に u, d クォークが現実よりやや重い場合の $N_f = 2 + 1$ QCD の研究を実行した。エネルギー運動量テンソルの対角成分から計算した状態方程式が、従来の方法による結果を良く再現することを示し、さらに、カイラル感受率の disconnected 部分がクロスオーバー温度でピークを示すことを Wilson 型クォークとして初めて示した。また、位相感受率を、グルオンを用いた定義式と、それを、連続理論のカイラル関係式を用いてクォークを用いて表し直した評価式の両方で計算し、有限の格子間隔でも両者が極めてよく一致することを示した。通常の計算方法でスタガード型クォークを用いた研究では、ここでシミュレーションした程度の格子間隔では両者は 2 桁も違っており、SFtX 法が物理的に信頼できる結果を得る上で極めて有用であることをあらわしている。

このクォークが現実よりやや重い場合の QCD の研究を発展させ、現実のクォーク質量 (物理点) での $N_f = 2 + 1$ QCD の熱力学研究や、u, d クォークが重い場合に格子間隔を変えたシミュレーションなどを進めている。その過程で、格子が粗い場合などには SFtX 法をさらに改良する必要があることが判明したので、マッチング係数の繰り込みスケール依存性などを研究し、繰り込みスケールを適切に選ぶことで SFtX 法を大きく改善できることを示した。

*2 SFtX 法を用いた物理点 (2+1)-flavor QCD の熱力学研究

上記の改良を取り入れた物理点 $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度シミュレーションを、格子間隔 $a=0.08995(40)\text{fm}$ の場合に集中して推進している。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間の大きな削減ができたが、物理点や格子間隔が細かい格子の配位生成には膨大な計算が要求され、様々な計算機資源を動員して大規模シミュレーションを系統的に遂行している。

約 120～300MeV 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、2020 年度までの測定から、相転移温度が 150MeV 以下であることを示唆する中間結果を得た。ただし、相転移温度近傍や低温領域での統計量は十分なものでは無かったので、2021 年度には、相転移温度の下限を確定するために、相転移温度近傍や低温領域の統計を大きく増強するシミュレーションを、HPCI や

CCS 学際共同利用などの計算機資源を投入して推進した。その解析を現在進めている (図 41、国内学会 18)。我々の Wilson 型クォークによる相転移温度は、スタガード型クォークによる先行結果より低い可能性があるが、相転移温度の精密な評価は実験的・現象論的にも重要である。

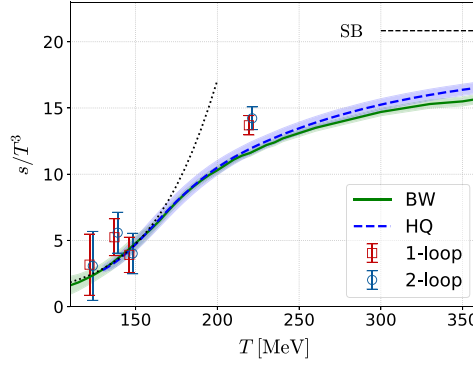


図 41 SFtX 法を用いた物理点 $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度シミュレーション。低温領域 ($T=122, 137\text{MeV}$) の統計を改善したエントロピー密度。Budapest-Wuppertal Collaboration と HotQCD Collaboration による、先行結果 (通常の方法を採用し、スタガード型クォークを用いている) との比較 (国内学会 18 で示した中間結果)。この後に統計はさらに改善されている。

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

クォークが重い極限に相当する $SU(3)$ ゲージ理論の潜熱を研究し、SFtX 法のような手法による結果が連続極限で一致することを示すことにより数値的方法論としての正しさと実用性を確認した (論文 13)。昨年度に発表した論文 M. Shirogane, et al., “Latent heat and pressure gap at the first order deconfining phase transition of $SU(3)$ Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 013B08 (2021), DOI:10.1093/ptep/ptaa184 では、SFtX 法を応用して、クエンチ QCD ($SU(3)$ Yang-Mills 理論) の有限温度 1 次相転移点における潜熱と圧力ギャップ Δp を研究した。SFtX 法のような手法による結果が連続極限で一致することが確認され、SFtX 法の正しさと実用性が示された。2020 年度はコロナ禍により格子場の理論国際会議が中止されたが、代替となる成果発表 (国際会議 8) およびそのプロシーディングス (論文 13) が公表されている。

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

論文 13 では、3 つの格子間隔 ($N_t = 8, 12, 16$ に対応する $a = 1/(N_t T_c)$)、2 つの空間体積 ($N_s/N_t = 6, 8$ に対応する $V = (N_s a)^3 = (N_s/N_t)^3/T_c^3$) でクエンチ QCD シミュレーションを実行し、我々が開発した再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせた手法を使って臨界点 $T = T_c$ に調整した。そして、臨界点直上で、SFtX 法を使って臨界点における潜熱と Δp を測定した。

図 42 の左図に、 μ_0 スケールを使った潜熱と圧力ギャップ Δp の結果を示す。この図から、(a) $a \rightarrow 0$ と

$t \rightarrow 0$ の極限操作の順番を変えても結果が一致すること、および、(b) Δp がゼロとコンシステントであること、が確認される。これにより、連続極限における潜熱を精密で信頼性が高く測定することに成功した。同時に、潜熱の結果に空間体積依存性が確認されるので、より大きな空間体積での追試が望まれる。図 42 の右図に示したように、高温相で有限体積効果が大きく出ていることがわかった。

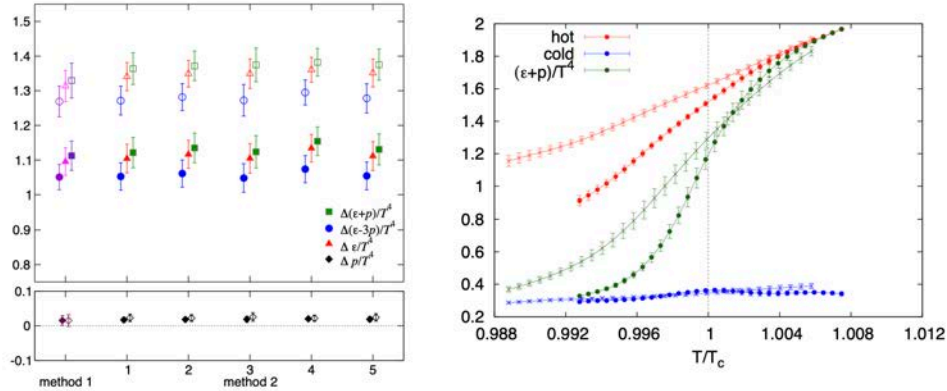


図 42 クエンチ近似 QCD の潜熱と圧力ギャップに関して $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の 2 重外挿を行った最終結果。(左図) $t \rightarrow 0$ を先に実行する” method 1” と $a \rightarrow 0$ を先に実行する” method 2” の結果の比較 (method 2 では、さらに $t \rightarrow 0$ 外挿のフィット・レンジをいくつか比較)。Filled symbols はアスペクト比 $N_s/N_t = 8$ 、open symbols は $N_s/N_t = 6$ に相当する空間体積での結果。(右図) $N_t = 8$ 格子におけるエントロピー密度のヒステリシス。空間体積が小さい $N_s/N_t = 6$ 格子 (細いシンボル) と空間体積が大きい $N_s/N_t = 8$ 格子 (太いシンボル) の比較 (論文 13)。

クォークが重い QCD の臨界クォーク質量

クォークが重い極限の QCD は、有限温度相転移が 1 次なので、クォーク質量を無限大から下げていくと、有限温度相転移は連続的なクロスオーバーに変化する。両者の境界である臨界点の研究は、クォーク質量が軽い領域における臨界点研究の雛形として興味を持たれている。

*1 臨界点における臨界スケーリングの研究

我々は、クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD の臨界点を、再重み付け法と SFtX 法で研究して、臨界スケーリングが従来採用されているより大きな空間体積で実現することを示した。図 43 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、 $LT = N_s/N_t$ は系の空間体積に対応するパラメータである。期待する臨界スケーリングが実現していれば、Binder cumulant は臨界点で系の空間体積によらず一定値になるはずである。図 4 より、 $LT = N_s/N_t$ が十分大きければ、臨界スケーリングが高い精度で実現することがわかる。また、臨界スケーリングを用いることにより、熱力学極限における臨界点の値を高精度で測定することも可能になった (論文 3)。

*2 ホッピング・パラメータ展開の収束性の研究

前記の研究では、クォークが重い場合の効率の良いシミュレーション方法として、ホッピング・パラ

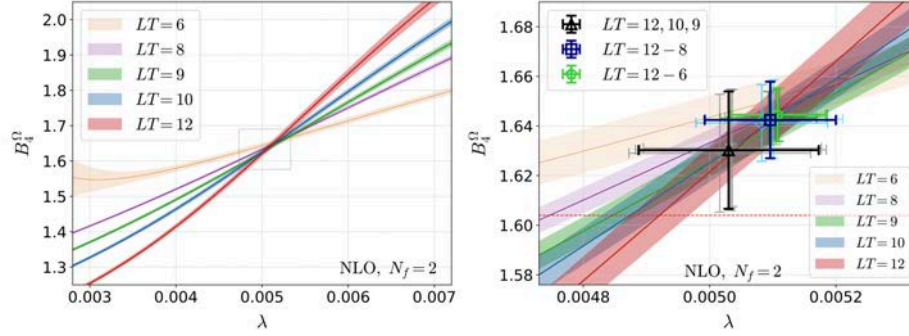


図 43 クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における、臨界点近傍の Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $\lambda=64 N_c N_f \kappa/4$ はクォーク質量をコントロールするホッピング・パラメータ κ の関数で、クォークが軽くなると大きくなる。 $LT = N_s/N_t$ は格子のアスペクト比で、温度がほぼ一定の場合は、格子の空間サイズ L に比例する。右図は、左図の交点周辺を拡大したもの (論文 3)。

メータ展開を用いた。QCD の臨界点の決定に関するホッピング・パラメータ展開の有効性を確認するために、論文 2 では、臨界点の近傍におけるホッピング・パラメータ展開の高次項の効果と収束性を研究した。さらにホッピング・パラメータ展開の十分な高次までをとりいれたシミュレーションを実現する手法を開発した。

まず、ホッピング・パラメータ展開の収束性が最も悪い、リンク変数 (ゲージ場) がすべて単位行列の場合に展開項を 100 次項まで準解析的に計算し、ホッピング・パラメータ κ に関する収束半径を、ダランベールとコーシー・アダマールの 2 種類の収束判定方法で評価した。その結果、図 44 の左図に示したように、展開次数 n を大きくした極限で、クォーク質量がゼロの場合に相当する $\kappa=1/8$ に収束することを示した。同時に、ホッピング・パラメータ展開を有限次で止めた場合の誤差評価を行い、低次のホッピング・パラメータ展開を用いた上記の臨界点の評価は、 $N_t=4$ の格子までは十分信頼できることを確認した。また、 $N_t=6$ 以上の格子では、ホッピング・パラメータ展開のより高次の項まで取り入れる必要があることを示した。

この結果を受けて、ホッピング・パラメータ展開の高次項の効果を取り入れる方法を研究した。 323×6 および 323×8 格子でシミュレーションを実行し、 $n=20$ までの展開項を評価した。図 44 の中央図と右図に、 323×8 格子の臨界点近傍のシミュレーションで実測された、12 次と 20 次のポリアコフ・ループ項と最低次のポリアコフ・ループ項 ($\text{Re } \Omega$) の分布を示す。すべての場合に、ポリアコフ・ループ項は、十分な高次まで、最低次項と強い線形の相関があることが確認される。最低次項のみを取り入れたモンテカルロ・シミュレーションは高い効率で実行できるので、ここで実測した比例係数を使って最低次項の係数を調整することにより、ホッピング・パラメータ展開の 20 次までの効果を有効的に取り入れたモンテカルロ・シミュレーションが、フル QCD シミュレーションよりも遥かに低コストで実行可能である (図 44、論文 2)。

2+1 および 4 フレーバー QCD の臨界終点の探索

QCD の有限温度相転移の次数は、クォークのフレーバー数及び質量に依存して変化すると考えられている。例えば 3 フレーバーの場合、クォーク質量が 0 の極限では 1 次相転移になると予想され、質量を

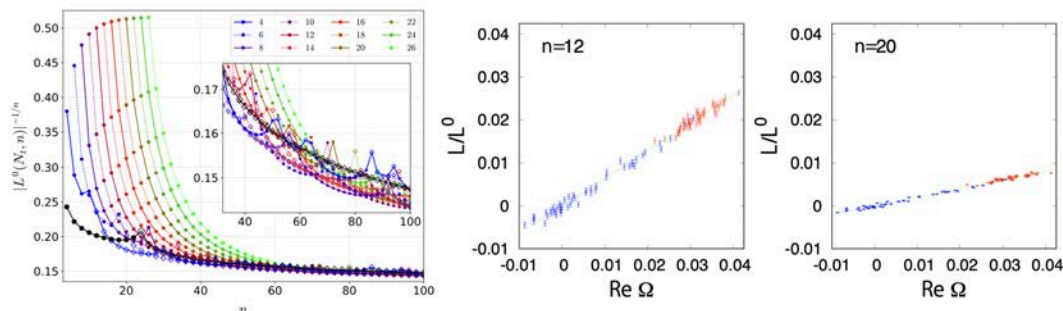


図 44 クォークが重い QCD におけるホッピング・パラメータ展開の収束性と改良手法の研究。(左図) 収束性が最も悪い、リンク変数がすべて単位行列の場合に、コーシー・アダマールの収束半径を展開次数 n の関数として示したもの。黒はホッピング・パラメータ展開におけるウィルソン・ループ項で、色付きのシンボルはポリアコフ・ループ項を、様々な Nt について表したもの。図中の図は、 $n=32-100$ の領域の拡大図。(中央図・右図) 323×8 格子で実測された、12 次と 20 次のポリアコフ・ループ項と最低次のポリアコフ・ループ項 ($\text{Re } \Omega$) の分布。縦軸は、リンク変数がすべて単位行列の場合の値で規格化している。青は $\beta = 6.0320$ 、赤は $\beta = 6.0660$ で、いずれも臨界点近傍 (論文 2)。

大きくしていくと 2 次相転移となる点を経てクロスオーバーになると予想されている。この 1 次相転移が終わり 2 次相転移となる点を臨界終点と呼び、その位置を特定することは、QCD の相構造を理解する上で非常に重要である。しかしながら、格子 QCD 計算に基づく先行研究により、臨界終点の位置はフェルミオン作用の種類や連続極限の取り方に強く依存するという結果が得られており、最終的な結論は未だ得られてない。このことは、臨界終点の位置が格子化誤差の影響を強く受けることを示唆しており、フェルミオン作用依存性のより詳細な理解と、より正確な連続極限への計算が求められている。

大野と藏増は、理化学研究所の中村宜文氏と金沢大学の武田真滋准教授らと共に、格子 QCD に基づく数値計算により、2+1 および 4 フレーバー QCD における臨界終点 (線) の探索を行った。本年度の研究成果としては、まず、 $O(a)$ 改良された Wilson 型フェルミオン作用を用いた 2+1 フレーバー QCD の計算について、これまでよりも格子間隔の小さい、時間方向格子サイズ $Nt=8$ での計算を進めた。その結果、1 次相転移を示すいくつかのパラメータを特定することができた。次に、4 フレーバー QCD の計算では、 $O(a)$ 改良された Wilson 型フェルミオン作用を用いた $Nt=10$ の計算を推進し、臨界終点の位置を特定することができた (図 45)。これらの結果は、国際会議「Lattice 2021」等で発表した。さらに、4 フレーバー QCD の計算では、フェルミオン作用依存性を調査するため、スタaggered 作用を用いた計算も開始し、 $Nt=4$ および 6 についての結果を得ることができた。また、本研究室博士前期課程所属の羅梟氏は、この計算結果を修士論文にまとめ、学位を取得した。

クォーコニウムスペクトル関数の研究

クォーコニウムは、チャームやボトムといった重クォークとその反クォークの束縛状態である。RHIC や LHC で行われている重イオン衝突実験では、宇宙初期や中性子星内部等のような超高温・高密度環境で実現されると考えられている、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる状態を作り上げる実験が行われており、クォーコニウムは QGP の性質を調べるための重要なプローブの一つとなっている。また、実験結果を説明し、QGP の性質をよく理解するためには、クォーコニウムや重クォークの QGP 中での振る舞いを理論的に調べるが必要不可欠である。その際、クォーコニウムのスペ

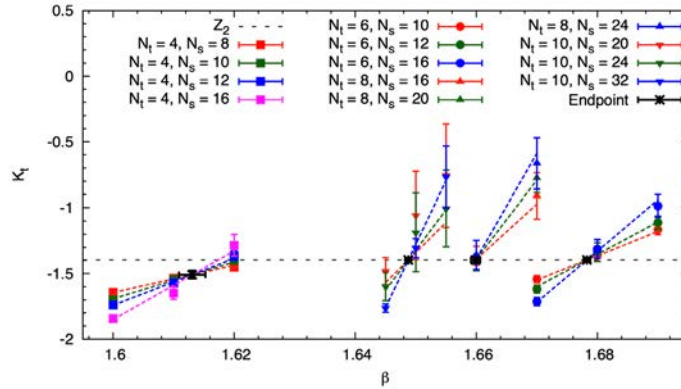


図 45 Wilson 型フェルミオンを用いた 4 フレーバー QCD における臨界終点。

クトル関数が重要な役割を果たす。なぜならば、スペクトル関数は高温媒質中でのクォーコニウムの振る舞いや重クォーク輸送に関する情報をすべて含んでいるからである。一方、クォーコニウムのスペクトル関数を計算することは一般に困難であることが知られている。格子 QCD に基づく第一原理計算では、クォーコニウムの相関関数を直接計算することができるが、スペクトル関数は相関関数から間接的にのみ得られる。しかしながら、この計算は ill-posed な問題であり、解くことが非常に困難であることが知られている。従って、より信頼できるスペクトル関数を計算するために様々な方法が試みられている。

大野は、中国華中師範大の Heng-Tong Ding 教授、独国 Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 博士らとともに、クエンチ近似を用いた大規模な格子 QCD シミュレーションにより、連続極限におけるクォーコニウム相関関数を計算し、これを摂動論的モデルにフィットすることでクォーコニウムスペクトル関数を計算した (論文 4)。本研究では、以前の研究で行った擬スカラーチャネルに対する計算を拡張子、輸送ピークを持つベクターチャネルのスペクトル関数を計算した。その結果、チャーモニウムのスペクトル関数については相転移温度以上で束縛状態に対応するピークが無くても格子 QCD のデータを説明できるのに対し、ボトモニウムについては少なくとも調べた温度の範囲では束縛状態のピークが必要であることが分かった。また、輸送ピークについての解析から重クォーク拡散係数も推定し、先行研究との比較を行った (図 46)。

テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD 計算では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然界の u、d、s クォーク質量上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。その一方で、解決すべき長年の課題がそのまま残されていることも事実である。最も重要な課題は、フェルミオン系を扱う際の負符号問題および複素作用を持つ系のシミュレーションである。これらは、軽いクォークのダイナミクス、Strong CP 問題、有限密度 QCD、格子 SUSY の研究において避けて通れない問題である。われわれは、近年物性物理分野で提案されたテンソルネットワーク形式に基づく分配関数の数値計算手法を格子ゲージ理論へ応用し、モンテカルロ法に起因する負符号問題および複素作用問題を解決し、これまでの格子 QCD 計算が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。なお、本研究課題は、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題における萌

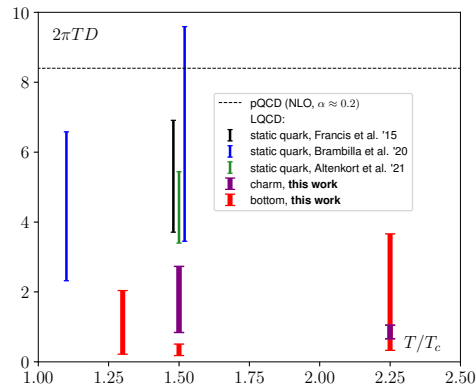


図 46 重クォーク拡散係数の推定値。

芽的課題「基礎科学のフロンティア – 極限への挑戦」の一つとして、本グループが分担機関として参画し、テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用に取り組んできた。萌芽的課題は2019年度末で終了したが、2020年度以降は科学研究費基盤(A)を新たな資金として研究の発展を図っている。

2014年、蔵増と理研計算科学研究機構(現理研計算科学研究センター)の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し(グラスマンテンソル繰り込み群)、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 θ 項が有る場合と無い場合の1フレーバーの2次元格子Schwingerモデル(2次元格子QED)における相構造を調べた(論文発表済)。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子QCD計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である4次元QCDへの応用に向け、(i)非可換ゲージ理論への拡張、(ii)高次元モデルへの応用、(iii)物理量計算のための手法開発、(iv)興味深い低次元素粒子論モデルへの応用、(v)物性物理学における強相関電子系への応用、という5つの課題に取り組む。

2021年度は、上記課題(i)~(v)のうち、特に課題(v)に関して以下に述べるような大きな進展があった。その前に、まず、2020年度の重要な成果として、われわれはTRG法を用いて4次元有限密度南部-Jona-Lasinio(NJL)モデルの極低温高密度領域における一次相転移の実証に成功した(論文発表済)。このモデルは符号問題を内包しているため、従来のモンテカルロ法では解析が困難であったが、TRG法により世界で初めて一次相転移の存在を明らかにした。この研究は有限密度QCDの相転移解析へ向けての重要なマイルストーンであるが、もう一つの重要な意義も存在する。実は、素粒子物理学におけるNJLモデルは物性物理学におけるHubbardモデルとほぼ同じ形の経路積分表式で表されるため、NJLモデルにおけるTRG法の成功により、TRG法によるHubbardモデルの相構造解析への道が開かれた。Hubbardモデルは強相関電子系の単純化されたモデルであり、金属-絶縁体転移や高温超伝導などの理論的本質を含んでいると考えられているが、符号問題のために数値的解析が困難なことが知られている。2021年度は、まず、(1+1)次元Hubbardモデルにおける金属-絶縁体転移の計算を行い、Bethe仮説に基づいて理論的に予想されている臨界化学ポテンシャルの値を再現することに成功した(論文6)。その後、(2+1)次元Hubbardモデルの金属-絶縁体転移の計算を行い、(2+1)次元でも(1+1)次元の場合と同様に、有限のクーロンポテンシャル $U(>0)$ において、金属-絶縁体転移が起きることを示した(論文7)。図47(左)は、 $D_{cut} = 80$ で $U=8$ における電子密度

$\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたものである。 $\mu = U/2 = 4$ が half-filling 状態であるが、 $2 \leq \mu \leq 6$ の領域において $\langle n \rangle = 1$ の plateau が形成されていることから、絶縁体状態であることがわかる。また、 $\mu \leq -4, \mu \geq 12$ も絶縁体状態であることが見てとれる。格子サイズは $(N_\sigma, N_\tau) = (2^{12}, 2^{24}), (2^8, 2^{20})$ の 2 種類であるが、格子間隔 $(a, \epsilon) = (1, 10^{-4})$ を用いて物理的スケールに変換すれば $(L, \beta = 1/T) = (4096, 1677.7216), (256, 104.8576)$ となり大体積で極低温であることがわかる。両者の結果が一致していることから、熱力学極限かつゼロ温度の結果と見做することができる。図 47(右) は、 $6.0 \leq \mu \leq 8.0$ の領域において μ の刻み幅を細かくし、電子密度 $\langle n \rangle$ の $D_{cut}(= D)$ 依存性を調べたものであるが、ほとんど D_{cut} 依存性がないことがわかる。曲線は μ と $D_{cut}(= D)$ に関する global fit を表しており、これにより $D_{cut} = \infty$ における臨界化学ポテンシャル μ_c を決定することができる。他のクーロンポテンシャル $U=80, 2$ でも同様の計算を行い、いずれの場合も $\mu_c > U/2$ で金属-絶縁体転移が起きていることが示された。

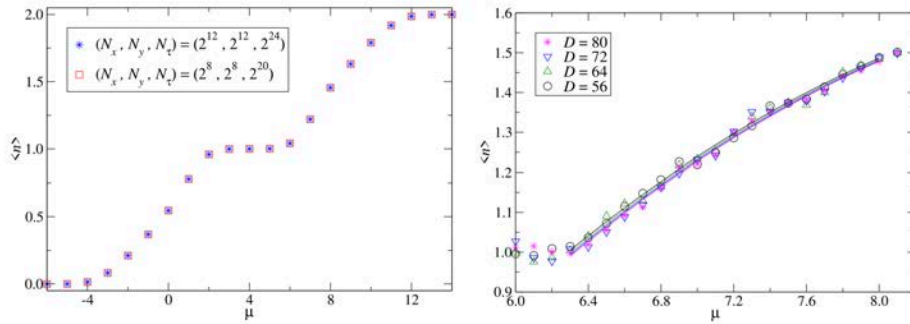


図 47 (左) $U=8$ における電子密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたもの。 $D_{cut} = 80$ で格子サイズは $(N_\sigma = N_x/y, N_\tau) = (212, 214)$ (青) と $(28, 220)$ (赤) の 2 種類。 (右) $6.0 \leq \mu \leq 8.0$ の領域において左図よりも μ の解像度を上げて電子密度 $\langle n \rangle$ を計算した結果。曲線は μ と $D_{cut}(= D)$ に関する global fit の結果を表す (論文 7)。

素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補の一つである。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる可能性がある。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は名古屋大学 山脇幸一名誉教授や理研計算科学研究センター 青木保道チームリーダーらと共に、LatKMI Collaboration において、格子ゲージ理論を用いた数値計算から、そのような条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行っている。これまでの 4、8、12 フレーバー SU(3) ゲージ理論の研究から、8 フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性があることを示唆した。2021 年度はフレーバー 1 重項スカラー中間子及びフレーバー 1 重項擬スカラー中間子の質量について、4、8、12 フレーバー理論の比較及び、8 フレーバー理論から得られる S パラメータ計算を行った。

格子 QCD 研究用データグリッド ILDG/JLDG の運用

JLDG(Japan Lattice Data Grid) は、国内の主要な計算素粒子物理研究 8 拠点に分散配置されたファイルサーバを NII SINET6 VPN で結び、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねた分散ファイルシステムであり、複数拠点のスパコンを用いた研究を推進する国内の主要な研究グループが、膨大な研究データの統一的管理・共有の為にストレージシステムとして、利用している。JLDG の運用は、拠点の代表、研究グループ代表、及び本学の計算機工学者から構成される JLDG 管理者グループが行っており、本センターからは、蔵増、吉江、大野が参加している。

JLDG は、2008 年に実運用を開始して以来 14 年経過し、実用システムとして(一定の)完成の域に達しており、ここ数年の管理者グループの活動は、システムの改良や機能追加から、安定運用や利便性向上の為に作業に主軸を移している。2021 年度は、日常のメンテナンス・ユーザ対応・システム障害対応等の日常業務以外に、本センターに設置している JLDG 管理システムのセキュリティ向上作業を実施した。具体的には、

- 管理サーバ専用ネットワーク構築と計算科学研究センター独自の Firewall 導入及びセキュリティイベント監視(外部委託)(本学のネットワークのセキュリティゾーン化の一部として実施)
- アクセス元 IP・オープンポート制限強化(サーバ毎に、必要最小限)
- 管理サーバ間通信用プライベートネットワーク新設
- プロキシ・リバースプロキシの利用
- 脆弱性対応:学術情報メディアセンター実施の検査への対応と管理グループ独自の検査(サーバ新設、設定の大きな変更時)の実施
- OS・ソフトウェアの更新: CentOS6,8 の EOS 対策
- JLDG グリッド証明書用 CA/RA 再構築と、全ユーザの証明書更新
- 仮想組織管理、システム監視(Zabbix)、gfarm MDS 更新

である。一つ一つは、特別なセキュリティ向上策ではないが、管理機器の機能と保守作業に支障が生じないという条件の下で、高いセキュリティレベルを実現できたと考えている。

ILDG(International Lattice Data Grid) は、JLDG を含む同種の 5 つの地域レベルのデータグリッドを、QCD の基礎データに限って世界の研究者が相互に利用する目的で相互運用する為のプロジェクトである。2007 年に運用を開始し、世界の研究者に利用されてきたが、2016 年頃から運用の継続に支障が生じるようになった。ベースとして利用しているミドルウェアの更新にあわせたシステムソフトウェアの更新に困難が生じたこと、基礎データ公開の為に準備作業のコストが高いこと、利用登録手順が複雑であること、などが理由である。これらの困難を解消し、ILDG プロジェクトを再活性化する為、ILDG の 2 つのワーキンググループ世話人の呼びかけで、国際ミーティングが開催され、ILDG の最高意思決定機関である ILDG board ミーティングの開催準備を行った。ILDG プロジェクトには、本センターからは、蔵増が ILDG board 日本代表として、吉江が Metadata ワーキンググループ世話人として参加している。2022 年 4 月 14 日に開催された board meeting にて、ワーキンググループが提案した方針が承認され、プロジェクトの再活性化への作業が開始された。

(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

p+p 及び p+Au 衝突における J/ψ 粒子生成の測定

重クォーク対により構成されるハドロンはクォークoniumと総称され、 J/ψ 粒子に代表される。QGP 媒質のカラー遮蔽効果のため、クォークoniumはその束縛エネルギーに対応する温度で融解することが

松井・Satz に予言されている [5]。よって、 J/ψ 粒子の生成抑制の測定が QGP 相の温度決定において重要である。一方、 J/ψ の生成量は融解後の再結合や QGP 媒質中でのエネルギー損失にも依存する。更には原子核中でのグルーオン PDF の変化や非 QGP 原子核物質との相互作用など、冷たい原子核効果にも影響されることが知られている。従って QGP 温度の測定にはこれら各種効果の鑑別が重要である。

本測定では冷たい原子核効果の測定を目的とし、QGP 相による効果が小さい p +Au 衝突における J/ψ 粒子の測定を行った。また、各種効果が存在しない p + p 衝突に対する各衝突系における J/ψ 粒子の生成量比 R_{AA} を評価した。ただし、 R_{AA} は衝突系の大きさを考慮し、 p + p 衝突に対して J/ψ 生成量に変化がない場合 $R_{AA} = 1$ となるように規格化されている。

図 48 上部パネルに J/ψ 粒子の p +Au 衝突における R_{pA} 及び Au+Au 衝突における R_{AA} の横運動量 p_T 依存性を示す。本測定による R_{pA} の統計精度向上により、 $p_T > 5$ GeV/ c の領域で Au+Au 衝突における J/ψ 粒子の生成抑制が主に融解によることが示された。次に、図 48 下部パネルに本測定と冷たい原子核効果を取り入れた各種モデル計算との比較を示す。各種モデル計算は不確かさの範囲で本測定による R_{pA} と一致している。本測定による R_{pA} が今後各種モデル計算に更なる制限を加えることが期待される。本結果は Physics Letters B に出版された [6]。

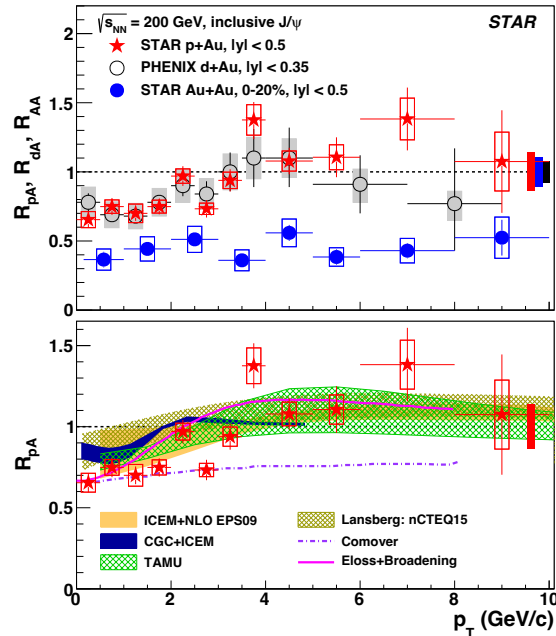


図 48 p +Au 及び Au+Au 衝突における J/ψ 粒子の $R_{p(A)A}$

RHIC-STAR3 GeV 金原子核固定標的実験における陽子数分布ゆらぎの測定

RHIC ビームエネルギー走査実験において、正味陽子数分布の 4 次ゆらぎが衝突エネルギーに対して非単調に振る舞うことが報告され、7.7 GeV 付近の増大が QCD 臨界点の信号であると期待されている。本研究では、さらに低いエネルギーである固定標的実験 3 GeV において、陽子数分布の 4 次ゆらぎの測定を行った [7]。測定結果は HADES Collaboration からの 2.4 GeV における報告と誤差の範囲内で

一致しており、また 7.7 GeV 以上の結果とは異なり、負の値を示している。この負の値はハドロン輸送模型 (UrQMD) で再現されるため、実験結果はハドロン間の相互作用およびバリオン数保存による効果と矛盾が無い。以上のことから、臨界点が 3 GeV 以下の領域に存在する可能性は低く、今後 3 GeV から 20 GeV までの精密測定が不可欠である。

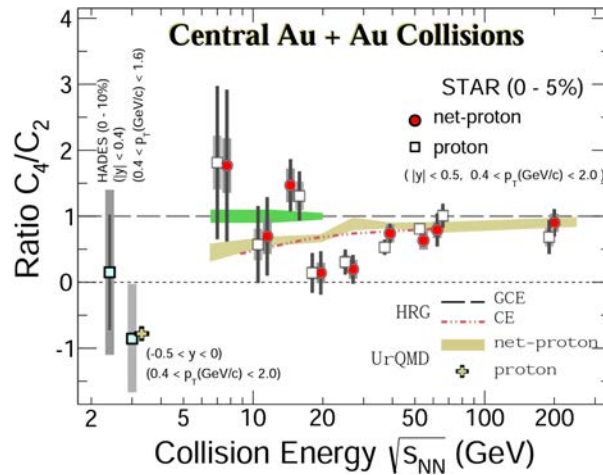


図 49 (正味) 陽子数分布の 4 次ゆらぎの衝突エネルギー依存性 [7]。

粒子数ゆらぎに対するバックグラウンド除去手法の考案

格子 QCD 計算によれば、正味電荷、正味バリオン数、正味ストレンジネス数の間の相関キュムラントの適切な組み合わせを取ることにより、重イオン衝突実験において生成されると言われている強磁場に敏感な測定量を構築することが可能である [8]。一方、その測定量はバリオン数・ストレンジネス数間の相関キュムラントを含んでいるが、その両方の保存量を併せ持つハイペロンは、その短寿命のため検出器で測定される前に崩壊しストレンジネスを失い、その再構築には多くのバックグラウンド事象を伴う。

我々はハイペロン数のキュムラントおよび相関キュムラントからバックグラウンドの効果を除去するための補正手法を考案した [9]。不変質量分布における信号事象から離れた質量領域におけるキュムラントが、信号事象に混ざる識別不可能なバックグラウンドと同等であるという仮定の下、前者を用いることにより後者を実験データから除去するための補正式を導出した。また、検出効率とバックグラウンド両方の効果を考慮した数値シミュレーションにおいて本手法の妥当性を確認した。今後実験データにおいて本手法を用いることで、相関キュムラントの統計誤差を最小化することが可能となる。

4 次元 Un-folding 解析による正味陽子数などの保存量分布と温度分布の観測

保存量分布の高次形状に関する測定が、QCD 臨界点近傍で発散することから、臨界点探索の有力な候補として期待されている。RHIC の第 1 期衝突ビームエネルギー走査実験において正味の陽子数分布の高次ゆらぎ（特に 4 次の分布形状）に非単調な振る舞いが観測され、その振る舞いを高統計・高精度で確認するために第 2 期衝突ビームエネルギー走査実験が進んでいる。その非単調な振る舞いが、本当に臨界点からの信号である場合には、他の多くの観測量においても同時に様々な変化が観測されるはずで

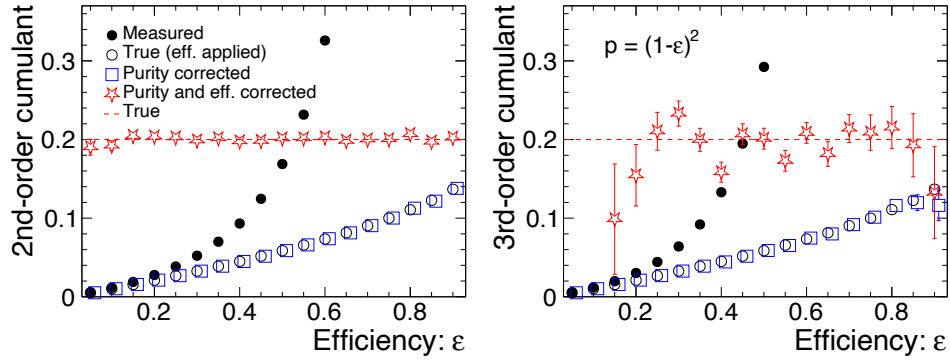


図 50 数値シミュレーションにおける補正手法の妥当性の検証結果。補正前の結果が黒塗りつぶし、検出効率の効果を含んだ結果が黒丸、検出効率補正およびバックグラウンド補正を施した結果が赤星である。

ある。その一つとして、ここで注目したのが、温度分布のゆらぎである。保存量分布とその温度（平均 p_T ）分布の両方を同時に観測するためには、それら 4 変数間の相関を観測する必要があり、つまり陽子数、反陽子数、陽子の温度、反陽子の温度の分布形状を同時に観測するため、4 次元 Un-folding 手法によりそれらの 4 つの分布の形状を同時に再構成する手法を開発した。図 51 は、この unfolding 手法によって、4 次元情報 (N_A , N_B , T_A , T_B)、つまり、粒子 A,B の収量分布とそれぞれの温度分布が、繰り返し計算により再構成されていく様子を表している。

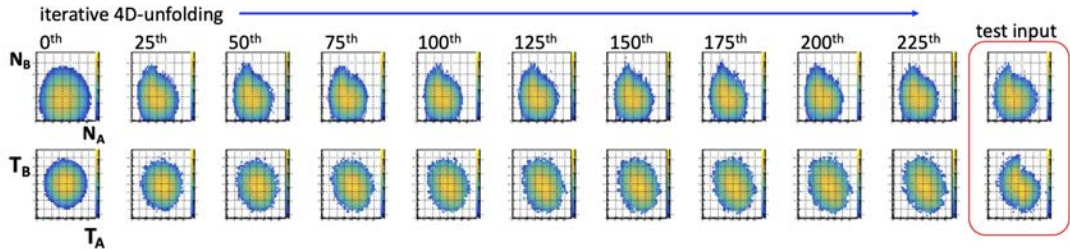


図 51 逐次 unfolding 手法による 4 次元情報 (N_A , N_B , T_A , T_B)、つまり粒子 A,B の収量分布及び、平均 p_T 分布測定による温度分布が、左から右へ繰り返し計算により再構成されていく様子を表している。上の列が (N_A , N_B) 相関を表し、下の列が (T_A , T_B) を表す。最右はテスト入力分布であり、観測する粒子数分布と平均 p_T 分布を用いて、任意の入力分布から始めた結果がテスト入力分布に近づいていく様子を表す。

RHIC-STAR 実験 固定標的実験 金 + 金衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 3.0, 7.2$ GeV における

Λ 粒子のグローバル偏極の測定

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 $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV から 5.02 TeV に渡って測定されてきた [10, 11, 12]。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。

一方で理論計算によると系の軌道角運動量方向の角速度はエネルギーが低くなるとともに大きくなるが、ある値を境に急激に小さくなる [13]。そこで RHIC-STAR 実験では固定標的型実験 $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$, 7.2 GeV において Λ 粒子のグローバル偏極の測定を行った。いずれのエネルギーにおいても有限なグローバル偏極のシグナルが観測され、 $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV ではこれまでの測定結果のうち最も大きな値であった。また、これらの測定により $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV までこれまでの傾向と同様に衝突エネルギーが低くなるとともに、値が大きくなる傾向が観測された [14]。一方でグローバル偏極は磁場等の寄与によって粒子と反粒子で差が生じると考えられているが、これまでの測定結果は不確かさの範囲内で Λ 粒子と $\bar{\Lambda}$ 粒子に優位な差は観測されていない。そこで RHIC-STAR 実験では Beam Energy Scan I I によって低い衝突エネルギーにおいて、高統計なデータセットが取得された。これによって詳細なグローバル偏極の測定が期待されている。また、それに加えて前方領域の検出器のアップグレードが行われた。これによってより広範囲領域におけるラピディティ依存性の測定も今後期待されている。

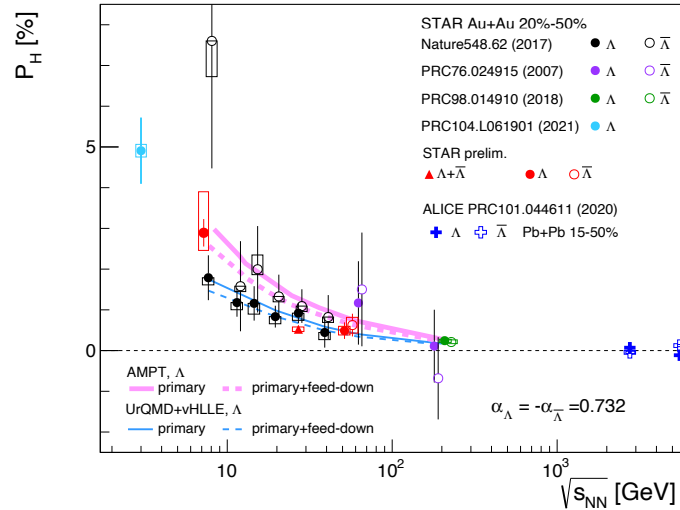


図 52 Λ 粒子の偏極の衝突エネルギー依存性

原子核衝突における局所渦に起因するスピン偏極の測定

原子核衝突では、反応平面方向に強く膨張するという楕円フローが観測されているが、それに伴ってビーム方向を回転軸とするような局所的な渦が生成されることが予測される。STAR 実験では、金原子核衝突においてこの局所渦に起因する偏極を Λ ハイペロンを用いて観測した [15]。楕円フロー (2 次) だけでなく、密度分布の揺らぎにより生じる 3 次や 4 次などの高次フローも観測されており、これに伴う局所渦の生成が予測される。局所偏極に関しては、流体や輸送計算モデルが実験データの符号や大きさを定性的に再現できず、スピンパズルと呼ばれているため、高次の局所偏極の実験データはスピンパズルを理解する上で重要である。

本研究では、高統計の同重体原子核衝突データを用いて、 Λ ハイペロンのビーム軸方向の偏極 P_z の測定を行った。図 53 (左, 真中) は、検出器補正前の P_z の方位角依存性を示している。金原子核衝突同様に、2 次のイベント平面 (Ψ_2) からの方位角に依存して、偏極シグナルの符号が変化しているのがわかる。さらに、初測定となる 3 次のイベント平面 (Ψ_3) 依存性でも 2 次同様にサイン関数のような方位

角依存性が観測された。これは楕円フローだけでなく、衝突初期の密度揺らぎに起因する三角フローからも局所渦が生成されていることを示唆している。さらに図 53 (右) は、 P_z の 2 次のサインフーリエサイン係数の中心衝突度依存性である。同じ衝突エネルギー ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV) である金原子核、LHC-ALICE 実験の鉛衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV) と比較すると、衝突核種のシステムサイズ依存性が見られる。本結果は、スピンパズルの解決に向けて重要な結果であり、今後理論モデルとの比較を行う予定である。

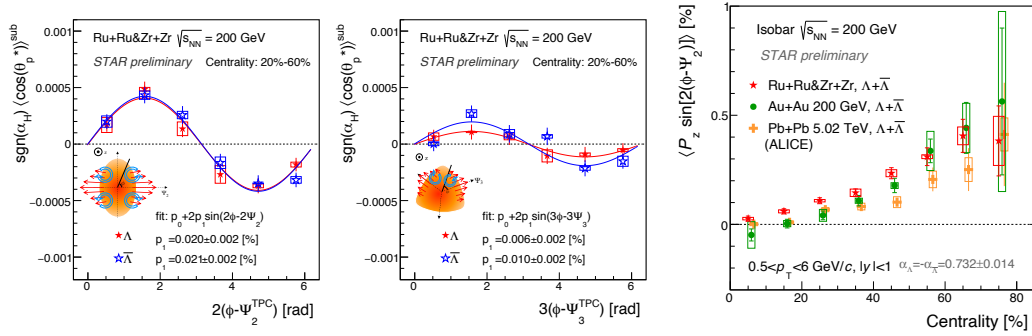


図 53 同重体原子核衝突 (Ru+Ru, Zr+Zr) における Λ ハイペロンのビーム軸方向の偏極。2 次 (左) と 3 次 (真中) 平面に対する検出器効果補正前の偏極の方位角依存性。RHIC における同重体と金原子核、LHC における鉛衝突における局所偏極の 2 次のフーリエサイン係数の中心衝突度依存性 (右)。

同重体原子核衝突におけるカイラル磁気効果の探索

原子核衝突では、(特に 2 つの原子核中心がずれた非中心衝突では) 衝突初期に強磁場が生成されることが予測されている。QCD 真空の揺らぎによりカイラリティが有限の値を持ち、QGP 中でカイラル対称性が回復していると、磁場方向に電流が発生する現象 (カイラル磁気効果: CME) [16] が予測されている。RHIC や LHC において、これまでに CME 探索が行われているが、バックグラウンド (BG) の影響が大きく、決定的な実験的証拠は見つかっていない。STAR 実験では CME 探索を目的として、2018 年に同重体の原子核衝突実験 (Ru+Ru と Zr+Zr) を実施した。質量数が同じだが原子番号の異なる原子核を用いることで、BG を同じに保ちつつ、初期磁場 (の 2 乗) を (Ru 衝突のほうが) 約 15% 大きくさせることが可能である。このデータ解析はブラインド解析として実施され、筑波グループも解析グループの 1 つとして参加した。

図 54 は、各ブラインド解析の結果である。CME に敏感な量とされる 3 粒子相関 $\Delta\gamma_{112}/v_2$ が 2 つの衝突系の比として示されている。もし CME の効果が観測されれば、 $\Delta\gamma_{112}/v_2$ 比は 1 より大きくなるはずだが、どれも 1 より小さいことがわかり、事前に定義した CME シグナルは観測されなかった。これは 2 つの原子核の変形度合や中性子スキンの違いが、BG や粒子多重度に影響しているためだと考えられる。粒子多重度が大きいと相関が希釈されてしまうためである。粒子多重度の比 $1/N_{\text{trk}}^{\text{offline}}$ が $\Delta\gamma_{112}/v_2$ に近いことからベースラインが 1 ではないことを示唆している。今後は、BG や粒子多重度の差を考慮して、新たなベースラインを定義し、 $\Delta\gamma_{112}/v_2$ における CME 効果定量的に評価する。本結果は、Physical Review C に出版された [17]。

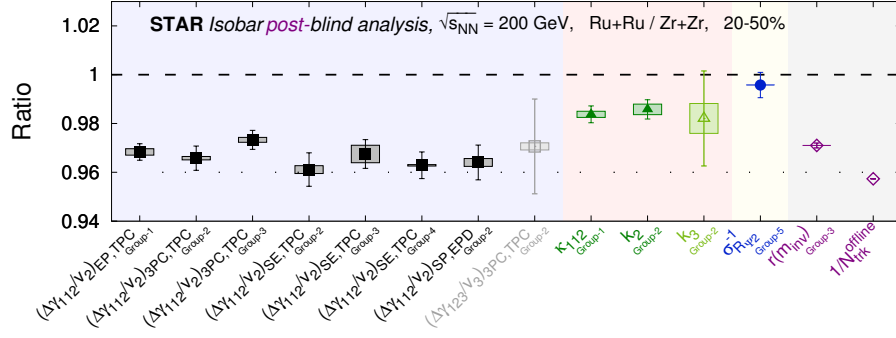


図 54 CME に敏感な測定量の同重体原子核衝突 (Ru+Ru, Zr+Zr) 間における比 [17]。特に、 $\Delta\gamma_{112}/v_2$ は CME に敏感な 3 粒子相関、 $N_{\text{Trk}}^{\text{offline}}$ は荷電粒子多重度を表す。

RHIC-STAR 実験における 2 粒子相関を用いた Λ - Λ 及び Ξ - Ξ 相関の測定

ハイペロン-ハイペロン相関は、HALQCD をはじめとする格子 QCD 計算において盛んに計算されているが、未だ理論的にも実験的にも明らかなことは少ない。特に、 Λ 粒子同士が相互作用を起こした場合、6つのクォークからなるバリオンである H ダイバリオンが生成される可能性がある。また、 Ξ - Ξ 相関についても束縛状態の有無が議論されている。実験的には、スイスの CERN-ALICE 実験、アメリカの RHIC-STAR 実験によって Λ - Λ 相関関数が測定され、得られた散乱パラメータから束縛状態について議論されたが、双方とも統計的揺らぎが大きい結果であった。本研究では総統計 28 億イベントのデータを用いて、高精度な Λ - Λ 相関、また Ξ - Ξ 相関の測定を行なった。 Λ - Λ 相関、また Ξ - Ξ のどちらについても、強い負の相関が得られた。また、 Ξ 粒子は荷電粒子のため、クーロン相互作用が働く。今回、クーロン波動関数に基づいたクーロン相互作用の強さを計算し、実験データと比較したところ、相関関数とよく一致する結果が得られた (図 55)。この結果は、同種粒子間に働く量子力学的干渉効果と強い相互作用と打ち消し合っている可能性を示唆している。今後、崩壊粒子の影響や運動量分解能の補正を行い、相関関数を詳細に測定する予定である。これらの結果は、国際会議 Starngeness in Quark Matter (M. Isshiki, EPJ Web Conf. 259 (2022) 11015) や The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference、日本物理学会において報告した。

Identical pion HBT study in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 27.0$ GeV at RHIC-STAR

Femtoscopic studies provide direct tool to measure the size, lifetime and shape of the fireball produced in the collisions which are necessary to obtain the equation of state of the system. Since the size and lifetime of the system have orders 10^{-15} m and 10^{-23} s, respectively, it is impossible to measure them directly. This makes femtoscopic analysis very important in this field. Femtoscopic analysis also provides various strong interaction parameters which also makes these analysis a very hot topic of research. Femtосcopy is inspired from Hanbury-Brown and Twiss interferometer (HBT) where photons were exploited to measure the size of distant stars in 1950s and 1960s. This idea was independently applied in heavy-ion collisions to probe space-time characteristics of the source using particle correlations in momentum space. The main source of correlations in heavy-

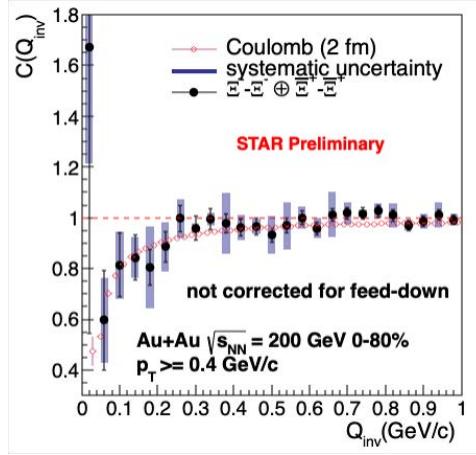


図 55 ミミ 相関関数。赤色の点がクーロン相互作用の大きさを表している。

ions collisions are: (1) Quantum statistics (Bose-Einstein or Fermi-Dirac statistics depending on particles whether they are identical bosons or fermions). (2) Final state interaction (FSI) which includes Coulomb and strong interactions. Two-particle correlation function $C(q)$ can be expressed with Koonin-Prat's equation: $C(\mathbf{q}) = \int d\mathbf{r} |\psi(\mathbf{q}, \mathbf{r})|^2 S(\mathbf{r})$ where $\Psi(q, r)$ is the pair wave function which includes all the interactions, $S(\mathbf{r})$ is source functions, and q and r are relative momentum and relative distance of pair particles, respectively. This source function contains all the space-time information about the system which can be extracted using above equation. Experimentally, $C(q)$ can be constructed by taking the ratio of two particle spectra over the product of single particle spectra.

In heavy-ions collisions, directed flow $v_1(= \langle \cos(\phi - \psi_1) \rangle)$ is produced due to interaction between spectator and participant particles and it was found that $v_1(\eta)$ is zero three times at around mid, forward and backward rapidities which could be a possible signature of phase transition. This behaviour can be explained if we assumed our source is tilted with a tilt angle θ_s . Azimuthal-angle dependence of pion femtoscopy relative to the first-order event plane for different collision energies can provide a large set of observable like space-time dimensions of the sources produced at different energies as well as shape and eccentricity of them. More importantly, tilt angles of fireball which could signal the QCD critical point.

Currently, this analysis is being preformed using Au+Au collision data at $\sqrt{s_{NN}} = 27$ GeV. The goal is to measure various radii of the fireball produced in the collision as well as tilt angle of the fireball. The analysis is in advanced stage and various source parameters and tilt angle have been obtained for different centrality, pair momentum and pseudo-rapidity bins after performing event plane resolution corrections. Coulomb and momentum resolution corrections are being performed as well well preparation of analysis note is ongoing. In future, I would like to perform this analysis and flow measurement studies for other collision energies.

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

高エネルギー重イオン衝突における QGP 流体の時空発展、特に衝突初期条件及び熱平衡化機構に対する有望な探針として、小さい衝突系における方位角異方性 v_n が挙げられる。RHIC-PHENIX 実験による $p+Au$ 、 $d+Au$ 、及び $^3\text{He}+Au$ 衝突における測定では、 v_n が衝突初期形状に対するスケーリングや流体力学計算との一致を示し、荷電粒子多重度 $dN_{ch}/d\eta = 13$ 程度の小さい系での QGP 生成が示唆された [18]。また、最近の二粒子相関法による独立測定 [19] において、これらの観測結果が再確認されるとともに、ジェット由来の non-flow の影響により v_n が測定に使用する運動学的領域に強く依存することが判明した。今後の課題として、衝突初期条件、熱平衡化過程、流体発展、及び non-flow 等の、各種成分の v_n に対する寄与を精度良く理解することが重要である。

今回 non-flow の成分の理解を目的に、 v_n の運動学的領域依存性の測定を、周辺 $p+Au$ 衝突や $p+p$ 衝突等の、 $dN_{ch}/d\eta = 2 \sim 3$ 程度の極小さい系に拡張した [20]。図 56 に両衝突系における v_2 の横運動量 p_T 依存性を示す。図中 BB では後方領域の検出機二つ ($-3.9 < \eta < -3.1$, $-2.2 < \eta < -1.2$) を、BF では後方の検出機一つ ($-2.2 < \eta < -1.2$) と前方領域の検出機 ($1.2 < \eta < 2.2$) 一つを使用し v_2 を測定した。non-flow の影響が増大する極小さい系において、運動学的領域依存性が強くなることが確認されるとともに、AMPT モデルが v_2 を過大に評価し、観測結果を再現しないことが判明した。

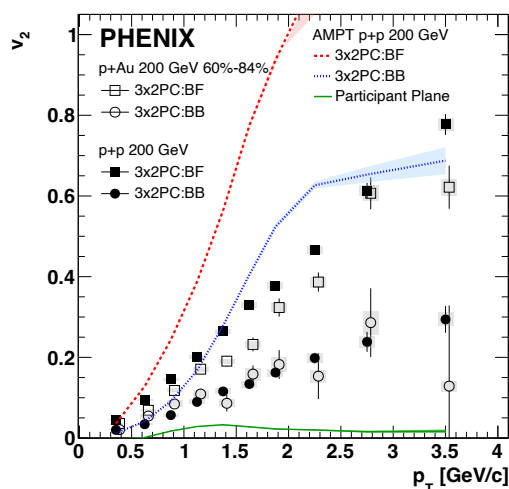


図 56 $p+p$, $p+Au$ 衝突における荷電粒子 v_2 の横運動量及び運動量学的領域依存性

今後これらのデータを用いて既存の各種モデル計算におけるパラメータを制限することが可能となり、小さい系で測定された v_2 における non-flow 成分の定量化につながると期待される。本結果は、Physical Review C へ投稿された。

AMPT シミュレーションによる小さい衝突系における楕円的集団膨張の検証

高エネルギー重イオン衝突においてクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態が生成されている事はほぼ確実視されているが、陽子+陽子、および、陽子+原子核衝突などの小さい衝突系においてこれまでに観測されてきた楕円の方位角異方性 v_2 の起源が、QGP であるかどうかを検証するために、RHIC 及び LHC の実験で様々な小さな衝突系における衝突実験を遂行し関連する多くの測定が行われ

ている。RHIC 加速器における PHENIX 実験と STAR 実験においても、小さな衝突系におけるエネルギー走査実験や、衝突系を走査する衝突実験が行われた。特に、200GeV の重心エネルギーにおいて両実験で行なった p+Au, d+Au, $^3\text{He}+\text{Au}$ 衝突実験において、著しく異なる結果が観測されたため、その違いをシミュレーション計算により検証する研究を行なった。2 粒子相関解析を、異なる η 領域から選び、 η -gap を取ったり 3-sub 法を用いることにより測定した 3 通りの v_2 の結果を、図 57 に表している。青点で表した結果は、3 つの η 領域、前方 1[1.5,2.5]、後方 1[-2.5,-1.5]、中心領域 [-1,1] を用いた 3-sub 法により求めた中心領域での結果であり、黒点は同じく、後方 1、後方 2[-4,-3]、中心領域を用いた 3-sub 法による結果で、赤点は中心領域のみで η -gap を取った結果である。黒と青が PHENIX 実験の条件に合わせたものであり、赤が STAR 実験の条件に合わせた結果である。黒の結果のみを主張する PHENIX 実験の結果だけでは明らかに不十分であり、運動学領域の選び方、及び、non-flow を引くことの重要性を表している。また、右側 2 列に示したように、これらの非対称な小さい衝突系 (軽原子核+重イオン衝突系) に加えて、O+O などの対称な小さい衝突系による実験も、RHIC では既に、LHC でも今後行われることが決まっている。

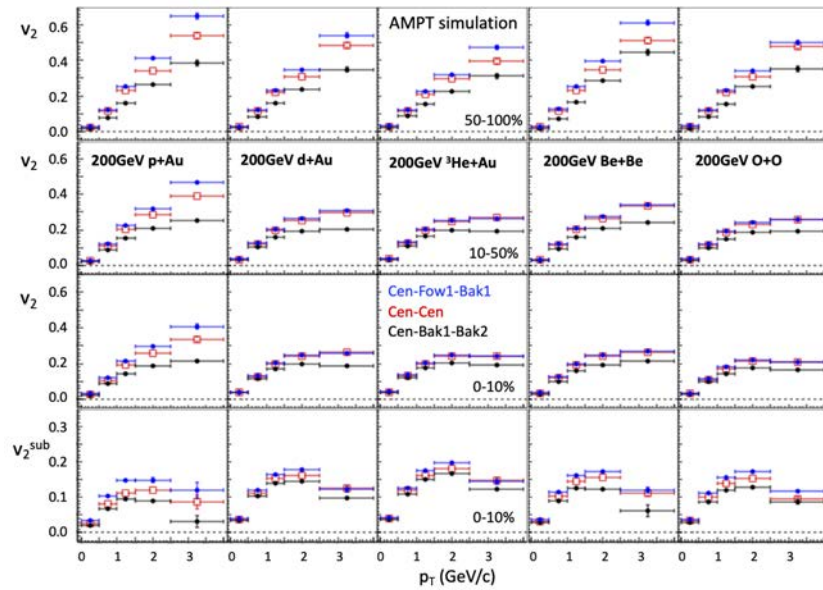


図 57 AMPT モデルを用いた 200GeV における (左から右へ)p+Au, d+Au, $^3\text{He}+\text{Au}$, Be+Be, O+O 衝突における楕円方位角異方性 v_2 の p_T 依存性。上から、50-100%(周辺衝突), 10-50%, 0-10%(中心衝突) で、最下段は non-flow 効果を差し引いた後の 0-10%(中心衝突) における v_2^{sub} 。データ点のシンボル・色の違いに関しては本文中を参照。

ALICE におけるジェット測定

高エネルギー重イオン衝突において、ジェットの測定はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性を決定するために重要な観測量である。ジェットの生成は初期パートン同士のハード散乱 (運動量移行 Q^2 が Λ_{QCD} 十分大きいもの) に起因する。そのパートンが QGP 中を通過することでパートンのエネルギー損失が起こり、ジェットの収量が減少する (jet quenching)。したがって、重イオン衝突でのジェット収量が、陽子・陽子衝突のものとは比べてどれかで減少しているのかを見ることにより、QGP

中でのパートンのエネルギー損失機構や阻止能の測定が可能になる。

2021年度では、以下の観点からジェットの測定、およびデータ解析を進めた。陽子・陽子 $\sqrt{s_{NN}} = 13$ TeV のデータを用い、ジェットの中に生成される中性中間子 (π^0, η) を測定した。その結果、低い p_T 領域において、 η/π^0 比がジェットを要求しない場合と比較して大きな小さいことが分かった。なぜジェットを要求すると η/π^0 が減少するのかはまだ明確ではないが、可能性として η と π^0 の破碎関数 (Fragmentation Function) 低い p_T 領域 (10 GeV/c 以下) で異なっている可能性がある。今後、破碎関数を測定することにより、その原因が明らかになる可能性がある (パク ハンソ, 2021 年度修士論文)。

また、クォークジェット、グルーオンジェットの識別を機械学習を用いて行った。両ジェットの違いは、ジェットの形状 (angularity など) に洗われるため、これらを Monte-Carlo データを用いて学習させ、機械学習によって実データの仕分けを行った。初期結果として、両ジェットが効率良く識別されていることが分かった。(岡田柊人, 2021 年度修士論文)

ジェットが QGP 中を通過した際、QGP 中に落とされたエネルギーがどのように再分配されるのかという点は、QGP 物性研究において重要な研究テーマの 1 つである。これは QGP 媒質応答と呼ばれ、マッハコーン衝撃波との関連も指摘されている。本年度では、陽子・陽子 $\sqrt{s_{NN}} = 13$ TeV のデータを用い、ジェット周辺の粒子生成において、(反) 陽子と $\pi^\pm$ 中間子の識別を行い、その粒子比の変化をジェット軸からの距離 (r) の関数として求めた。その結果、距離 r が大きくなるほど生成比 (p/π) が増加し、ジェットを要求しない生成比に近づくことがわかった。またどのコーン半径でも $r=0.4$ 以降は一定の値となっており、ジェット内外の構造を捉えることができた。本研究により、ベースラインとなる陽子・陽子衝突での生成比の変化を捉えることができた。重イオン衝突で同じ測定を行うことにより、QGP 媒質応答の進展が期待できる (佐藤航輝, 2021 年度卒業論文)。

ALICE における重クォーク測定

チャームクォークやボトムクォークなどの重いクォークは衝突初期のハードな散乱で主に生成され、その生成は量子色力学 (QCD) により理解されてきた。そのため高エネルギー原子核衝突実験で重いクォークを測定することにより、QGP 中でのパートン運動力学や性質が明らかにできると期待されている。また QCD の予言によるとパートンは QGP 中でカラー荷、質量などに依存してエネルギーを失うことが予言されており、重いクォークを用いたエネルギー損失の研究は高温高密度下での QCD 検証という点においても重要な役割を果たす。我々のグループは D meson や B meson から崩壊してくる電子を測定することにより、その生成量が強く抑制されていることを発見し、さらなるエネルギー損失機構の解明のために方位角異方性の強度 (v_2) の測定を行っている。

近年小さい衝突系である陽子-陽子衝突や、陽子-鉛衝突での高粒子多重度事象においても、リッジ構造や有限の v_2 など、重イオン衝突と同様な QGP 生成を示唆するの結果が得られている。一方で粒子生成においては、エネルギー損失による抑制効果は観測されず、逆に高粒子多重度事象で生成量の増加が観測されている。このような増加傾向はチャームクォークを含む D 中間子や、 D 中間子から崩壊してくる電子でも観測されている。この現象は高粒子多重度事象におけるパートン再結合モデル (color reconnection model) によりよく記述がなされている。我々のグループではパートン再結合モデル検証のために、ボトムクォーク由来電子の粒子多重度依存性の測定 (千葉俊哉, 2021 年度修士論文) や、パートンレベルでの検証のため heavy quark 由来のジェットの粒子多重度依存性の測定 (江下もも, 2021 年度修士論文) を行った。

ALICE における W ボソン生成

LHC の QGP 研究では、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) を用いた研究も行われている。ウィークボソンは色電荷を持たないため、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。またウィークボソンの生成は原子核中のパートン分布に敏感なため、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。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 ボソンから崩壊する電子を電磁カロリメータを使うことにより、その生成断面積の測定に成功した。図 58 は陽子陽子 13TeV 衝突における W ボソンから崩壊する電子の生成断面積の測定結果である。測定された生成断面積は摂動的量子色力学により予想された生成断面積と実験及び理論計算の誤差の範囲で一致することが得られた。さらに W ボソンから崩壊する電子の生成量を粒子多重度毎に測定することも行った。LHC-ALICE 実験では様々な粒子の粒子多重度依存性が陽子陽子 13TeV 衝突で測定されており、高多重度事象では生成量の急激な増加が測定されている。この急激な増加はカラー再結合と呼ばれる物理過程により説明がなされている。一方でウィークボソンは色電荷を持たないため、カラー再結合による効果は小さく、急激な増加は起こらないと予想される。従って、ウィークボソン生成の粒子多重度依存性の測定は、カラー再結合による粒子生成を検証する上で、有効な手段と考えられる。図 59(赤いデータ点) は陽子陽子 13TeV 衝突における W ボソンから崩壊する電子の生成量の粒子多重度依存性の測定結果である。結果は高多重度事象で急激な増加は起こらず、W ボソンから崩壊する電子の生成量は粒子多重度に対して線形に増加する結果が得られた。また W ボソンと共に作られるクォーク由来の荷電粒子 (青いデータ点) は高多重度事象では生成量の急激な増加が観測された。これらの違いはカラー再結合を考慮した量子色力学の計算結果 (図中の実線) によく再現された。

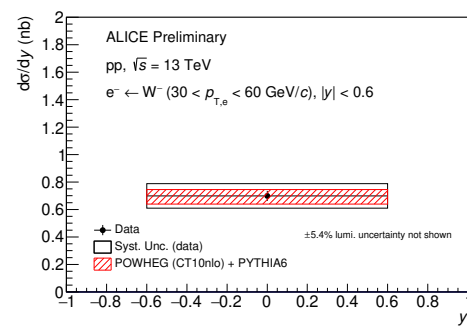


図 58 陽子陽子 13TeV 衝突における W ボソン由来の電子の生成断面積。

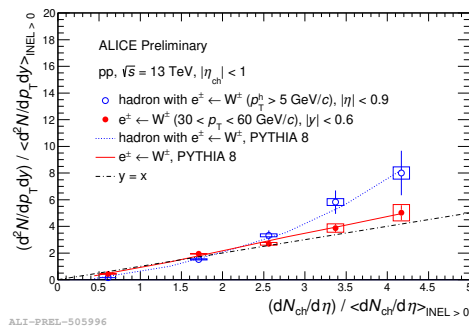


図 59 陽子陽子 13TeV 衝突における W ボソン由来の電子と W ボソンとともに生成されるクォーク由来のハドロン生成の粒子多重度依存性。

Soft and neutral mesons production in ALICE

The soft and neutral meson Physics Analysis Group (PAG) coordination was started in November

2021. The newly formed group is responsible in overseeing the analysis related to both neutral meson analyses and also soft photons.

We have ongoing analysis of the new neutral meson reconstruction in pp at $\sqrt{s} = 13$ TeV. The analysis is combining 7 different methods in order to minimize the uncertainties of the final data. It also extends to reconstructing the multiplicity dependent meson production in 7 different multiplicity classes.

The first measurement of the direct photon HBT results were performed in this period, shining light on the source size evolution of the medium. Furthermore, the new direct photon measurements were also performed in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, providing an important piece of the quark-gluon plasma signature at these energies.

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) 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、設置する計画である。それにより前方方向に発生する直接光子、中性ハドロンからの崩壊光子の位置、エネルギーを精度よく測定し、(1) ハドロンの普遍的な描像「カラーガラス凝縮 (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、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、最初の物理測定を行う。

2021年度の活動を報告する。FoCal は TDR (Technical Design Report) 策定に向けて、検出器の最終デザインを決定する段階に入っている。2023年に TDR を CERN の国際委員会 LHCC に提出し、建設に向けた最終審査を受ける。日本グループは、FoCal の主要部である「FoCal-E pad」の主担当であり、本プロジェクトを主導している。中條と Novitzky は FoCal-E pad 検出器のコーディネータを務める。

2021 年度では、P 型シリコンセンサーとフロントエンド集積回路 HGCROC を接続するために、新たな基板開発を仏・Grenoble LPSC と行い、第 3 号試作機を製作した。製作したモジュールを CERN SPS 加速器のテストビームラインにてテストした (10-11 月) 60。シリコンセンサーに 120 GeV ハドロンビームを照射し、応答度を測定したところ、最小電離粒子シグナルが明確に観測されていることが分かった。更に、モジュールの前面にタングステン板を複数設置し、80 GeV/c の電子ビームを照射し、電子シャワーの測定に成功した。これらの結果と Pixel 検出器、ハドロンカロリメータ検出器の実験結果を合わせて、CERN EP newsletter [21] に記事を投稿、掲載された。

2018 年に我々日本グループが製作した FoCal 第 2 号試作機 (mini-FoCal) のデータ解析を進めた。学術誌への投稿の最終段階にある。性能を評価した結果、エネルギー分解能にして約 4% を達成していることが分かった (目標 5% 以下)。また筑波大学、理化学研究所、筑波技術大学、奈良女子大学と共同で様々なセンサーの放射線耐性について、小型中性子源システム RANS を用いて測定を行った (3 月)。現在、データ解析が進行中である。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 名となり、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に至った。

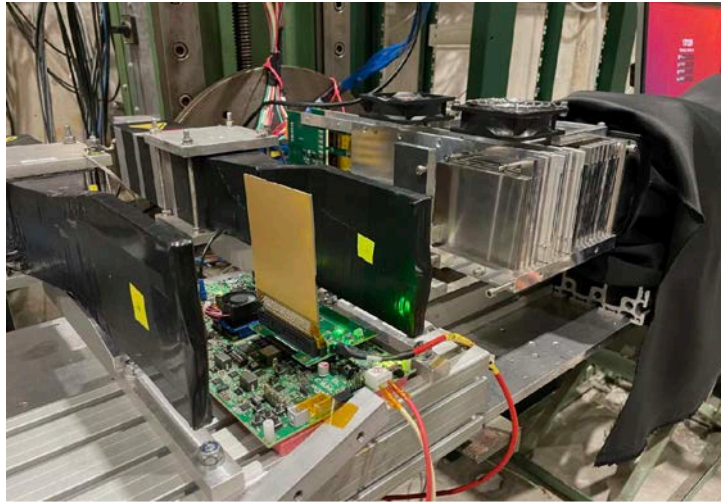


図 60 SPS テストビーム実験におけるセットアップ。中央付近に見える板状のものが FoCal-E pad の P 型シリコンセンサー。

HGCROC test for FoCal

A first prototype of a demonstrator module is under development to show the performance of the proposed readout electronics. It is composed of 18 single E-pad boards and 2 MAPs layers as shown in Fig. 61.

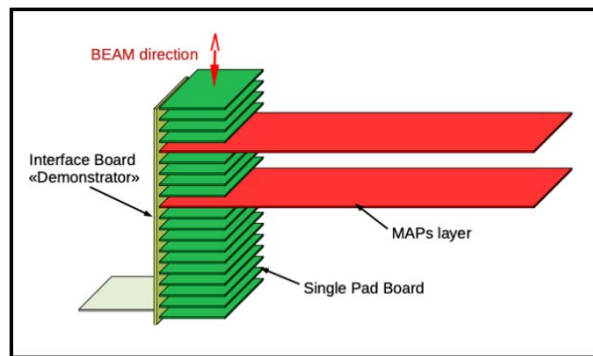


図 61 The architecture of the demonstrator prototype

They are all connected via an interface board to an aggregator system. Each single E-pad contains 72 Si-pixel sensors and a front-end ASIC (HGCROC). This ASIC ensures that the response of each sensor is read out using an integrated charge sensitive amplifier-shaper and an analog to digital conversion system ($2 - 4 \text{ fC}$ up to 10 pC) enabling the transmission of data on a standard digital connection (Ethernet and CRU). Two versions of the E-Pad single electronics board were developed. The second version ensures better mechanical robustness with smaller cavities and an easier plug-in/out connector. Figure 62 shows a photo of both boards.

This aggregator board shown in Fig. 63 contains probes to monitor the temperature, the power consumption and a local power converter to provide clean power supplies. The aggregator board is

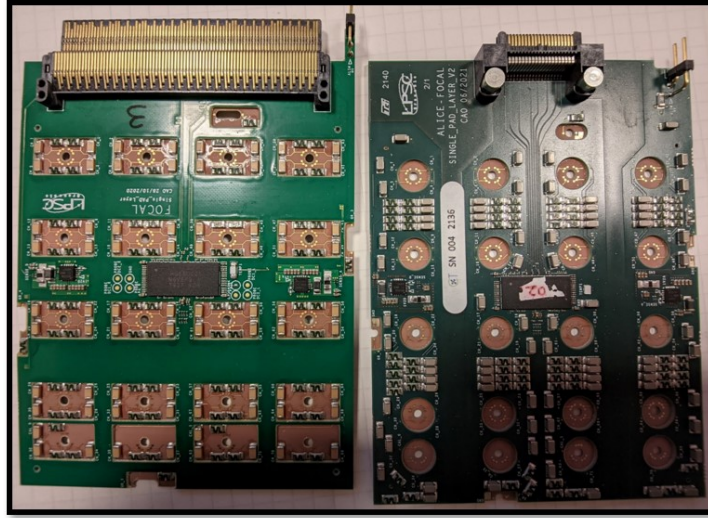


Fig 62 Photo of the version 1 and 2 of the single E-Pad electronic board

used to gather the data and trigger information from the detector at a data rate of 1,28 Gb/s. It is based on an FPGA allowing the extraction of data via multiple supports. HGCROC chips were

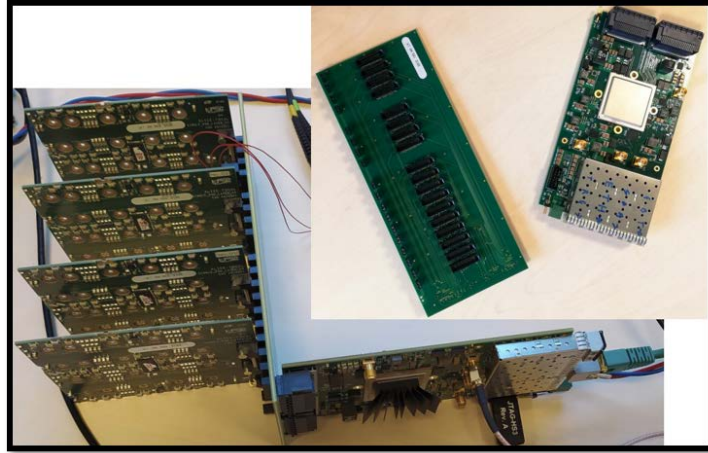


Fig 63 Photo of the aggregator board

selected using two different setups in CERN and in the LPSC Grenoble. Results of this procedure is illustrated in Fig. 64.

Different tests of characterization are ongoing to adapt the use of the HGCROC chips. First result under beam are obtained from the SPS done in September 2021 and shows the possibility of detecting the MIPS using the version 2 of the single E-Pad boards. There results are illustrated in Fig. 65.

A grounding issue was discovered during this test beam. It was corrected and tested in the laboratory conditions and the solution will be validated in the coming PS in June 2022.

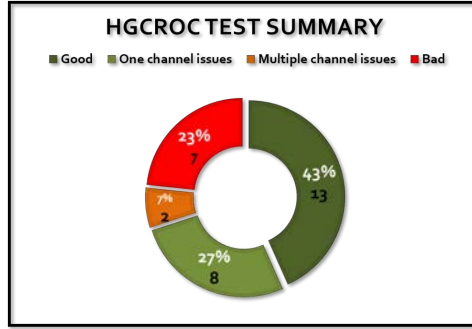


Fig 64 Results of the selection of the HGCROC chips

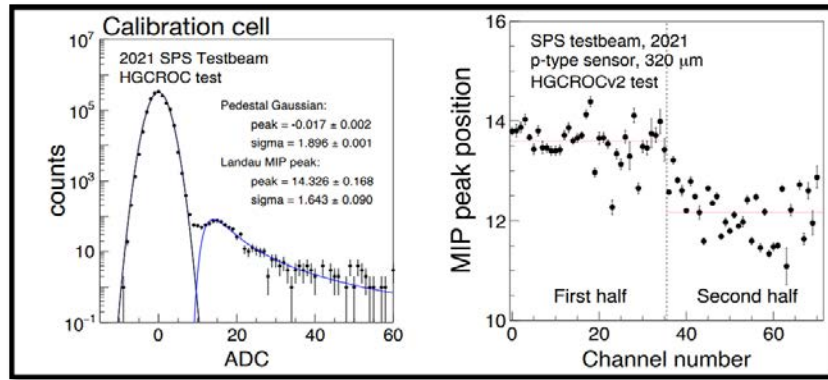


Fig 65 Results of the extractions of the MIPS using the single E-PAD V2 board

SPS 2021 testbeam

The first HGCROC board was produced in June with an attached silicon p-type sensor. The new p-type sensor also contains two small calibration cells used to track the MIP peak position during the data taking period. The sensor layout is shown in Fig. 66.

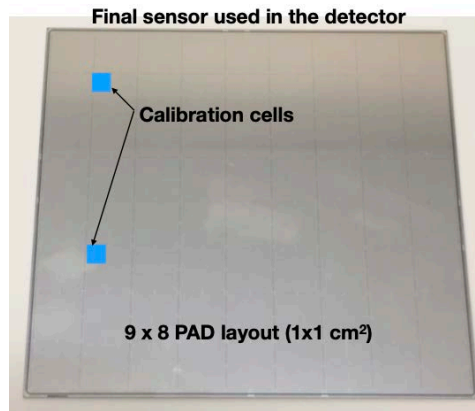


Fig 66 The silicon sensor with the two calibration cells shown.

We have tested the HGCROC using the internal injection procedure and mapped out almost the full dynamic range of the detector. We found that we can reach 4000 MIP/pad with this kind of ASIC readout. We discovered some non-linearity effects which could be explained with the current noise levels.

The noise levels were found too high when the detector was placed between the tungsten plates in the intended setup. This was then attributed to the ground pickup noise as the full setup was thoroughly grounded for safety reasons. We placed the sensor between the two scintillator triggers to collect MIP data.

We also compared the distribution obtained when placing the sensor behind 5 and 10 tungsten layers. We ran with 20, 40, 60, 80 GeV consisting of ever decreasing electron fraction. The distributions are then compared to the simulation results in Fig. 67. We find good agreement at the lower energies, but the higher energies show some disagreement from the simulation.

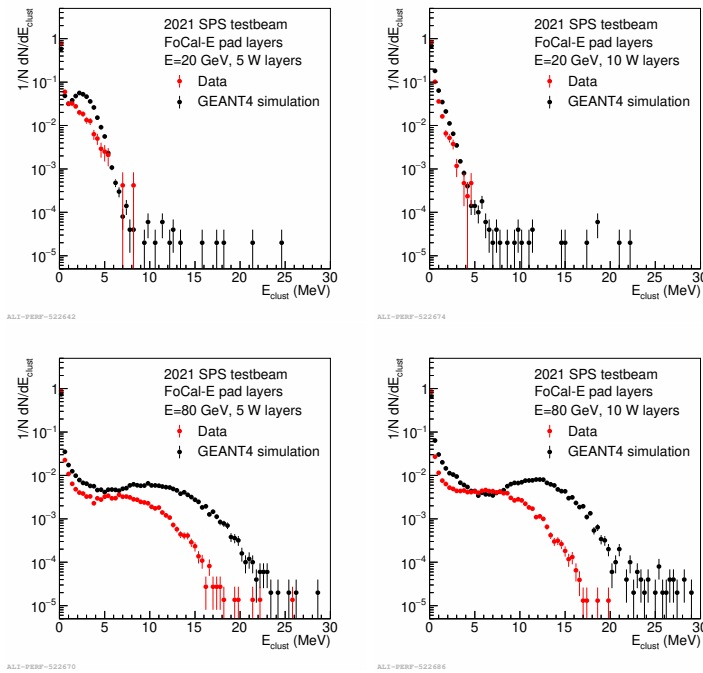


図 67 The shower distribution at 20 and 80 GeV beam with 5 and 10 W plates in front of the sensor.

J-PARC E16/E88 実験のための MRPC の開発

今年度は、5 - 6 月の J-PARC E16 実験のビームタイムにおいて、佐甲、佐藤、喜屋武の共同で、スタートタイミングカウンター (Track Start Counter) と、MRPC 試験機 2 台を E16 spectrometer の後方角に設置し、実際の E16 の実験条件・バックグラウンド環境において MRPC 検出効率および時間分解能をそれぞれ約 90%、約 80ps と評価した。佐甲を中心に $\phi \rightarrow K^+ K^-$ 測定実験 (P88) を提案し、2022 年 1 月に J-PARC ハドロン実験施設の実験審査会で審査を受け、Stage-1 Status (物理の重要性) を獲得した。喜屋武は、2020 年 11 月に LEPS 実験エリアにおいて行った MRPC の試験機の製作と性

能評価、および E16 で行った性能評価試験の結果を修士論文にまとめ、その中で、特に MRPC の読み出しストリップを伝搬する反射波の時間分解能に与える影響について示した。さらに、MRPC の耐高レート性能を向上するため、ガラスを 45° C まで昇温することによってその抵抗を低くする、新たな MRPC を製作した。この MRPC ではガラススタックをプラスチックケースに封入し、アノード、カソード基板と完全に分離することにより、それぞれの改良や交換が個別に可能となった。ガラスの昇温方式については、様々な試験を経て、2 枚の面ヒーターをカソード基板の外側に設置して温める方式を確立した。2022 年 2 月に LEPSII 実験エリアにおいて、性能評価を行った。今回はプラスチックケースのガスリークが顕著なため、空気の混入を十分抑えきれず、そのために時間分解能は約 145ps に留まったが、昇温によって約 125ps に向上することが分かり、昇温による時間分解能の向上の原理実証に成功した。

(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

マイクロビームを用いた透過 ERDA による水素深さ分布測定法の開発

筑波大学 6 MV タンデム加速器に設置したマイクロビーム分析装置において、8~9 MeV の ^4He ビームを数 μm に収束させて、透過型の弾性反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis : ERDA) による水素深さ分布測定法の開発を進めている。8~9 MeV の ^4He ビームによる水素原子核の反跳断面積は前方に集中するとともに、クーロン散乱過程よりも 2 桁程度大きな断面積を有する特徴を持つ。図 68 に透過 ERDA の実験設定を示す。

2021 年度は、水素を含む地球科学試料である白雲母 (厚さ 12.5 μm) を標的として、内部に含む水素濃度の測定を実施した。8 MeV の ^4He ビームでの測定結果 (図 69) の解析から、白雲母の平均水素密度 $(9.42 \pm 0.66) \times 10^{21} \text{ H/cm}^3$ を得た。この分析結果は、理想構造 (原子構造 $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, 密度 2.90 g/cm^3) の白雲母に対する水素密度の計算値 $8.47 \times 10^{21} \text{ H/cm}^3$ とほぼ一致した。

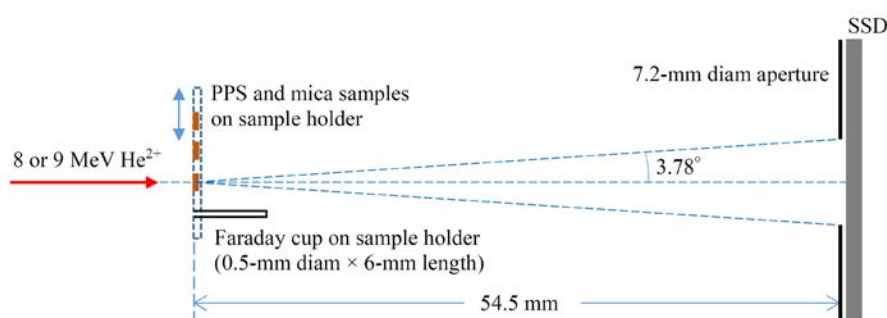


図 68 透過 ERDA の実験設定。

加速器質量分析法を用いた長半減期放射性セシウム 135 の検出法の開発

加速器質量分析法 (AMS) では、Cs スパッタイオン源からの負イオンをタンデム静電加速器により高エネルギーに加速することで対象核種と同重妨害核種との分離識別をおこなっている。近年、核時代の人為起源核種の一つとして、長半減期核種であるセシウム 135 (^{135}Cs : $T_{1/2} = 230$ 万年) の高感度検出法の開発が求められている。 ^{135}Cs は β 線核種であるために既存の放射線測定法による分析では化学

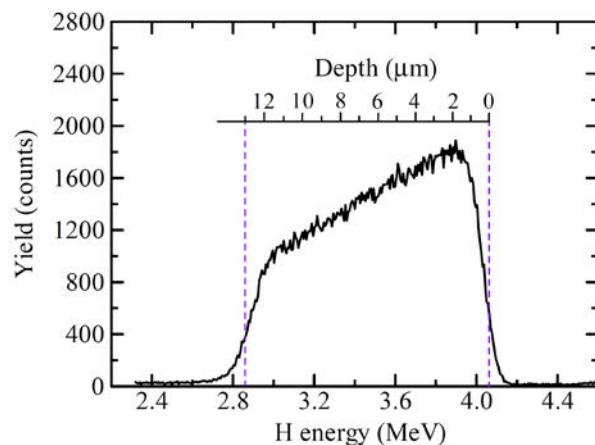


図 69 白雲母の透過 ERDA による H スペクトル。

分離や検出方法などで複雑かつ時間が掛かり、迅速な高感度検出の実施が困難となっている。タンデム静電加速器を用いた AMS では、Cs スパッタイオン源の使用から、セシウム同位体の分析が制限されることになる。 ^{135}Cs の AMS による高感度検出法の開発を進めるために、筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置に設置されている米国 National Electrostatics Corp. (NEC) 製の Multi-Cathode Source of Negative Ions by Cesium Sputtering (MC-SNICS) について、Cs の代わりに同じアルカリ金属元素であるルビジウム (Rb) をオープンに封入して、負イオンビームの生成試験を実施した。カソード試料から高電流の Cs 負分子イオンの引き出しについて検討するために、 Cs_2SO_4 , CsNO_3 , Cs_2CO_3 , CsI , CsBr 試薬を準備し、負イオンビームの質量スペクトルを測定した。引き出される負イオンビーム増強のために、添加物として PbF_2 を混合して Rb でスパッタした。 PbF_2 を混合した試料では、 $^{133}\text{Cs}^{32}\text{S}^-$, $^{133}\text{Cs}^{16}\text{O}_2^-$, $^{133}\text{Cs}^{19}\text{F}_2^-$ と同定されるスペクトルが見られ、 $^{133}\text{Cs}^{19}\text{F}_2^-$ ビームの強度が最も高い結果となった。これまでに、 $^{133}\text{Cs}^{19}\text{F}_2^-$ では最大で 100 nA の負分子イオンビームが得られており、 ^{135}Cs -AMS の実施について見込みが得られた。

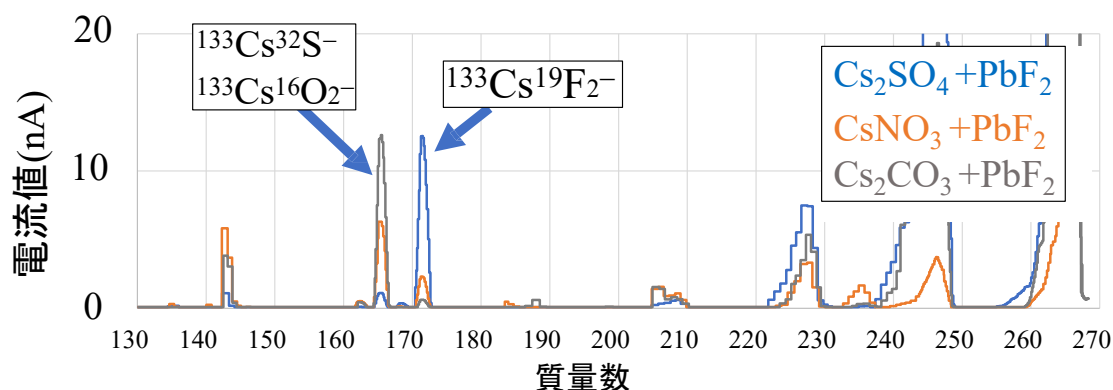


図 70 Rb スパッタによる Cs 負分子イオンの質量スペクトル。

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。2021 年度は、4 月に Ni 領域の 2 度目の質量測定実験を行い、11 月に Sn 領域の 2 度目の質量測定実験を行なった。2020 年度にキッカー磁石の改良を行い、入射時（出射時）に約 100ns（約 400ns）のフラットトップ形成が可能となった。今回は、このキッカー磁石波形を使って質量測定を行なった。Ni 領域の実験では、BigRIPS で ^{238}U の核分裂破砕反応により生成した ^{74}Ni を含む 5 核種 (^{78}Ge , ^{77}Ga , ^{76}Zn , ^{75}Cu と ^{74}Ni) を R3 に入射させた。この実験では、 ^{76}Zn をリファレンスとして R3 の等磁性磁場を調整した。測定された R3 内の飛行時間の運動量依存性を図 71 に示した。全ての核種が、400 ns の時間幅に収まっているのがわかる。また、前回より慎重に等磁性磁場を調整したため以前の実験より良い等時性度を得た。Sn 領域の実験では、以前の測定で質量の大きな系統的な不明確さを示していた ^{125}Ag と ^{124}Pd の質量の再測定を試みた。この実験では、ビーム輸送系の不具合等により非常に低い入射効率となり、結果的に 63 イベントの ^{125}Ag のみを取り出された (^{124}Pd に対しては 0 イベント)。いずれの実験でも、測定された R3 での飛行時間を速度あるいは運動量で補正することにより質量が決定できるが、質量測定のデータは解析中である。今後は、ビーム輸送系の不具合等を改善し、新たな質量測定に臨む予定である。

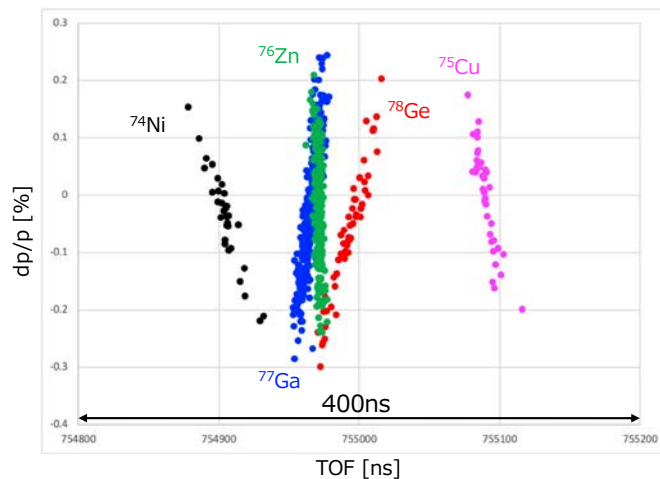


図 71 Ni 領域の実験で出射されたイベントの R3 での飛行時間 (ns) と運動量 (%) の相関。異なる色は異なる核種を示す。

稀少 RI リングで用いる位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の開発

稀少 RI リングを利用した不安定核の精密質量測定にとって、輸送するビームの質（位置や角度等）を最適化することは、リングへの入射および出射効率だけでなく質量精度（運動量の補正に位置情報を使う）の向上につながる。現在、炭素薄膜と 2 枚の Micro Channel Plate (MCP) によって構成された位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の開発を進めている。BE-MCP90 は、ビームが炭素薄膜を通過する際

に放出される二次電子を、互いに直交する磁場と電場により前方と後方に設置された MCP へと輸送することができる。MCP は炭素薄膜に対して 90 度に設置されている。これにより、2 台の MCP に到達するまでの二次電子の飛行時間の差が炭素薄膜に入射するビームの水平方向の位置と相関し、位置検出器としての利用が可能となる。これまでに使用されていた MCP は有効径が $\phi 14.5$ mm と小さかったため、炭素薄膜 ($\phi 45$ mm) の一部の領域を通過するビームしか位置情報を得ることができなかった。そこで、今年度、有効径 $\phi 42$ mm の MCP を使用することで、炭素薄膜の全域での検出効率や位置分解能を調べた。実験は量子医科学研究所の HIMAC で行い、核子当たり 200 MeV の ^{84}Kr を BE-MCP90 に照射した。図 72 はビームが通過する薄膜での検出効率を示す。このように、有効径の大きな MCP を用いることで薄膜全域の検出効率を測定できた。磁場を上げると、図 72 のように薄膜のほぼ全域で高い検出効率を得ることができた。位置分解能は薄膜全域で $\sigma \sim 1.5$ mm で、大きな磁場依存性はなかった。現在、高電圧を印加することで発生するノイズが課題となっており、検出器の筐体を改良する等の検討を行なっている。

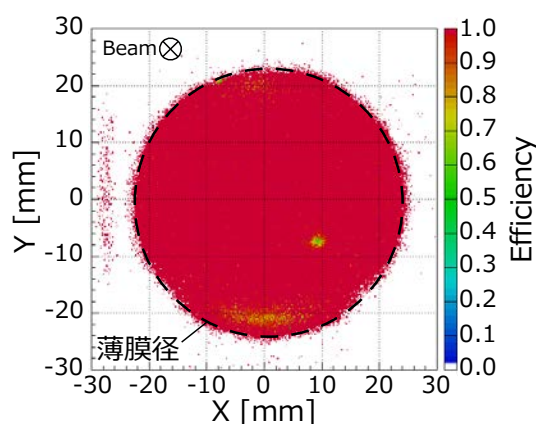


図 72 薄膜での BE-MCP90 (磁場 72 Gauss) の検出効率。破線は薄膜径を示す。

ラムシフト型偏極イオン源からの偏極重陽子の加速

ラムシフト型偏極イオン源は筑波大学 6 MV タンデム加速器のイオン源の一つとして偏極陽子ビームと偏極重陽子ビームの供給が可能である。これまで、不安定核の核モーメントの測定においては主に偏極陽子ビームが使われてきた。一方、重陽子は放射化の観点からビームとしての利用は一部に限定されていたが、最近の線量測定の結果を受け、重陽子の実験利用が可能となった。そこで、本年度、6 MV タンデム加速器では初となる偏極重陽子の加速を行なった。ラムシフト型偏極イオン源の各パラメータを最適化することで、イオン源下流で最大 40 nA の偏極重陽子ビームを得ることができた。これは、以前得られた値の約 7 倍に相当する。6 MV タンデム加速器によって 6 MeV まで加速された偏極重陽子ビームは A6 コースへと輸送された。この時、イオン源下流から A6 コースまでの輸送効率は約 40% だった。ビームロスを減らすべく、今後、ビームラインの各パラメータを最適化し、輸送効率の改善が必要である。偏極重陽子ビームは A6 コースに設置された CaF_2 標的に照射され、 $^{19}\text{F}(\vec{d}, p)$ 反応による $^{20}\text{F}(t_{1/2} = 11.0160 \text{ 秒})$ の生成を試みた。図 73 は CaF_2 標的の近傍に設置したプラスチックシンチ

レータで検出された β 線のタイムスペクトルである。 ^{20}F の半減期を考慮したフィッティングにより実験値を良く再現することから、偏極重陽子ビームによる ^{20}F の生成を確認した。また、 β 線の非対称放出を指標とする核磁気共鳴 (β -NMR) 法により、 ^{20}F の NMR 信号を観測することができた。この結果から、偏極重陽子ビームによって生成された ^{20}F が偏極していることを確認した。

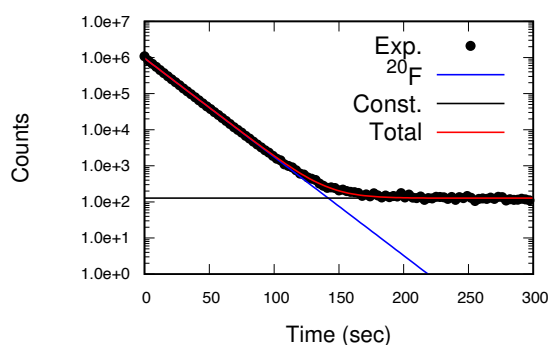


図 73 偏極重陽子ビームを CaF_2 標的に照射した時の β 線のタイムスペクトル。

回転磁場による不安定核 ^{25}Al の核磁気モーメントの符号の測定

我々は、ベータ線の非対称放出を利用した核磁気共鳴法 (β -NMR) に基づき、不安定核の核磁気モーメント符号測定のための回転磁場を発生させる高周波系を開発してきた。2021 年度は、不安定核 ^{29}P の核磁気モーメントの符号の確認を行うとともに、新たに不安定核 ^{25}Al の核磁気モーメントの符号を決定した。2020 年度の実験で、 ^{29}P の核磁気モーメントの符号が正であることが示されていたが、2021 年度は、符号が既知 (正) である不安定核 ^{20}F [1] を基準として、 ^{29}P の核磁気モーメントの符号を測定した。さらに、 ^{29}P を基準として、 ^{25}Al の核磁気モーメントの符号を測定した。符号の測定は、回転磁場により行う。静磁場が下向きの際に右回り (左回り) の回転磁場で NMR エフェクトが消えれば、符号は正 (負) である。我々のシステムでは、回転磁場を発生させるために交差コイルを使うが、交差コイル間に位相差をつけるために、二つの高周波系の間にケーブルディレイを入れている。実験は、筑波大学 6 MV タンデム加速器で行った。 ^{29}P の符号確認実験では、 ^{20}F の符号を基準とするため偏極重陽子ビームを 6 MeV まで加速し、 CaF_2 標的に照射し、偏極した ^{20}F を生成した。静磁場の方向は下向きで、 ~ 4.3 kG に設定し、高周波は、この磁場での ^{20}F のラーモア周波数を含む ~ 3.3 MHz に設定した。この周波数は、 ~ 320 ns の周期に相当する。 ~ 250 ns のディレイを入れたときに、 ^{20}F の β -NMR エフェクトが消えた。次に、偏極重陽子ビームを Si 標的に照射し、偏極した ^{29}P を生成した。静磁場の方向は下向きで、 ~ 1.7 kG に設定し、高周波は、この磁場での ^{29}P のラーモア周波数を含む ~ 3 MHz に設定した。 ^{29}P では、 ~ 270 ns のディレイを入れたときに、 β -NMR エフェクトが消えた。 ^{20}F の場合とほぼ同じディレイでエフェクトが消えたので、 ^{29}P の核磁気モーメント符号は ^{20}F と同じ正であることが確認できた。次に、 ^{29}P を基準として ^{25}Al の符号測定を行なった。偏極陽子ビームを 12 MeV まで加速し、Si 標的に照射し、偏極した ^{29}P を生成した。静磁場の方向は下向きで、 ~ 3.5 kG に設定し、高周波は、この磁場のラーモア周波数を含む ~ 6.7 MHz に設定した。この周波数は、155 ns の周期に相当する。 ~ 10 ns のディレイを入れたときに、 ^{29}P の β -NMR エフェクトが消えた。次に、偏極陽子ビームを Si 標的に照射し、偏極した ^{25}Al を生成した。静磁場の方向は下向きで、 ~ 6 kG に設定し、高周波は、この磁場のラーモア周波数を含む ~ 6.6 MHz に設定した。 ^{25}Al では、 ~ 20 ns のディレイ

イを入れたときに、 β -NMR エフェクトが消えた。 ^{29}P の場合とほぼ同じディレイでエフェクトが消えたので、 ^{25}Al の核磁気モーメント符号は ^{29}P と同じ正であると決定することができた。

反応断面積測定のための固体重水素標的の開発

スキンとは、陽子か中性子が原子核表面に染み出した現象である。不安定核では、安定核より厚いスキン構造が存在するとされている。スキンの大きさ（スキン厚）は、原子核の陽子半径（ r_p ）と原子核の中性子半径（ r_n ）の差として定義されるため、スキン厚データの高精度化の 위해서는、 r_p と r_n のそれぞれを精度よく決定することが重要である。 r_p と r_n を決定する有効な手法の一つとして、反応断面積 σ_R の測定がある。 σ_R は入射核の物質半径を反映した物理量であり、そこから r_p と r_n を抽出することが可能である。約 100 MeV/u 以下の核子核子全反応断面積のアイソスピン非対称性（陽子-中性子の反応断面積の方が 3 倍大きい）に注目すると、 r_p (r_n) には中性子（陽子）標的が最も敏感で、抽出した r_p (r_n) の誤差を小さくすることができる。

我々は既に陽子標的（固体重水素標的）を開発しており [2]、それを用いて ^{11}Li の r_n の精度を 11% から 3% 以下に改善した [3]。最近、水素標的と重水素標的を用いた σ_R 測定から、中性子標的に対する反応断面積を導出できることが理論的に示された [4]。そこで、本研究では重水素標的に注目し、その開発を行なった。

まず、前述した固体重水素標的を作製するためのシステムを流用し、固体重水素標的（SDT）作成のための最適条件を探索した。SDT は常温の重水素ガスを一定圧力で低温のターゲットセルに供給することで作製するが、供給圧力とセル温度という 2 つのパラメーターに非常に敏感である。重水素が固化する条件は探し出したが、今後もさらなる最適化が必要である。固化した重水素の様子を図 74 に示す。上部に亀裂が入っていることが確認できる。次に、ヘリウムセルの開発に着手した。ヘリウムセルの概要を図 75 に示す。既存のシステムでは標的がセル内外の圧力差によって膨らんでしまい、ビームの入射位置によって厚さが増減してしまう。そこで、ヘリウムガスを重水素と同じ圧力で流すセルを外側に追加し、圧力差を解消して均一な厚さの SDT 作製を目指す。



図 74 固化した重水素の様子。

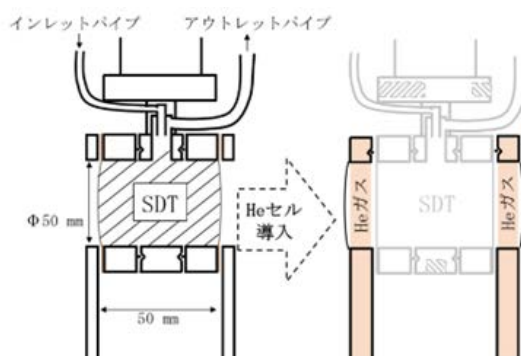


図 75 セル周辺の断面図。右側がヘリウムセルを導入した場合。

参考文献

- [1] T. Tsang and D. Connor, Phys. Rev. 132, 1141 (1963)
- [2] T. Moriguchi *et. al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **624**, (2010) 27
- [3] T. Moriguchi *et. al.*, Phys. Rev. C **88**, 024610 (2013)
- [4] W. Horiuchi *et. al.*, Phys. Rev. C **102**, 054601 (2020)
- [5] T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. B 178, 416 (1986)
- [6] STAR Collaboration, Phys. Lett. B 825, 136865 (2022)
- [7] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 128, 202303 (2022)
- [8] H-T. Ding, et al., Eur. Phys. J. A. 57. 202 (2021)
- [9] T. Nonaka, arXiv:2202.06953
- [10] STAR Collaboration, Nature 548, 62 (2017)
- [11] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 98, 14910 (2018)
- [12] ALICE Collaboration, Phys. Rev. C 101, 044611(2020)
- [13] X. G. Deng et al, Phys. Rev. C 101, 064908 (2020)
- [14] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 104, L061901 (2021)
- [15] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 123, 132301 (2019)
- [16] K. Fukushima, D. E. Kharzeev, and H. J. Warringa, Phys. Rev. D 78, 074033 (2008)
- [17] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 105, 014901 (2022)
- [18] PHENIX Collaboration, Nature Phys. 15, 214–220 (2019)
- [19] PHENIX Collaboration, Phys. Rev. C 105, 024901 (2022)
- [20] PHENIX Collaboration, arXiv:2203.09894 (2022)
- [21] T. Chujo, Towards a FoCal for the ALICE experiment,
<https://ep-news.web.cern.ch/content/towards-focal-alice-experiment>

〈論文〉

- 1. PACS Collaboration: Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki, “Calculation of derivative of nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD at $M_\pi=138\text{MeV}$ on a $(5.5\text{fm})^3$ volume” , Phys. Rev. D 104 (2021) No.7, ref.074514, pp.1-20.
- 2. Naoki Wakabayashi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, and Masakiyo Kitazawa, “Scope and convergence of the hopping parameter expansion in finite temperature QCD with heavy quarks around the critical point” , Prog. Theor. Exp. Phys. 2022 (2022) ref.033B05, pp.1-27 (2022).
- 3. Atsushi Kiyohara, Masakiyo Kitazawa, Shinji Ejiri, and Kazuyuki Kanaya, “Finite-size scaling around the critical point in the heavy quark region of QCD” , Phys. Rev. D 104 (2021) No.11, ref.114509, pp.1-17.
- 4. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A. L. Lorenz, H. Ohno, H. Sandmeyer, and H.-T. Shu, “Charm and beauty in the deconfined plasma from quenched lattice QCD” , Phys. Rev. D 104 (2021) No.11, ref.114508, pp.1-15.
- 5. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and Y. Yoshimura, “Phase transition of four- dimensional lattice ϕ^4 theory with tensor renormalization group” , Phys. Rev. D 104 (2021) No.3, ref.034507, pp.1-7.
- 6. S. Akiyama and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group approach to $(1+1)$ -dimensional Hubbard model” , Phys. Rev. D 104 (2021) No.1, ref.014504, pp.1-8.
- 7. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and T. Yamashita, “Metal insulator transition in the $(2+1)$ -dimensional Hubbard model with the tensor renormalization group” , Prog. Theor. Exp. Phys. 2022 (2022) No.2, ref.023I01, pp.1-9.
- 8. S. Akiyama and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group study of $(3+1)$ - dimensional Z2 gauge-Higgs model at finite density” , JHEP 2205 (2022) ref.102, pp.1-20.
- 9. PACS Collaboration: T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, and T. Yoshié, “Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration” , PoS(LATTICE2021) (2022) ref.563, pp.1-9, in press
- 10. PACS Collaboration: Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, and Takeshi Yamazaki, “Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks” , SPIN2021, pp.1-5, in press.
- 11. PACS Collaboration: Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, and Takeshi Yamazaki, “The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses” , PoS(LATTICE2021) (2022) ref.504, pp.1-9, in press.
- 12. Yutaro Akahoshi, Sinya Aoki, Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Hidekatsu Nemura, and Yusuke Taniguchi, “General purpose lattice QCD code set Bridge++ 2.0 for

- high performance computing” , J. Phys.: Conf. Ser. 2207 (2022) ref.012053, pp.1-6.
13. Kazuyuki Kanaya, Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, “Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang- Mills theory using the small flow-time expansion method” , PoS (LATTICE 2021) (2022) ref.064, pp.1-9, in press.
 14. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and Y. Yoshimura, “Quantum Field Theories with Tensor Renormalization Group” , arXiv:2111.04240[hep-lat].
 15. 青木保道, 青山龍美, Ed Bennett, 倉知昌史, 益川敏英, 三浦光太郎, 長井敬一, 大木洋, Enrico Rinaldi, 柴田章博, 山脇幸一, 山崎剛, “素粒子質量起源の理論探索” , HPCI Research Report (2021) 6, pp.44-50.
 16. A. Chatterjee, T. Nonaka, S. Esumi, X. Luo, “Efficiency corrections for mutually inclusive variables and particle identification effect for mixed-cumulants in heavy-ion collisions,” Chin. Phys. C45 (2021) 104001
 17. Y. Zhang, Y. Huang, T. Nonaka, X. Luo, “Pileup correction on higher-order cumulants with unfolding approach,” Nucl. Instrum. Meth. A 1026 (2022) 166246
 18. T. Todoroki (PHENIX Collaboration), Recent Highlights from RHIC-PHENIX, The 19th conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2021), EPJ Web Conf. 259 (2022) 01002
 19. K. Okubo (STAR Collaboration), “Measurement of global polarization of Λ hyperons in Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV fixed target collisions at RHIC-STAR experiment”, EPJ Web Conf. 259 (2022) 06003
 20. M. Isshiki (STAR Collaboration), “Measurements of p - Ξ , Λ - Λ , and Ξ - Ξ Correlation in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at RHIC-STAR”, EPJ Web Conf. 259 (2022) 11015
 21. T. Niida, “Global polarization and spin alignment measurements”, EPJ Web Conf. 259 (2022) 06002
 22. H. Kudo, H. Naramoto, M. Sataka, S. Ishii, K. Sasa, S. Tomita, Depth resolution of transmission ERDA for H in Al under nuclear-elastically enhanced recoiling of H by 8 MeV He, Journal of Physics: Condensed Matter, 33(46) (2021) 465901. [DOI: 10.1088/1361-648X/ac17ac]
 23. K. Kanzawa, F. Miyake, K. Horiuchi, K. Sasa, K. Takano, M. Matsumura, T. Takahashi, Y. Motizuki, K. Takahashi, Y. Nakai, K. Ohtani, Y. Tada, Y. Ochiai, H. Motoyama, H. Matsuzaki, A. Yamazaki, Y. Muramatsu, and T. Yamagata, High-Resolution 10Be and 36Cl Data from the Antarctic Dome Fuji Ice Core (100 years around 5480 BCE): An Unusual Grand Solar Minimum Occurrence?, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126 (2021) e2021JA029378. [Doi.org/10.1029/2021JA029378]
 24. G. Yoshida, H. Matsumura, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Masumoto, T. Miura, K. Sasa, T. Moriguchi, “Survey Methodology for the Activation of Beamline Components in an Electrostatic Proton Accelerator” , Radiation Safety Management 20 (2021) 1-8. [DOI: 10.12950/rsm.200813]
 25. Y. Kimura, M. Mihara, K. Matsuta, M. Fukuda, Y. Otani, G. Takayama, T. Izumikawa, N. Noguchi, M. Ogose, Y. Sato, K. Takatsu, T. Ohtsubo, H. Takahashi, S. Momota, H. Okumura, T. Moriguchi, A. Ozawa, A. Kitagawa, S. Sato, “Development of a small Beta-NMR system using Halbach Array permanent magnet” , Hyperfine Interact, 243 (2021) 1 (1-7). [DOI:10.1007/s10751-021-01789-5]
 26. Y. Otani, M. Mihara, K. Matsuta, M. Fukuda, R. Wakabayashi, N. Okimoto, M. Fukutome, Y. Kimura, G. Takayama, T. Izumikawa, N. Noguchi, M. Ogose, M. Sato, K. Takatsu, T. Ohtsubo, D. Nishimura, H. Takahashi, S. Sugawara, A. Gladkov, H. Ishiyama, A. Kitagawa, S. Sato, S. Momota, H. Okumura, T. Moriguchi, A. Ozawa, N. Kaname, A. Yano, “Application of spin polarized ^{19}O beam to the study of oxygen motion in solid oxide fuel cell materials” , Hyperfine Interact, 242 (2021) 47 (1-6). [DOI:10.1007/s10751-021-01776-w]
 27. A.Ozawa for Rare-RI Ring collaboration, “Past and future for Rare-RI ring” , JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011011 (1-5). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011011]
 28. D. Nagae, S. Omika, Y. Abe, Y. Yamaguchi, F. Suzaki, K. Wakayama, N. Tadano, R. Igosawa, K. Inomata, H. Arakawa, K. Nishimuro, T. Fujii, T. Mitsui, T. Yamaguchi, T. Suzuki, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, A. Ozawa, S. Naimi, Z. Ge, Y. Yanagisawa, H. Baba, S. Michimasa, S. Ota, G. Lorusso, Yu.A. Litvinov, M. Wakasugi, T. Uesaka, Y. Yano, “First demonstration of mass measurements for exotic nuclei using Rare-RI Ring” , JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011014 (1-8). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011014]
 29. S. Suzuki, A. Ozawa, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, Y. Ichikawa, Y. Tajiri, K. Hiraishi, T. Matsumoto, D. Nagae, Y. Abe, S. Naimi, H. Li, T. Yamaguchi, S. Omika, Z. Ge, K. Wakayama, N. Tadano, H. Arakawa, K. Inomata, T. Kobayashi, A. Kitagawa, S. Sato, “Performance of a Time-Of-Flight detector and demonstration of a novel position-sensitive detector for mass measurements with Rare-RI Ring” , JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011017 (1-6). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011017]
 30. K. Inomata, T. Yamaguchi, Y. Abe, M. Amano, H. Arakawa, T. Fujii, D. Kamioka, A. Kitagawa, H.F. Li, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Omika, A. Ozawa, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, K. Wakayama, “Basic Study on Delta Ray Detection for the Determination of In-Ring Revolution Time” , JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011020 (1-4). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011020]
 31. H. Arakawa, Y. Yamaguchi, Y. Abe, M. Amano, K. Inomata, D. Kamioka, A. Kitagawa, H. Li, T. Moriguchi, D.

- Nagae, S. Omika, A. Ozawa, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, K. Wakayama, “Properties of a thin YAP(Ce) scintillation counter for heavy ions”, JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011022 (1-5). [DOI: 10.7566/JPSCP.35.011022]
32. Z. Ge, S. Naimi, D. Nagae, Y. Abe, S. Omika, T. Uesaka, F. Suzuki, H. Li, Y. Yamaguchi, M. Wakasugi, K. Wakayama, T. Yamaguchi, A. Ozawa, H. Arakawa, K. Inomata, T. Kobayashi, K. Nishimuro, S. Suzuki, T. Moriguchi, D. Kamioka, M. Mukai, M. Amano, A. Kitagawa, S. Sato, G. Lorusso, Y. Yano, “Development of mirror-type MCP detectors for mass measurements at the Rare-RI Ring”, JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011023 (1-4). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011023]
 33. K. Wakayama, T. Yamaguchi, Y. Abe, M. Amano, H. Arakawa, Z. Ge, K. Inomata, D. Kamioka, A. Kitagawa, T. Kobayashi, H.F. Li, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Omika, A. Ozawa, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, N. Tadano, “A Simple Readout Method for a Position-Sensitive Detector Using Plastic Scintillator Bars”, JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011024 (1-5). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011024]
 34. H. Li, Z. Ge, S. Naimi, D. Nagae, Y. Abe, T. Uesaka, F. Suzuki, M. Wakasugi, S. Omika, Y. Yamaguchi, T. Yamaguchi, K. Wakayama, H. Arakawa, K. Inomata, A. Ozawa, S. Suzuki, T. Moriguchi, “MCP with delay-line anode used for position sensitive detector at Rare RI-Ring”, JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011025 (1-4) [DOI:10.7566/JPSCP.35.011025]
 35. S. Omika, T. Yamaguchi, Y. Abe, M. Amano, H. Arakawa, Z. Ge, K. Inomata, D. Kamioka, H. Li, H. Miura, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Naimi, K. Nishimuro, A. Ozawa, F. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, N. Tadano, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Wakayama, Y. Yanagisawa, Y. Yamaguchi, “Development of experimental devices for precise mass measurements at the Rare-RI Ring”, JPS Conf. Proc. 35 (2021) 011026 (1-5). [DOI:10.7566/JPSCP.35.011026]
 36. X. Zhou, M. Zhang, M. Wang, Y. H. Zhang, Y. J. Yuan, X. L. Yan, X. H. Zhou, H. S. Xu, X. C. Chen, Y. M. Xing, R. J. Chen, X. Xu, P. Shuai, C. Y. Fu, Q. Zeng, M. Z. Sun, H. F. Li, Q. Wang, T. Bao, M. Si, H. Y. Deng, M. Z. Liu, T. Liao, J. Y. Shi, Y. N. Song, J. C. Yang, W. W. Ge, Yu. A. Litvinov, S. A. Litvinov, R. S. Sidhu, T. Yamaguchi, S. Omika, K. Wakayama, S. Suzuki, T. Moriguchi, “In-ring velocity measurement for isochronous mass spectrometry”, Phys. Rev. Accel. Beams 24 (2021) 042802 (1-11). [DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.042802]
 37. M. Ahmed, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, M. Mukai, J.H. Park, P. Schury, Y. Kakiguchi, A. Ozawa, M. Oyaizu, M. Wada, H. Miyatake, “ β - γ spectroscopy of the ^{195}Os nucleus”, Phys. Rev. C 103 (2021) 054312 (1-9). [DOI: 10.1103/PhysRevC.103.054312]
 38. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurements of HA3 and HA4 Lifetimes and Yields in Au+Au Collisions in the High Baryon Density Region,” Phys. Rev. Lett. **128**, no.20, 202301 (2021)
 39. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurement of cold nuclear matter effects for inclusive J/ψ in p+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV,” Phys. Lett. B **825**, 136865 (2022)
 40. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurement of inclusive electrons from open heavy-flavor hadron decays in $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV with the STAR detector,” Phys. Rev. D **105**, no.3, 032007 (2022)
 41. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Probing the Gluonic Structure of the Deuteron with J/ψ Photoproduction in d+Au Ultraperipheral Collisions,” Phys. Rev. Lett. **128**, no.12, 122303 (2022)
 42. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Search for the chiral magnetic effect with isobar collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV by the STAR Collaboration at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider,” Phys. Rev. C **105**, no.1, 014901 (2022)
 43. M. S. Abdallah *et al.* [STAR], “Global Λ -hyperon polarization in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=3$ GeV,” Phys. Rev. C **104**, no.6, L061901 (2021)
 44. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Search for the Chiral Magnetic Effect via Charge-Dependent Azimuthal Correlations Relative to Spectator and Participant Planes in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” Phys. Rev. Lett. **128**, no.9, 092301 (2022)
 45. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Measurement of the sixth-order cumulant of net-proton multiplicity distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 27, 54.4$, and 200 GeV at RHIC,” Phys. Rev. Lett. **127**, no.26, 262301 (2021)
 46. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Invariant Jet Mass Measurements in pp Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at RHIC,” Phys. Rev. D **104**, no.5, 052007 (2021)
 47. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Azimuthal anisotropy measurements of strange and multistrange hadrons in $U + U$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider,” Phys. Rev. C **103**, no.6, 064907 (2021)
 48. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in polarized proton collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV,” Phys. Rev. D **103**, no.9, L091103 (2021)
 49. M. Abdallah *et al.* [STAR], “Cumulants and correlation functions of net-proton, proton, and antiproton multiplicity distributions in Au+Au collisions at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider,” Phys. Rev. C **104**, no.2, 024902 (2021)
 50. J. Adam *et al.* [STAR], “Observation of $D_s^\pm/D^0$ enhancement in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” Phys. Rev. Lett. **127**, 092301 (2021)
 51. J. Adam *et al.* [STAR], “Global Polarization of Ξ and Ω Hyperons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” Phys. Rev. Lett. **126**, no.16, 162301 (2021)

52. J. Adam *et al.* [STAR], “Measurement of transverse single-spin asymmetries of π^0 and electromagnetic jets at forward rapidity in 200 and 500 GeV transversely polarized proton-proton collisions,” *Phys. Rev. D* **103**, no.9, 092009 (2021)
53. J. Adam *et al.* [STAR], “Comparison of transverse single-spin asymmetries for forward π^0 production in polarized pp , pAl and pAu collisions at nucleon pair c.m. energy $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. D* **103**, no.7, 072005 (2021)
54. J. Adam *et al.* [STAR], “Methods for a blind analysis of isobar data collected by the STAR collaboration,” *Nucl. Sci. Tech.* **32**, no.5, 48 (2021)
55. J. Adam *et al.* [STAR], “Measurement of e^+e^- Momentum and Angular Distributions from Linearly Polarized Photon Collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, no.5, 052302 (2021)
56. J. Adam *et al.* [STAR], “Observation of $D_s^\pm/D^0$ enhancement in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 092301 (2021)
57. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “Probing Gluon Spin-Momentum Correlations in Transversely Polarized Protons through Midrapidity Isolated Direct Photons in $p^\uparrow + p$ Collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 162001 (2021)
58. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “Transverse single spin asymmetries of forward neutrons in $p + p$, $p+Al$ and $p+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV as a function of transverse and longitudinal momenta,” *Phys. Rev. D* **105**, 032004 (2022)
59. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “Transverse-single-spin asymmetries of charged pions at midrapidity in transversely polarized $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. D* **105**, 032003 (2022)
60. U. A. Acharya *et al.* [PHENIX], “Kinematic dependence of azimuthal anisotropies in $p+Au$, $d+Au$, and ^3He+Au at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **105**, 024901 (2022)
61. 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** (2022), 174
62. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of inclusive charged-particle b-jet production in pp and p -Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **01** (2022), 178
63. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Production of light (anti)nuclei in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **01** (2022), 106
64. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Prompt and non-prompt J/ψ production cross sections at midrapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV,” *JHEP* **03** (2022), 190
65. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Inclusive J/ψ production at midrapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) no.12, 1121
66. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurements of the groomed and ungroomed jet angularities in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **05** (2022), 061
67. S. Acharya *et al.* [ALICE], “ K_S^0 - and (anti-) Λ -hadron correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) no.10, 945
68. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Anisotropic flow of identified hadrons in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV,” *JHEP* **10** (2021), 152
69. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of Prompt D^0 , Λ_c^+ , and $\Sigma_c^{0,++}(2455)$ Production in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **128** (2022) no.1, 012001
70. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Charm-quark fragmentation fractions and production cross section at midrapidity in pp collisions at the LHC,” *Phys. Rev. D* **105** (2022) no.1, L011103
71. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of the production cross section of prompt Ξ_c^0 baryons at midrapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV,” *JHEP* **10** (2021), 159
72. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Experimental Evidence for an Attractive p - ϕ Interaction,” *Phys. Rev. Lett.* **127** (2021) no.17, 172301
73. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Kaon–proton strong interaction at low relative momentum via femtoscopy in Pb–Pb collisions at the LHC,” *Phys. Lett. B* **822** (2021), 136708
74. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Charged-particle multiplicity fluctuations in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) no.11, 1012
75. S. Acharya *et al.* [ALICE], “First measurements of N-subjettiness in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV,” *JHEP* **10** (2021), 003
76. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of the Cross Sections of Ξ_c^0 and Ξ_c^+ Baryons and of the Branching-Fraction Ratio $BR(\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- e^+ \nu_e)/BR(\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+)$ in pp collisions at 13 TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **127** (2021) no.27, 272001
77. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Energy dependence of ϕ meson production at forward rapidity in pp collisions at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) no.8, 772
78. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurement of beauty and charm production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV via

- non-prompt and prompt D mesons,” JHEP **05** (2021), 220
79. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Measurements of mixed harmonic cumulants in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” Phys. Lett. B **818** (2021), 136354
 80. S. Acharya *et al.* [ALICE], “First measurement of the $-t$ —dependence of coherent J/ψ photonuclear production,” Phys. Lett. B **817** (2021), 136280
 81. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Coherent J/ψ and ψ' photoproduction at midrapidity in ultra-peripheral Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” Eur. Phys. J. C **81** (2021) no.8, 712
 82. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Long- and short-range correlations and their event-scale dependence in high-multiplicity pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **05** (2021), 290
 83. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Production of pions, kaons, (anti-)protons and ϕ mesons in Xe–Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV,” Eur. Phys. J. C **81** (2021) no.7, 584
 84. S. Acharya *et al.* [ALICE], “First measurement of coherent ρ^0 photoproduction in ultra-peripheral Xe–Xe collisions at $s_{NN}=5.44$ TeV,” Phys. Lett. B **820** (2021), 136481
 85. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Multiharmonic Correlations of Different Flow Amplitudes in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV,” Phys. Rev. Lett. **127** (2021) no.9, 092302
 86. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Inclusive heavy-flavour production at central and forward rapidity in Xe–Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ TeV,” Phys. Lett. B **819** (2021), 136437
 87. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Jet-associated deuteron production in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV,” Phys. Lett. B **819** (2021), 136440
 88. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Jet fragmentation transverse momentum distributions in pp and p–Pb collisions at $\sqrt{s}$, $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” JHEP **09** (2021), 211
 89. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Production of muons from heavy-flavour hadron decays at high transverse momentum in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ and 2.76 TeV,” Phys. Lett. B **820** (2021), 136558
 90. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Upsilon production and nuclear modification at forward rapidity in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” Phys. Lett. B **822** (2021), 136579
 91. S. Acharya *et al.* [ALICE], “ Λ_c^+ Production and Baryon-to-Meson Ratios in pp and p–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV at the LHC,” Phys. Rev. Lett. **127** (2021) no.20, 202301
 92. S. Acharya *et al.* [ALICE], “ Λ_c^+ production in pp and in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV,” Phys. Rev. C **104** (2021) no.5, 054905
 93. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Pseudorapidity distributions of charged particles as a function of mid- and forward rapidity multiplicities in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02, 7$ and 13 TeV,” Eur. Phys. J. C **81** (2021) no.7, 630
 94. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Soft-Dielectron Excess in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. Lett. **127** (2021) no.4, 042302
 95. S. Acharya *et al.* [ALICE], “Elliptic Flow of Electrons from Beauty-Hadron Decays in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” Phys. Rev. Lett. **126** (2021) no.16, 162001
 96. S. Acharya *et al.* [ALICE], “ Λ K femtoscopy in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV,” Phys. Rev. C **103** (2021) no.5, 055201
 97. S. Acharya *et al.* [ALICE], “First measurement of quarkonium polarization in nuclear collisions at the LHC,” Phys. Lett. B **815** (2021), 136146

〈レビュー、解説・総説、書籍・著書等〉

1. 蔵増嘉伸, 「テンソルネットワークと場の理論」, 数理科学 2022 年 2 月号, サイエンス社
2. 富田 成夫, 山崎 明義, 石井 聡, 笹 公和, 左高 正雄, 橋本 洋, 工藤 博, 透過 ERDA によるアルミニウム中水素の 3 次元分布計測, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, 47(1) (2021) 15.
3. 北沢正清, 野中俊宏, 江角晋一, 「非ガウスゆらぎで探る宇宙最高密度の相転移」 日本物理学会誌、第 76 巻 第 8 号、2021 年 8 月号
4. T. Niida and Y. Miake, “Signatures of QGP at RHIC and the LHC”, AAPPS Bull. 31 (2021) 12
5. T. Chujo, “Towards a FoCal for the ALICE experiment”, CERN EP Newsletter, <https://ep-news.web.cern.ch/content/towards-focal-alice-experiment>

〈研究成果発表〉

〔国際会議〕

1. Y. Kuramashi, 「Application of tensor renormalization group to Nambu – Jona-Lasinio model and Hubbard model」, International Workshop on Tensor Networks in Many Body and Lattice Field (Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, China (online), July 26-30 2021).
2. S. Takeda, Y. Kuramashi, H. Ohno, Y. Nakamura, 「Study of QCD critical end-point using Wilson-type fermions」,

- YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Oct. 25-29, 2021).
3. Y. Kuramashi, 「Application of tensor renormalization group to Quantum Field Theories」, DWQ@25: The event marks the passage of twenty-five years since the first numerical simulations with Domain Wall Quarks (DWQ) (Brookhaven National Laboratory, NY, USA (online), Dec. 13-17 2021).
 4. S. Akiyama, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories」, Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 (Online, Jan. 17-21 2022).
 5. H.-T. Shu, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, R. Larsen, A. L. Lorenz, H. Ohno, H. Sandmeyer, and S. Mukherjee, 「Quarkonia and heavy quark diffusion in the hot gluonic medium」, The 19th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2021) (Online, May 17-22, 2021).
 6. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, and T. Yoshié for PACS Collaboration, 「Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration」, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
 7. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, and T. Yamazaki, 「The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses」, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
 8. Kazuyuki Kanaya, Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, 「Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method」, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
 9. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, and S. Takeda, 「Critical endpoints in (2+1)- and 4-flavor QCD with Wilson-Clover fermions」, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
 10. Y. Kuramashi, S. Akiyama, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, 「Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu – Jona-Lasinio model with tensor renormalization group」, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
 11. S. Akiyama and Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model」, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
 12. H.-T. Shu, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, R. Larsen, A. L. Lorenz, H. Ohno, H. Sandmeyer, and S. Mukherjee, 「Quarkonia and heavy quark diffusion in the hot gluonic medium」, A Virtual Tribute to Quark Confinement and the Hadron Spectrum 2021 (Online, Aug. 2-6, 2021).
 13. Kazuyuki Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, M. Shirogane, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow」, CCS 13th international symposium 2021 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS, Tsukuba (online), Oct. 8, 2021).
 14. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, and T. Yamazaki, 「Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks」, The 24th International Spin Symposium (Matsue, Shimane (online) Oct. 18-22, 2021).
 15. S. Akiyama, 「Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu – Jona-Lasinio model with tensor renormalization group」, YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Oct. 25-29, 2021).
 16. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, and T. Yamazaki, 「High-precision calculation of nucleon structure using HPC」, The 4th R-CCS International Symposium The Supercomputer Fugaku: Simulation, Big data and AI supporting Society 5.0 (R-CCS, Kobe (online), February 7-8, 2022).
 17. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions from lattice QCD」, 2022 CCS-EPCC Workshop (CCS, Tsukuba (online), Mar. 30-31, 2022).
 18. Y. Wakiyama, M. Matumura, T. Matsunaka, S. Hirao, K. Sasa, Behavior of ^{129}I in the Abukuma river during two high-flow events in 2018, EGU General Assembly, vEGU21: Gather Online, 19-30 April 2021.
 19. Kimikazu Sasa, Masumi Matsumura, Tsutomu Takahashi, Development of Non-Radiocarbon Accelerator Mass Spectrometry at the University of Tsukuba, Technical Meeting on Developments in Non-Radiocarbon Accelerator Mass Spectrometry Techniques and Relevant Applications (Virtual Event), International Atomic Energy Agency (IAEA), 11-14 October 2021.
 20. 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, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.

21. Kimikazu Sasa, Masumi Matsumura, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Yukihiro Satou, Norikazu Kinoshita, Hiroyuki Matsuzaki and Keisuke Sueki, Determination of I-129/I-131 in surface soils related to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.
22. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Aya Sakaguchi, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi and Keisuke Sueki, Status report of the Tsukuba 6MV multi-nuclide AMS system: Progress in iodine-129 AMS, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.
23. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Yuta Ochiai, Yuki Tosaki, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi and Keisuke Sueki, Regional dependence of Be-10 and Cl-36 variations in rainwater at the Sea of Japan and Pacific sides of Japan, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.
24. Tetsuya Matsunaka, Seiya Nagao, Shinya Ochiai, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Anthropogenic iodine-129 depositions at the Sea of Japan and Pacific sides of the archipelago, during 2017-2018, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.
25. Tetsuya Matsunaka, Seiya Nagao, Mutsuo Inoue, Yukiko Taniuchi, Hiromi Kasai, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Surface distribution of iodine-129 in the southwestern Okhotsk Sea in 2018, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.
26. Keisuke Sueki, Yuki Ohta, Hiroki Yokoyama, Yuta Ochiai, Seiji Hosoya, Maki Honda, Yukihiro Satou, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura and Kimikazu Sasa, Distribution of Chlorine-36 and Iodine-129 Inventories in Difficult-to-return Zone in Fukushima, the 15th International Accelerator Mass Spectrometry Conference (AMS-15), Sydney, Australia (Online), 15-19 November, 2021.
27. Hongtao Shen, Shulin Shi, Junsen Tang, Mingli Qi, Siyu Wei, Mingji Liu, Wang Li, Zhang Guofeng, Kimikazu Sasa, Wei Mingjun, Gong Shanhua, Dong Junyan, The ^{14}C -AMS technology and its applications for evaluation of the properties of highly permeable aquifers cause by large volume water injection in oil field, Radiocarbon in the Environment III Conference, Gliwice, Poland, 5-9 July 2021.
28. S. Esumi, "Methods for detector effects correction in fluctuations measurements", 3rd workshop on Physics performance studies at FAIR and NICA, 29/Nov/2021 - 1/Dec/2021 (online)
29. K. Okubo, "Measurement of global polarization of Lambda hyperons in Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV fixed-target collisions at RHIC-STAR experiment", Strangeness Quark Matter 2021, May 2021 (online)
30. K. Okubo, "Measurement of global polarization of Λ hyperons in Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV fixed-target collisions at RHIC-STAR experiment", The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference, November 2021 (online)
31. M. Isshiki, "Measurements of p - Ξ , Λ - Λ , and Ξ - Ξ Correlation in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at RHIC-STAR", The 19th conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2021), May 2021 (online)
32. M. Isshiki, "Measurements of Λ - Λ and Ξ - Ξ correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at RHIC-STAR", The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference, November 2021 (online)
33. T. Nonaka, "Studying the QCD Phase Structure through Higher Moments at RHIC-BES at STAR", 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021), 31 August 2021, Kolymbari, Greece (online)
34. T. Nonaka, "Studying the QCD phase structure through higher-order cumulants", 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2021), 6 November 2021, Incheon, South Korea (online)
35. T. Nonaka, "Critical fluctuations at STAR BES and FXT", 3rd workshop on Physics performance studies at FAIR and NICA (FANI 2021), 30 November 2021, Moscow (online)
36. T. Todoroki, "Recent Highlights from RHIC-PHENIX", The 19th conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2021), May 2021 (online)
37. T. Niida, "Global polarization and spin alignment measurements", The 19th conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2021), May 2021 (online)
38. T. Chujo, ALICE FoCal, 6th Korea-Japan PHENIX/sPHENIX/RHICf/EIC Collaboration Meeting, 2021 年 6 月 15 日-16 日 (Online)
39. S. Sakai (for ALICE collaboration), "Measurement of electroweak-boson production in pp , p -Pb and Pb-Pb collisions with ALICE at the LHC", European Physical Society conference on high energy physics 2021 (EPS-HEP 2021 conference), July 26-30, 2021 (Online)
40. N. Novitzky, "Exploring the QCD medium with hard probes and direct photons", seminar at ORNL, July 2021 (Online)
41. T. Chujo, "Forward Calorimeter (FoCal) Upgrade Project in ALICE for LHC Run-4", Tsukuba Global Science Week "Universe Evolution and Matter Origin", 2021 年 9 月 11 日 (Online)
42. T. Chujo, "FoCal-E", ALICE FoCal workshop, 11/3, 2021

43. N. Novitzky, “Pad layer(s) test beam results”, ALICE FoCal workshop, 11/3, 2021
44. N. Novitzky, “Neutral pions in small systems from PHENIX”, seminar at Jyvaskyla Univ., Nov. 2021 (Online)
45. N. Novitzky, “Identified light hadron measurements from large to small systems from PHENIX”, Winter Workshop on Nuclear Dynamics 2022, Feb. 2022 (Online)
46. A. Ghimouz, “Development of FoCal E electronics prototype in ALICE”, TCHoU Workshop for the Division of Photon and Particle Detectors Division, 3/22, 2022

[国内学会・研究会]

1. 蔵増嘉伸, 「Physics explored by master-field simulation in lattice QCD」, 日本物理学会第 77 回年次大会シンポジウム「Challenges and opportunities in large-scale lattice QCD computations and target physics」(岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
2. 秋山進一郎, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories」, 量子多体計算のフロンティア (大阪大学, 大阪 (online), 2022 年 3 月 28 日-29 日).
3. 北沢正清, 江尻信司, 金谷和至, 柳原良亮, 白銀瑞樹, 若林直輝, 「格子量子色力学に基づく初期宇宙の諸性質の精密数値解析」, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第 13 回拠点シンポジウム (Online, 2021 年 7 月 8 日-9 日).
4. 佐藤航平, 「格子 QCD による BSM の探索とモデルに依存しない手法による形状因子の直接微分計算」, 原子核三者若手夏の学校 2021 (Online, 2021 年 8 月 6 日-10 日).
5. 鈴木遊, 谷口裕介, 鈴木博, 金谷和至, 「Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow」, KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」(KEK, つくば (online), 2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日).
6. 秋山進一郎, 「Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model」, KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」(KEK, つくば (online), 2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日).
7. 山崎剛, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟 for PACS Collaboration, 「物理点近傍での 2+1 フレーバー QCD による核子形状因子の直接微分計算」, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
8. 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛, 「核子軸性電荷及びテンソル、スカラー荷の物理点格子 QCD 計算」, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
9. 北沢正清, 清原淳史, 江尻信司, 金谷和至, 「重クォーク領域の臨界点周辺における有限サイズスケーリングの精密測定」, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
10. 鈴木遊, 谷口裕介, 鈴木博, 金谷和至, 「Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow」, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
11. 秋山進一郎, 蔵増嘉伸, 「テンソル繰り込み群による 1+1 次元 Hubbard 模型の研究」, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
12. 山崎剛, 蔵増嘉伸, 中村宜文, 石川健一, 浮田尚哉, 渡辺展正, 「2+1 フレーバー格子 QCD master-field を用いた標準理論を超える物理の探索」, 第 8 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都品川区 (online), 2021 年 10 月 28-29 日).
13. 山崎剛, 蔵増嘉伸, 浮田尚哉, 新谷栄悟, 滑川裕介, 「Master field 格子 QCD による標準理論を超える物理の探索」, 第 8 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都品川区 (online), 2021 年 10 月 28-29 日).
14. 谷口裕介, 金谷和至, 「勾配流法を用いた $N_f=2+1$ QCD のエネルギー運動量 テンソルの研究」, 第 8 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都品川区 (online), 2021 年 10 月 28-29 日).
15. 山崎剛, 石川健一, 石塚成人, 蔵増嘉伸, 中村宜文, 滑川裕介, 谷口裕介, 浮田尚哉, 吉江友照 for PACS Collaboration, 「PACS10 配位を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算」, 日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
16. 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛, 「物理点格子 QCD による核子構造の計算」, 日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
17. 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臨界点決定のためのホッピングパラメタ展開の収束性」, 日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
18. 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 谷口裕介, 鈴木博, 梅田貴士, 「SFtX 法による $N_f=2+1$ フレーバー QCD の熱力学量」, 日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
19. 秋山進一郎, 蔵増嘉伸, 山下巧, 「Metal-insulator transition in (2+1)-dimensional Hubbard model with tensor renormalization group」, 日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
20. 富田成夫, 菅沼瑠里, 畑田颯太, 川崎銀河, 椎名陽子, 左高正雄, 松田誠, 今井誠, 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, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン), 2021 年 9 月 20-23 日.
21. 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 18 回年会 (オンライン), 2021 年 8 月 9-12 日
22. 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 UTAC 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 (国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 オンライン), 2021 年 6 月 24-25 日
23. 笹 公和, 落合 悠太, 松村 万寿美, 高橋 努, 松中 哲也, 加速器質量分析法を用いた長半減期放射性ハロゲン 36 Cl と 129 I の

- 高感度検出による降下量変動の比較研究, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学オンライン, 2021 年 9 月 10-13 日
24. 吉田剛, 松村宏, 中村一, 豊田晃弘, 三浦太一, 榎本和義, 笹公和, 森口哲朗, 松村万寿美, 可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 による加速器放射化評価の可能性, 日本放射化学会第 65 回討論会 (2021), オンライン, 2021 年 9 月 22-24 日
 25. 椎根大輔, 坂口綾, 笹公和, 松村万寿美, 高橋努, 末木啓介, 山崎信哉, 核分裂生成核種 ^{135}Cs の測定法確立に向けた取り組みと水圏科学研究への応用, 2021 年度日本地球化学会第 68 回年会, オンラインおよび弘前大学会場ハイブリッド開催, 2021 年 9 月 1-15 日.
 26. 西塚魁人, 坂口綾, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 三浦勉, 浅井志保, 和田彩佳, 高久雄一, 山崎信哉, 末木啓介, 水環境中における有機・無機ヨウ素同位体定量の試み, 2021 年度日本地球化学会第 68 回年会, オンラインおよび弘前大学会場ハイブリッド開催, 2021 年 9 月 1-15 日.
 27. 大石脩人, 村尾吉輝, 新田紀子, 土田秀次, 富田成夫, 笹公和, 平田浩一, 柴田裕実, 平野貴美, 山田圭介, 千葉敦也, 齋藤勇一, 鳴海一雅, 星野靖, 高速 C60 クラスターイオンビーム照射による Si 表面構造の形態変化、QST 高崎サイエンスフェスタ 2021, 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子科学部門 高崎量子応用研究所 (ハイブリット), 2021 年 12 月 7-8 日.
 28. 西塚魁人, 坂口綾, 浅井志保, 本多真紀, 高久雄一, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 和田彩佳, 三浦勉, 山崎信哉, 末木啓介, 水環境中における有機・無機ヨウ素同位体定量の試み, 福島大学環境放射能研究所第 8 回成果報告会 福島原発事故後の環境放射能 - 研究成果から見える将来 -, コラッセふくしま, 福島県福島市, 2022 年 2 月 28 日-3 月 1 日.
 29. 椎根大輔, 坂口綾, 笹公和, 松村万寿美, 高橋努, 山崎信哉, 末木啓介, 海水循環トレーサー利用に向けた極微量放射性核種 ^{135}Cs の測定法確立, 第 2 3 回「環境放射能」研究会 (オンライン), 2022 年 3 月 8-10 日.
 30. 吉田剛, 松村宏, 中村一, 豊田晃弘, 三浦太一, 榎本和義, 笹公和, 森口哲朗, 松村万寿美, 可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 を用いた加速器放射化評価への応用の見込み、第 2 3 回「環境放射能」研究会 (オンライン), 2022 年 3 月 8-10 日.
 31. 笹公和, 高橋 努, 椎根 大輔, 松村 万寿美, 坂口 綾, Rb スパッタイオン源からの負イオンビームの生成, 応用物理学会 2022 年第 69 回春季学術講演会, 青山学院大学・オンライン (ハイブリット開催), 2022 年 3 月 22-26 日.
 32. 富田成夫, 菅沼瑠里, 畑田颯太, 椎名陽子, 高橋努, 石井聰, 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 II, 日本物理学会 第 77 回年次大会 (2022 年), 岡山大学 津島キャンパス・岡山理科大学 岡山キャンパス (オンライン), 2022 年 3 月 15-19 日.
 33. 森口哲朗, 小沢顕, 富田啓介, 大和良広, 林実香, 要直登, 景澤怜央, 向井もも, 矢野朝陽, “回転磁場を用いた ^{25}Al , ^{29}P の核磁気モーメントの符号測定”, 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022 年 3 月 15-19 日) .
 34. 矢野朝陽, 小沢顕, 森口哲朗, 要直登, 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, 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, 佐藤真二, 福田茂一, 北川敦志, “反応断面積測定のための固体重水素標的の開発”, 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022 年 3 月 15-19 日) .
 35. 森口哲朗, 小沢顕, 堀内渉, 阿部康志, 北川敦志, 向井もも, 長江大輔, 佐藤真二, 鈴木伸司, 鈴木健, 山口貴之, “固体水素標的を用いた反応断面積のエネルギー依存性”, 第 1 回日本量子医科学会学術大会, オンライン開催 (2021 年 12 月 10-11 日) .
 36. 要直登, 森口哲朗, 小沢顕, 山口貴之, Sarah Naimi, 向井 もも, 鈴木伸司, “薄膜からの二次電子放出を利用した RI ビーム位置敏感型検出器の開発”, 第 1 回日本量子医科学会学術大会, オンライン開催 (2021 年 12 月 10-11 日) .
 37. 山口貴之, 鈴木健, 福田光順, 西村太樹, 田中聖臣, 長江大輔, 小沢顕, 森口哲朗, 大坪隆, “高エネルギー重イオンビームによる粒子検出器の開発と荷電変化反応の研究”, 第 1 回日本量子医科学会学術大会, オンライン開催 (2021 年 12 月 10-11 日) .
 38. T. Moriguchi, A. Ozawa, Y. Yamato, M. Hayashi, R. Kagesawa, N. Kaname, M. Mukai, K. Tomita, A. Yano, “Status of Lamb-shift polarized ion source at 6 MV tandem accelerator in UTTAC and its application to nuclear physics”, The 24th International Spin Symposium (SPIN2021), Matsue, Shimane Prefecture, Japan (Hybrid), on-line (Oct. 18-22, 2021).
 39. T. Moriguchi, A. Ozawa, K. Tomita, Y. Yamato, M. Hayashi, N. Kaname, M. Mukai, A. Yano, “Measurement of the sign of nuclear moment for unstable nuclei ^{25}Al and ^{29}P by using rotating magnetic field”, 3rd International Conference on Hyperfine Interactions and their Applications (HYPERFINE2021), Brasov, Romania (Hybrid), on-line (Sep. 5-10, 2021).
 40. 森口哲朗, 小沢顕, 富田啓介, 要直登, 矢野朝陽, 林実香, 山口貴之, 鈴木健, 梶木大輔, 濱川大貴, 原山朔弥, 大津美沙紀, Sarah Naimi, George Hudson-Chang, 山口由高, 向井もも, 長江大輔, 鈴木伸司, 西村太樹, 高橋弘幸, 北川敦志, 佐藤真二, 阿部康志, “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 —”, 2020 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会, オンライン開催 (2021 年 6 月 7-10 日) .
 41. T. Todoroki, “Measurements of azimuthal anisotropy v_2 in p+p, p+Au, d+Au, and $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at RHIC PHENIX Experiment”, TCHoU Workshop for the Division of Quark Nuclear Matters, 2021 May
 42. 轟木貴人, “RHIC 及び LHC での小さい衝突系 における方位角異方性の測定”, TCHoU 構成員会議&成果報告会, 2021 June
 43. 新井田貴文, “高速回転するクォーク・グルーオンの流体 - スピン偏極で探る宇宙最速の渦 -”, 東京大学 物理学教室コロキウム, 2021 年 7 月
 44. 轟木貴人, “小さな系のフロー”, QCD 相転移や QGP 生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験共同研究会, 2021 September
 45. 新井田貴文, “フローなどのソフト測定”, QCD 相転移や QGP 生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験共同研究会, 2021 September

46. 江角晋一, “RHIC エネルギー走査による AGS・SPS 領域での再挑戦”, TCHoU クォーク・核物質部門ワークショップ, 2022 年 3 月 24 日 (木) (オンライン)
47. 大久保孝祐, “Global polarization of Lambda hyperons in RHIC Beam Energy Scan II from STAR”, 日本物理学会, 2022 年 3 月 (オンライン)
48. 野中俊宏, “RHIC ビームエネルギー走査実験による QCD 相図探索”, 日本物理学会第 77 回大会 シンポジウム講演, 2022 年 3 月 (オンライン)
49. 中條達也, “南部理論とクォーク・グルーオン・プラズマ”, 物理学セミナー (筑波大学・オンライン), 9/16, 2021
50. 中條達也 (for the ALICE collaboration), “ALICE FoCal プロジェクト - 物理, 現状と計画 -” 日本物理学会 秋の分科会, オンライン, 9/16, 2021
51. 稲葉基 (for the ALICE collaboration), “LHC-ALICE 実験 FoCal 検出器用 p 型シリコンパッドセンサーの特性評価”, 日本物理学会 秋の分科会, オンライン, 9/16, 2021
52. 江下もも (for the ALICE collaboration), “LHC-ALICE 実験 陽子-陽子衝突 $\sqrt{s} = 13$ TeV における重クォーク起源ジェット生成の粒子多重度依存性”, 日本物理学会 秋の分科会, オンライン, 9/16, 2021
53. 千葉俊哉 (for the ALICE collaboration), “LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 陽子-鉛衝突におけるボトムクォーク由来電子生成の粒子多重度依存性” 日本物理学会 秋の分科会, オンライン, 9/16, 2021
54. 稲葉基, “ALICE FoCal project”, Platform B (Silicon) meeting, 1/5-6, 2022, 九州大学 伊都キャンパス, 西新プラザ
55. 中條達也, “ALICE FoCal R&D” AR テストビームライン見学会 (兼研究会), 1/13, 2022, 高エネルギー加速器研究機構
56. Park Hanseo (for the ALICE Collaboration), “LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13$ TeV 陽子-陽子衝突におけるジェット内部中性中間子の測定”, 日本物理学会 年次大会 3/15, 2022 (Online)
57. 中條達也, “LHC 加速器を使った重イオン衝突の物理 - まとめと将来展望 -” TCHoU Workshop for the Division of Quark Nuclear Matters, 3/24, 2022
58. Park Hanseo, “LHC-ALICE 実験における中性中間子の測定” TCHoU Workshop for the Division of Quark Nuclear Matters, 3/24, 2022

[博士論文]

1. 秋山 進一郎, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories」
2. 西谷理佐, 「Measurements of Higher-Order Cumulants of Net-Proton Distributions in 200 GeV $p+p$ Collisions at RHIC-STAR」

[修士論文]

1. 佐藤 航平, 「格子 QCD による形状因子の計算法に関する基礎研究と π 中間子荷電半径の計算」
2. 羅 梟, 「Naive staggered fermion 及び plaquette gauge action を用いた 4 flavor QCD の有限温度相転移に関する研究」
3. Park Hanseo, 「Measurement of neutral mesons inside jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ALICE at the LHC」 (LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13$ TeV 陽子-陽子衝突におけるジェット内部中性中間子の測定)
4. 江下もも, 「LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13$ TeV 陽子-陽子衝突における重クォーク起源ジェット生成の横運動量依存性及び粒子多重度依存性の測定」 (Measurement of transverse momentum and multiplicity dependence of heavy-flavor jets production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with LHC-ALICE)
5. 岡田柊人, 「ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13$ TeV 陽子-陽子衝突における機械学習を用いたクォーク/グルーオンジェットの識別」 (Identification of quark and gluon jets by machine learning in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with LHC-ALICE)
6. 要直登, 「薄膜から放出される二次電子の飛行時間差を用いた RI ビーム位置検出器の開発」 (Development of the RI beam position detector using the time-of-flight difference of secondary electrons emitted from a thin foil)
7. 喜屋武奨之, 「J-PARC E16 実験に向けた飛行時間測定器 MRPC の開発および J-PARC 30 GeV 陽子ビームを用いた性能評価」 (Development of Time-of-Flight detector MRPC for J-PARC E16 experiment and performance evaluation with 30 GeV proton beam in J-PARC)
8. 田辺飛鷹, 「HIMAC H447 実験 400A MeV Xe+CsI 衝突における前方および中心ラピディティでの指向的方位角異方性の測定」 (Measurements of directed flow at forward and central rapidity region in 400A MeV Xe + CsI collisions in HIMAC H447 experiment)
9. 千葉俊哉, 「LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 陽子-鉛衝突および陽子-陽子衝突におけるボトムクォーク由来電子生成の粒子多重度依存性の測定」 (Measurement of multiplicity dependence of electrons from beauty-hadron decay in pp and p -Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with LHC-ALICE)

[競争的資金]

1. 科学研究費 基盤研究 (A)、令和 2 年度採択、蔵増嘉伸 (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」、12,300 千円
2. 科学研究費 基盤研究 (C)、平成 31 年度採択、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」、1,100 千円
3. 科学研究費 基盤研究 (B)、令和 2 年度採択、金谷和至 (分担)、「有限温度 QCD における物理量の決定へ向けて」、100 千円
4. 科学研究費 基盤研究 (B)、平成 31 年度採択、山崎剛 (代表)、「強い相互作用の第一原理計算による軽ハドロン形状因子の総合理解」、3,700 千円

5. 科学研究費 基盤研究 (C)、令和 2 年度採択、浮田尚哉（代表）、「機械学習を取り入れた格子 QCD による超精密物理量測定のための計算手法の開発と実践」、1,200 千円
6. 科学研究費 新学術領域研究 (公募)、令和 3 年度採択、新谷栄悟（代表）、「陽子寿命の理論予想に関わる行列要素の格子 QCD 計算」、900 千円
7. 科学研究費 挑戦的研究 (萌芽)、代表、笹 公和、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、3,800 千円
8. 科学研究費 基盤研究 (S)、分担、笹 公和、過去 1 万年間の太陽活動、1,000 千円
9. 科学研究費 基盤研究 (A)、分担、笹 公和、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、500 千円
10. 科学研究費 基盤研究 (B)、分担、笹 公和、両極アイスコアの高解像度分析による放射性ヨウ素・塩素のフォールアウト変動の解明、350 千円
11. 金沢大学環日本海域環境研究センター共同研究 (一般)、代表、笹 公和、能登半島における 1950 年以降の原子力施設由来放射性ヨウ素 129 の沈着量変動、200 千円
12. 科学研究費 基盤研究 (A)、分担、森口哲朗、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、2000 千円
13. 科学研究費 基盤研究 (C)、代表、森口哲朗、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、100 千円
14. 科学研究費 基盤研究 (S) 2019-2023、代表、江角晋一、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、23,270 千円
15. 伊藤科学振興会研究助成 2017-2022、代表、江角晋一、原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究、代表、1,000 千円
16. 科学研究費 基盤研究 (S) 2020-2024、代表、中條達也、LHC 超前方光子測定によるグルーオン飽和と QGP 生成起源、22,620 千円
17. 科学研究費 基盤研究 (B) 2019-2021、分担、中條達也、LHC 鉛原子核衝突：フォトンで探る極初期状態 (initial stage) (代表 杉立 徹)、15 万円
18. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 2018-2022、分担 中條達也、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)、75 万円
19. 科学研究費 基盤研究 (A) 2021-2024、分担、中條達也、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)、30 万円
20. TYL-FJPPL 日仏事業 (KEK-CNRS) 2019、代表、中條達也、GP Tomography with photons, jets, and heavy flavors、40 万円 (仏側)、COVID19 により繰越

[受賞]

1. 秋山進一郎、筑波大学 学長表彰 2022 年 3 月
2. 西谷理佐、2021 年度物理学専攻・専攻長賞
3. 江下もも、2021 年度物理学専攻・専攻長賞
4. 佐藤航輝、2021 年度物理学類ベストプレゼンテーション賞
5. 中條達也、BEST FACULTY MEMBER 2021、筑波大学、2022 年 2 月

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

部門長

原 和彦（数理物質系物理学域 准教授）：

構成教員

江角 晋一（数理物質系物理学域 准教授）

武内 勇司（数理物質系物理学域 准教授）：

新田 冬夢（数理物質系物理学域 助教）：

廣瀬 茂輝（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（数理物質系理工学域 准教授）

近藤 剛弘（数理物質系物質工学域 准教授）

倉知 郁生（高エネルギー加速器研究機構 特別教授）

中村 浩二（高エネルギー加速器研究機構 助教）

光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、光子計測器の開発に関する情報を共有し、つくば地区の連携研究 TIA の筑波大学拠点として活動している。活動の詳細は部門の HP を参照のこと。TIA (Tsukuba Innovation Arena) は筑波大およびつくばの研究機関における理工学分野が密接に連携し、計測器開発に関する情報共有、計測器開発の融合共同研究、新しい計測器のアイデアの創出、計測器技術の産業・社会への応用の推進などを主な目的としている。具体的な活動としては、KEK・産総研等の研究機関と連携して、つくば光・量子計測共通基盤を形成して、先端基礎科学と最新産業応用のための光子計測器開発を推進している。

現在 TIA-ACCELERATE（光子産業応用イニシアチブ）の光子センシングスクエア（光子計測技術開発）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つを主軸として光子計測器開発を推進している。光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。

TIA 光・量子計測マネジメントグループは、高エネルギー研究所で立ち上げられる”量子場計測システム国際拠点 (International Center for Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe and Particles: 略称 QUP)”に関連し、「QUP が目指す新たな計測技術」の研究会を2022年1月12日に同研究所で開催した。

センターが主催する今年度の構成員会議では、6月は、中村「新型 LGAD 検出器が切り拓く次世代飛跡検出器」と原「宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子炉の透視－を振り返って－」を、11月は、中村「高輝度 LHC での ATLAS 内部飛跡検出器 ITk 用ピクセル検出器の設計と建設」と都立産業技術高専の山田美帆氏による「ILC 用衝突点検出器の設計に向けた SOI ピクセル検出器からの取り組み」の講演を行った。また、光子部門が主催する研究会を2022年3月22日に開催し、原子核から2名（Abderrahmane Ghimouz, 小沢恭一郎）、宇宙観測から2名（丹羽綾子, 滝口風太）、素粒子から4名（北彩友海, 鈴木尚紀, 廣瀬茂輝, 中

村浩二)による研究紹介が行われた。

筑波大学では国連が推進する SDGs (Sustainable Development Goals) の活動に基づき、持続可能な「産業と技術革新の基盤をつくろう」活動の下、関連 WEB ページを作成している。本部門からは「半導体センサーが拓く持続的なイノベーション」をプロジェクト名とし、シリコン半導体を主軸において、加速器実験のために開発する光量子センサー、VLSI の設計教育、医療・健康への貢献などを包括する活動の推進を目指している。今年度は原、中村により時間分解能に優れた高位置分解能素子の本格的な開発に着手し、生命科学への応用も視野に高速光検出器の試作を行った。今まで SOI 開発において VLSI の設計教育を行い、生命科学用の素子を含めた一連の活動は要素として育んでできたが、施設が未整備であるためにこれらを総括的に推進する体制の構築は今後の課題である。

本部門が活動計画のロードマップとして掲げる要点項目は「先端光量子検出器の開発」と「KEK トリスタン AR への電子テストビーム施設整備」である。後者については、その重要性はコミュニティ全体から認知され、KEK 主体でビームラインの建設が開始された。本部門では SOI 技術を用いて同ビームラインに設置する高性能飛跡トラッカーを整備することに貢献していく (SOI の項を参照)

次に、以下に、構成教員・連携教員が推進するプロジェクトごとに活動状況を報告する。ここに記載されていない教員の活動については、該当教員の属する部門での記述も参照されたい。

HL-LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発 (廣瀬, 原, 中村)

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 ものセンサー面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る。よき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開発を、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。

(1) シリコンストリップセンサーの量産

ITk 用シリコンストリップセンサー量産の中で、筑波大では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

を担当している。2021 年 7 月より、本番用シリコンストリップセンサーの量産が始まった。図 76 (左) には、ストリップセンサー品質保証測定および納入枚数の推移を示した。量産開始当初に遅れが見られたが、徐々に遅れを取り戻し、最終的に 2021 年度納入予定であった 1,784 枚の全数の品質保証が完了、納入された。今後、約 3 年にわたり、合計 20,000 枚以上 (日本担当分は 6,000 枚以上) のシリコンストリップセンサーを量産予定である。

品質保証測定はすべて製造元の浜松ホトニクスとの協力のもと、我々が開発したシステムを用いて浜松ホトニクス社内で行われるが、特に我々は形状測定の測定状況をリモートで監視、および問題発生時の対処を行う必要がある。量産開始当初は高い頻度での問題発生があり、その都度筑波大の担当者が復旧手順を踏む必要が

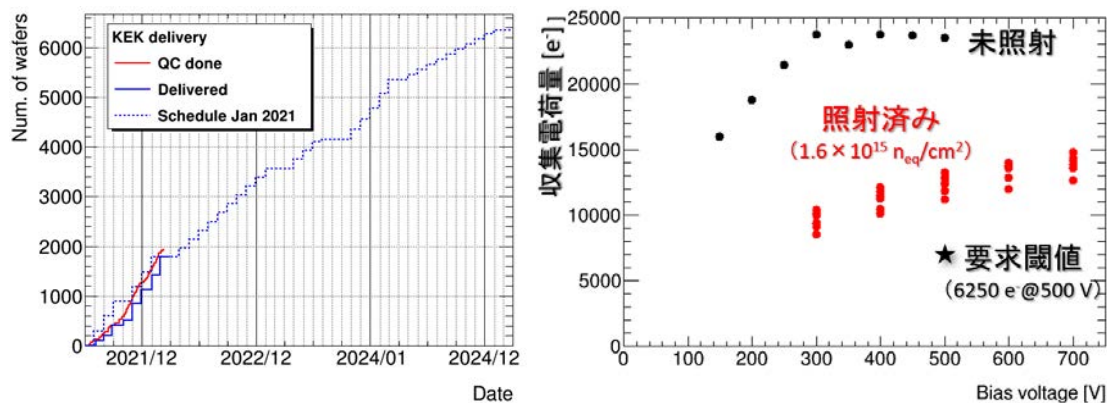


図 76 (左) シリコンストリップセンサー量産中の品質保証測定枚数 (赤実線) および納入枚数 (青実線) の推移 (日本担当分). 青点線は量産開始当初の納入予定曲線を示す. (右) 収集電荷量測定結果のバイアス電圧依存性. 赤点は 6 枚のミニセンサーに対して $1.6 \times 10^{15} \text{ 1-MeV } n/\text{cm}^2$ を照射した後に得られた結果を, 黒点は未照射サンプルで得られた結果を示す. 要求閾値 (500 V 印加時に 6250 e^- 以上) に対して, 十分量の電荷量が得られていることがわかる.

あった. これらの問題に対し, 自動エラー復旧プログラムや, 深刻な問題発生時の自動通知機能を実装するなど, 地道な改良を重ね, 年度後半には効率的な測定を実現した.

放射線耐性試験では, ストリップセンサーと同じウェハー上に形成された試験用構造体 (テストチップ, 8 mm 角ミニダイオードおよび 10 mm 角ミニストリップセンサー) を用いる. 2021 年 12 月に, 本量産では初めての陽子ビーム照射を, 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) にて実施した. 図 76 (右) は, $1.6 \times 10^{15} \text{ 1-MeV } n/\text{cm}^2$ 相当の陽子を照射したミニセンサー 6 枚の収集電荷量を測定した結果を示す. この照射量は, 高輝度 LHC-ATLAS 運転全期間において予想される放射線量の 1.5 倍に相当する. これだけの放射線を受けた後も, 500 V 印加時にすべてのサンプルが約 $12,000 \text{ e}^-$ の収集電荷量を示し, これは要求閾値よりも十分に高い. このほかに, ポリシリコンバイアス抵抗値やストリップ間静電容量など, 合計 8 項目を測定し, いずれも良好な結果を確認した.

(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. 2021 年度は, ピクセルモジュール量産に向けて, 様々な進展があった.

まず, 本番用ピクセルセンサーの事前量産として, 170 枚のセンサーを生産, その特性安定性を検証するとともに, 量産時にピクセルセンサーの基礎特性を迅速に測定できる, プローバーを用いたシステムの開発を進めた. 図 77 には, 電流電圧特性および容量電圧特性の測定結果を示す. 電流電圧特性の測定結果からは, 製造元である浜松ホトニクスでの出荷時測定とおおむね一致する結果を確認できた. 容量電圧特性では, 完全空乏化電圧が 60 V 前後と, 期待通りの結果であることを確認した. これらのピクセルセンサーは, ピクセルモジュールの事前量産に使用される.

また, 実機に用いられる信号処理用 ASIC の試作バージョンである, ITkpix-v1 を 4 枚搭載したシリコンモジュールを, 初めて製作した. より小型な試作ピクセルモジュールによる検証において, -55°C から $+60^\circ\text{C}$ (実際の実験環境で可能性のある最大の温度変化) の温度変化を続けると, ストレスによりピクセルセンサーと ASIC との接続 (バンプボンディング) が徐々にはがれてしまうことがあった. これは, ピクセルモジュール

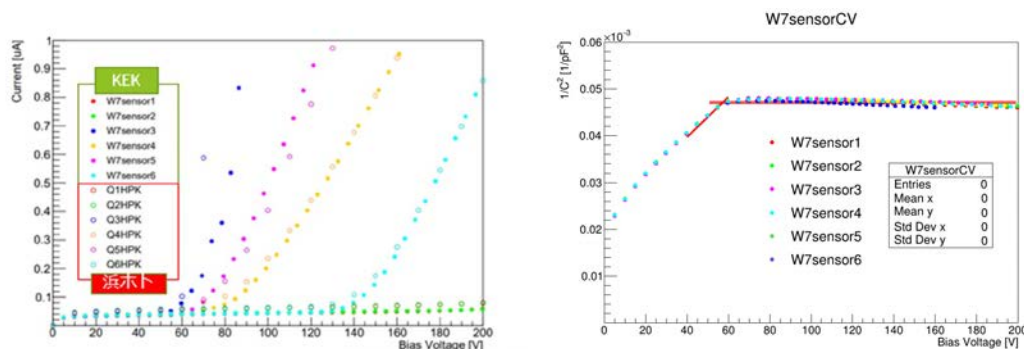


図 77 事前量産ピクセルセンサーの（左）電流電圧特性と（右）容量電圧特性の測定結果．左図の白抜き点で示されたデータは製造元での出荷時測定結果で，比較用に示している．この測定結果には，測定システム検証のために特性が悪いピクセルセンサーを含めており，140 V 以下でブレイクダウンを起こしているピクセルセンサーが該当する．

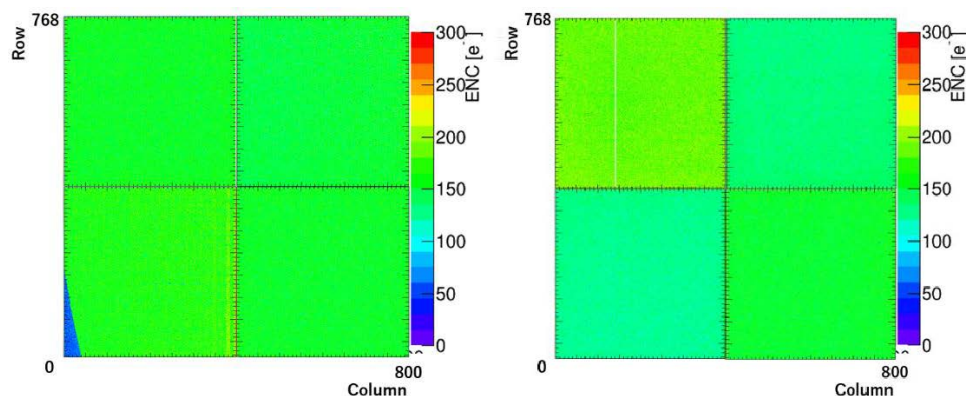


図 78 ITkpix-v1 モジュールに対し，サーマルサイクルを 100 回繰り返した後に得られたノイズマップ．左図がパリレン被覆処理済みモジュール，右図が非パリレンモジュール．左図には，パンプボンディングのはがれ，センサー起因のノイズが見えなくなったためにノイズが低下し青く見えている領域がある．

ル表面をパリレンによってコーティング処理することで抑制できることも示唆されていたが，2021 年度には，実機仕様に非常に近い ITkpix-v1 モジュールについて，パリレンコーティングを施したもの（パリレン済みモジュール）と施していないもの（非パリレンモジュール）を用意し， -55°C から $+60^{\circ}\text{C}$ のサーマルサイクルを繰り返すことで，そのパンプ強度を検証した．図 78 に示すように，ITkpix-v1 モジュールにおいても，パリレン済みモジュールではパンプボンディングのはがれが起きないことが確認された．2022 年度前半には，20 台以上のパリレン済みモジュールを試作，サーマルサイクル試験を繰り返してその強度の担保を目指す．

これらの ITkpix-v1 モジュールの一部に，東北大学 CYRIC において 6.3×10^{15} 1-MeV n/cm^2 相当の陽子照射を行った．特に 2022 年 3 月の照射試験では，陽子照射中にデータを読み出し，その特性をリアルタイムに測定することに成功した．図 79 はリングオシレータの周波数を示し，照射量に応じて 50 MHz 程度の低下が見られた．これは別施設で行われた照射結果と同等で，リングオシレータ周波数が，ピクセルモジュールが受けた放射線量のモニターとして利用できる可能性を示した．陽子照射後のピクセルモジュールは，漏れ電流が劇的に増加しているため，動作試験時に十分に冷却しなければ破損してしまう可能性がある．照射済みピクセルモジュールの動作試験を安全に実施するため，ペルチェ素子と真空吸着治具を用いた冷却システムを設

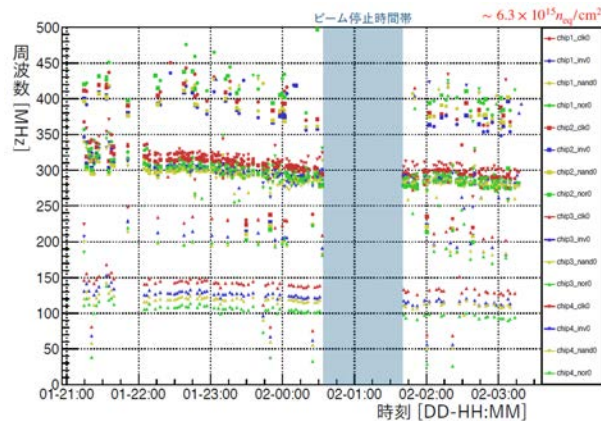


図 79 陽子ビーム照射中のリングオシレータ周波数の時間変化。

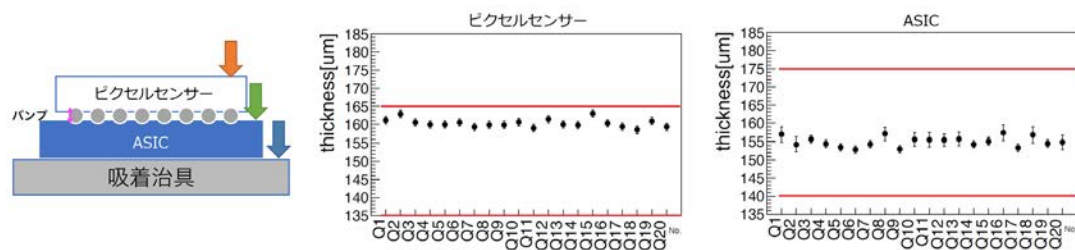


図 80 (左) ベアモジュールの断面図。ベアモジュール縁の、矢印で示された部分にあるセンサーと ASIC の段差を利用することで、センサー部と ASIC 部それぞれの厚みを測定する。(中) センサー部厚さの測定結果。(右) ASIC 部厚さの測定結果。それぞれ、赤線内側が厚みに対する要求値である。

計、製作した。この装置を -45°C に冷却した恒温槽内に設置したうえでピクセルモジュールを冷却することで、モジュール温度を -35°C に安定して保つことに成功した。今後、陽子照射済みモジュールの特性を詳細に調査する。

ピクセルモジュールの量産過程において、各工程が終了する都度形状を精密に測定し、破損や反りなどが発生していないかを確認する必要がある。形状測定には、オートフォーカスによる非接触形状測定装置を用いる。2021 年度には、ベアモジュールと呼ばれる、ピクセルセンサーと ASIC が貼り合わされた状態のモジュールの形状測定手法を確立した。この手法の中では、図 80 (左) のように、ベアモジュールの“縁”段差を利用することで、単にベアモジュール全体の形状を測定するだけでなく、ピクセルセンサー部と ASIC 部それぞれの厚みも測定できるようになった。合計 20 枚のベアモジュールに対して厚み測定を行った結果は図 80 (中) および (右) に示した通りで、すべてが十分に要求値以内であることを確認した。このようなベアモジュールに、電源供給や信号入出力に必要な表面実装部品が搭載されたフレキシブル基板を貼り付けることで、ピクセルモジュールが完成する。この状態のモジュールは、表面に構造物が非常に多く、オートフォーカスの焦点合わせに時間がかかったり、測定に失敗することがある。そのような問題を回避するよう、測定位置や点数を最適化し、測定精度を損なうことなく、1 モジュール当たりの測定時間をこれまでの 43 分から 25 分に大幅に短縮した。2021 年度に確立したベアモジュールおよびピクセルモジュールの形状測定手順を用い、今後の量産においてピクセルモジュールの品質検査を行う予定である。

LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発

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。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 20~30 ps 程度の時間分解能が達成できる。高輝度 LHC (HL-LHC) やさらに高輝度の加速器実験 (FCC 等) では、膨大な粒子生成の環境下での飛跡再構成が要求されるので、半導体検出器の優れた位置分解能に加え時間情報を加えることができれば、飛跡再構成の精度や時間短縮に重要な役割を果たすことが期待できる。可視光も検出できるようにする等で、生命科学への応用も視野にある。

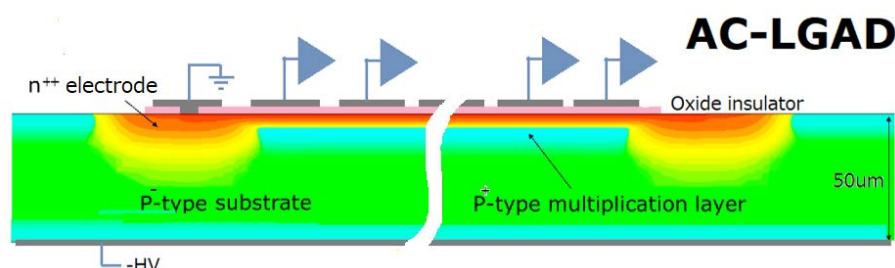


図 81 AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

LGAD 検出器としては 1.3 mm 角のパッドタイプのものが HL-LHC 実験用に ATLAS に採用されている。飛跡検出器とするためには電極の一層の細分化が必要である。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 年度から開始した。図 81 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。2021 年度までに、 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 2 回の試作を実施し、 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 の陽子線および QST 高崎研究所の ^{60}Co 照射を通じて評価した。

電極細分化は 80 μm ピッチに分割したストリップ型検出器で評価した。 n^{++} 濃度を低めにする事で、通過する β 線に対して十分な信号ノイズ比を達成し、細分化した AC-LGAD が機能することを実証した。図 82 左には、東北大 ELPH 800 MeV/c 陽電子ビームを用いたストリップのヒット数分布をビームの位置を横軸に取って示している。色の違いは隣接するチャンネルであり、ビーム位置に従いヒットするチャンネルが変化している。ビーム位置の不定性を考慮すると 80 μm ピッチの AC-LGAD の位置分解能（バイナリ読出しの場合）は $20.3 \pm 3.2 \mu\text{m}$ となり、 $\text{pitch}/\sqrt{12}$ からの予想値と矛盾しない結果となった。位置分解能は荷電重心法をとることでさらに向上する。

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。CYRIC で $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までの陽子線照射をした。図 82 右には、未照射、 $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ および $5 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 照射後での信号波高のバイアス電圧依存性を示す。陽子線照射によりアバランシェ増幅を開始する電圧が増加するが、照射後も増幅機構が保たれている。この測定により、陽子照射量に比例して増幅開始電圧が増加し、これは陽子によるアクセプター除去効果のために p^+ ドープ密度が実効的に減少しているためと理解できる。この結果から、FCC などの将来の加速器では、衝突点から離れた位置であれば現設計が使用できるが、より内層に用いるために、

耐圧設計を向上させる,あるいはアクセプター除去を抑制するなどの工夫が必要となる。

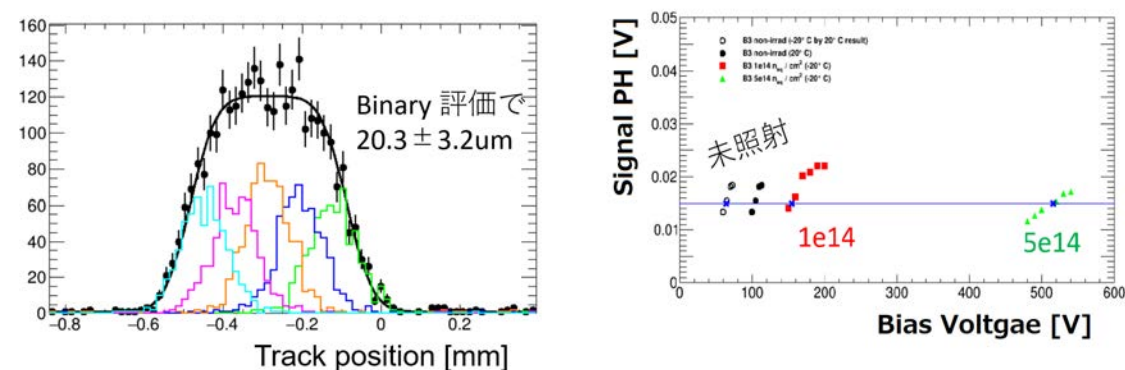


図 82 (左) ELPH の電子ビームを陽用いた 80 μm ピッチのストリップ型 AC-LGAD のヒット数分布. 色ヒストグラムは隣接するストリップ毎のヒット分布で黒は合計, (右) 信号波高の MPV 値のバイアス電圧依存性. 未照射 (-20°C および 20°C での測定) と陽子による 1×10^{14} および $5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ の陽子線照射後 (-20°C) での値.

本研究は日米技術協力の枠組み (代表 中村浩二連携教員) で, 米国のフェルミ研究所, LBL 研究所, UCSC 大学との連携で開発研究を推進して, センサーの基本部分の開発研究が大きく進み, 今後はピクセルセンサー設計の実用化検討に加えて, 読出しのエレクトロニクスを海外の研究機関と協力して開発していく。

SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発 (原, 倉知)

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

筑波大学グループは開発当初より放射線損傷の研究を主導してきた. 2019 年度から開始した PDD をもつセンサーの放射線耐性評価を完了し, 結果は IEEE 国際会議で報告した. また, 国際リニア衝突器 ILC (International Linear Collider) 実験用にマイクロ金バンプを用いた 3 次元積層 SOFIST センサーを開発してきたが, 2021 年度は積分型 INTPIX4 を用いて GeV 電子ビームで高位置分解能実現可能なトラッカーを開発し, SOFIST の低消費電力化にむけた新センサーのビーム試験の準備を行った。

(1) PDD 構造をもつセンサーの放射線損傷の基礎研究 (原, 倉知)

Pinned-depleted diode (PDD) は固定電位層を配置することで, 検出器容量を増やすことなく読出しピクセルに流入する暗電流を抑制し, ピクセル全領域にわたり電荷収集効率を向上させ, 同時に SOI 回路に対して裏面に加えるバイアス電圧からの影響 (バックバイアス効果) を抑える機能がある. 固定電位層の電圧を調整することで放射線損傷による性能劣化を補償できる可能性もある. ^{60}Co γ 線照射や陽子照射を実施し, 暗電流増加の原因を探った. 暗電流はバルク部損傷, Si-酸化膜界面のトラップ電荷, 酸化膜中のトラップ電荷により増加するが, これらの寄与を分離評価する手法を確立した. 2 種類のトラップ電荷を個別に評価するために, 埋め込み酸化膜 (BOX) をゲート酸化膜とする FET とピクセルセンサーを同一素子に作製し, 同時に照射した. 図 83 に示すように, 閾値下のスイング値 (sub-threshold swing) S の改善とともに照射した PDD ピクセル暗電流は減少する. 図より, S は界面トラップ電荷により劣化するが 300°C までのアニーリングでい

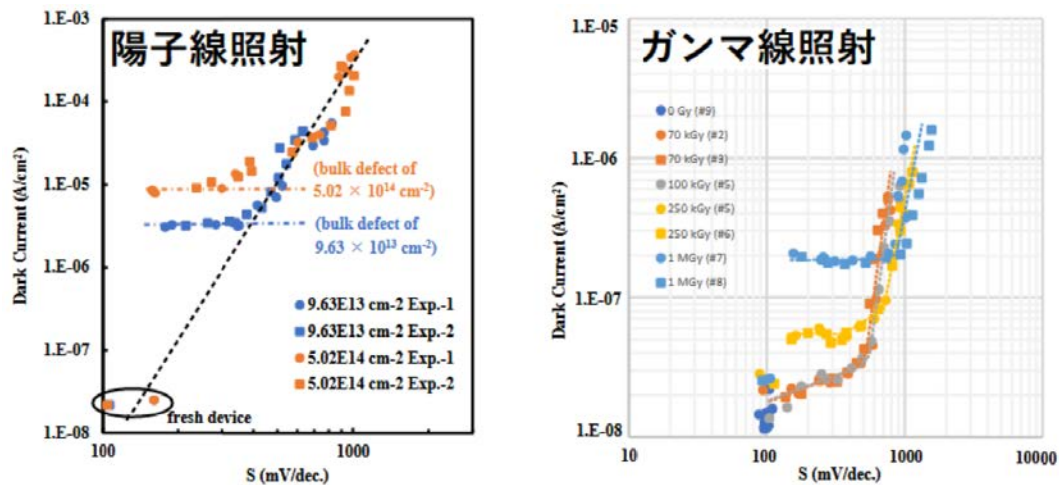


図 83 PDD 構造をもつピクセルの暗電流と BOX を用いた FET の S 値の関係. 等時間アニーリング処理により照射直後（暗電流および S が最大）から徐々に未照射の S 値に漸近する. (左) 陽子照射（1 および $5 \times 10^{14} n/cm^2$ 照射量）では S が回復しても暗電流が残り (右) γ 線照射では 100 kGy を越えたと同様に暗電流が残るが, 100 kGy 以下では回復することが定量的に評価できた.

れも未照射の値まで回復する. 一方, 100 kGy 以下のガンマ線照射量では S の改善とともに照射による暗電流も消滅するが, これを超えるガンマ線照射および陽子線照射では界面トラップ以外の影響が残り, 特に陽子線照射ではバルク損傷の影響が顕著である.

(2) KEK AR-TB に用いる高位置精度トラッカー開発

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 AR-PF 蓄積リングに最大 5 GeV の電子ビームを用いたビームラインを整備中で, これは世界的にはドイツ DESY 研究所のラインに匹敵する電子テストビームラインとなる. このエネルギー領域の電子はクーロン多重散乱の影響を受けやすく, SOI ピクセルを用いることで同ビームラインの性能を最大限発揮できるトラッカーが実現できる. INTPIX4NA は $17 \mu m$ のピクセルサイズをもつ厚さ $300 \mu m$ 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, 東北大の ELPH の 200~820 MeV/c の陽電子ビームを用いてトラッカー性能を評価した. 図 84 はビームラインに設置した様子である.

優れた位置分解能はピクセルサイズの微小さ, 良い信号ノイズ比 (SN 比) および収集電荷が複数のピクセルに広がることで達成できる. 図 85 左はヒット位置を再構成する際に用いるピクセルクラスター内に含まれるピクセル数 (クラスターサイズ) をセンサーバイアス電圧の関数として示した. 全空乏化 (約 30 V) 未満では, 空乏化厚が増加するに従いクラスターサイズは増加し, 越えると電場が強くなるために最近接ピクセルへの電荷収集率が上がりクラスターサイズは減少に転じる. SN が 20 V のバイアスで 190~240 と極めて高いために位置分解能は 5 V~100 V の範囲で顕著な依存性を示さなかった. ただし 2 V では電荷収集量が小さくなるために劣化した.

5 枚のセンサーの 1 枚を位置測定用の検出器 (DUT), 他を飛跡再構成トラッカーとして幾つかの組合せでトラッカーと DUT ヒット位置の残差を測定したところ, DUT を挟む 2 枚-1 枚の組合せによる飛跡が最小の残差を示した. この方式による残差をビーム運動量の逆数の関数にして図 85 右に示す. 図には ELPH での測

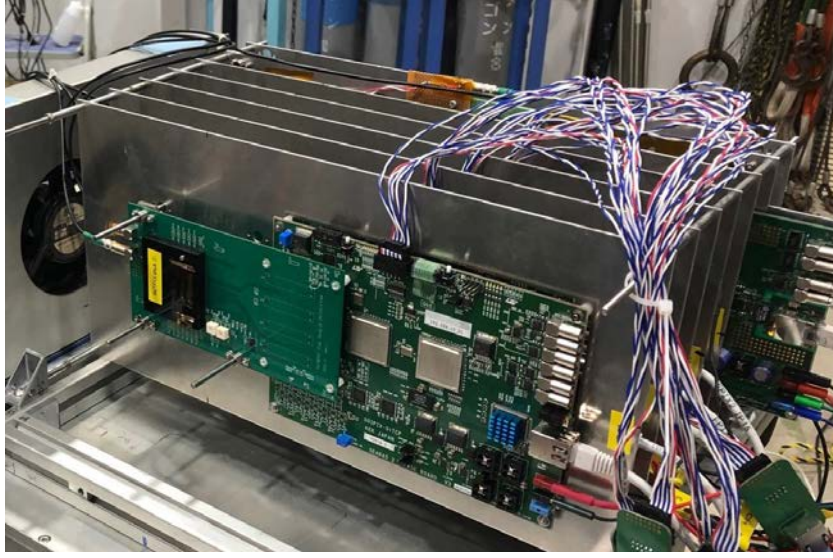


図 84 東北大 ELPH ビームラインに設置した SOI トラッカー。センサー（面積 $9 \times 14 \text{ mm}^2$ ）を搭載したボードとデータ収集ボードをアルミ板（ $20 \times 40 \text{ cm}^2$ ）に固定し、トリガー用 SOI センサーを含めて 6 枚を等間隔で配置している。

定値に加えて以前に 120 GeV 陽子ビームを用いた同様の値 $\sigma_0 = 1.84 \pm 0.18 \text{ } \mu\text{m}$ を加えて

$$\sigma_{\text{res}}(p) = \sqrt{\sigma_0^2 + (k/p)^2} \quad (1)$$

の関数にフィットしたところ、 $k = 9.023 \pm 0.077 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{GeV}/c$ を得た。ELPH では多重散乱による影響が位置分解能に支配的である。KEK AR-TB のエネルギー領域に渡って GEANT4 に基づくシミュレーション計算結果も図に示した。5 GeV 電子に対して、シミュレーションは $2.21 \pm 0.02 \text{ } \mu\text{m}$ を与え、式 (1) からは $2.68 \pm 0.14 \text{ } \mu\text{m}$ が予想される。

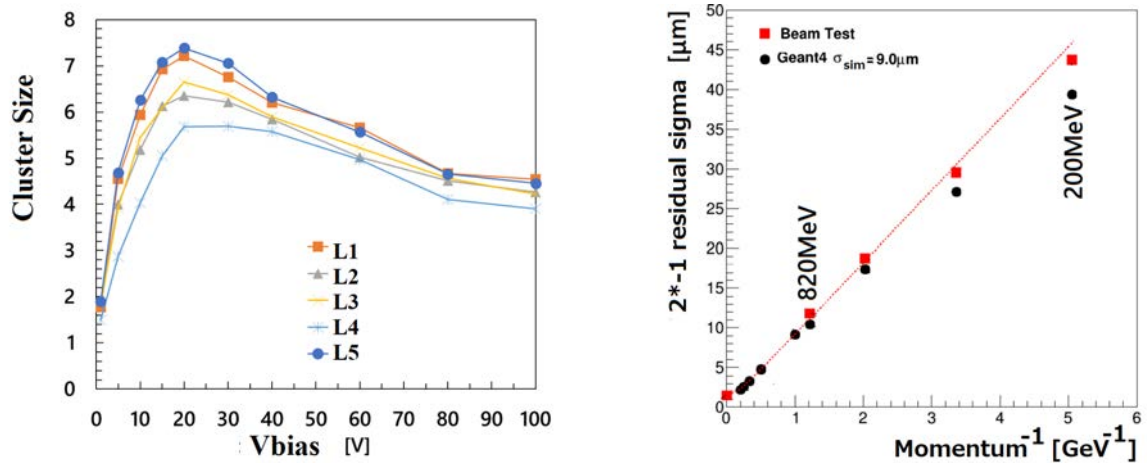


図 85 (左) クラスターサイズのバイアス電圧依存性。5 台のセンサーに対する結果。(右) DUT を挟む 2 枚-1 枚トラッカーで再構成した飛跡と DUT でのヒット位置の残差分布の標準偏差。運動量依存性を分解能を電子のエネルギーの関数として評価した。(右) 現有的システムで計測したデータ収集レート

DUT を挟む 2 枚-1 枚の組合せによる再構成は、DUT の厚さが 300 μm の場合に最適であったが、DUT が厚い場合でも 1 枚-2 枚による再構成位置との平均をとることで性能が余り劣化しないことが判明した。2 mm 厚のアルミ挿入の前後で、820 MeV/c 電子に対する残差 $11.04 \pm 0.10 \mu\text{m}$ は $11.60 \pm 0.19 \mu\text{m}$ と抑えられた。

福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミュオンによる観測(原・金)

ミュオン粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュオン粒子の飛来数分布を大規模構造物の背後で測定することで、構造物内部の様子を透視することが可能である（ミュオンラジオグラフィー法）。福島第一原子炉事故で溶け落ちた燃料デブリの位置を測定することを最終目標にして、2011 年夏から KEK のグループと共同で検出器の技術設計を開始し TIA の枠組みで研究を継続してきた。2017 年度までに国際廃炉機構および東京電力の事業の下に 1~3 号機のすべての測定を完了した。

2021 年には 2 号炉の観測結果（溶け落ちて燃料装荷位置にはほとんど残っていないが压力容器の下部に堆積している）および 3 号炉の観測結果（溶け落ちて燃料装荷位置にはほとんど残っていない）が PTEP から出版された。

COBAND 実験 遠赤外域光検出器の開発(金、武内)

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

当グループでは、光子計測器開発部門の光検出器開発プロジェクトの一つとして、観測ロケット実験で使用予定のニオブ（超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 1.55 \text{ meV}$, $T_c = 9.23 \text{ K}$ ）を超伝導体、アルミニウム（ $\Delta = 0.172 \text{ meV}$, $T_c = 1.20 \text{ K}$ ）を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ (Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた超伝導ギャップエネルギーが更に小さいハフニウム（ $\Delta = 20 \mu\text{eV}$, $T_c = 0.165 \text{ K}$ ）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 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

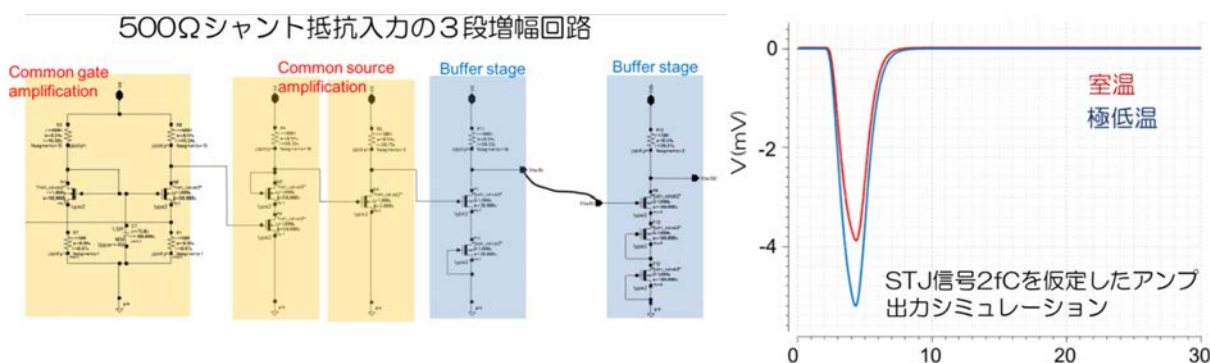


図 86 STJ 信号の読み出しに用いる前置増幅器として設計した回路 (左図)。SOI-MOSFET の極低温での特性変動を考慮した回路シミュレーションにおいて極低温動作をシミュレートした (右図)。

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) 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 からの信号の特定数は数 μ 秒と比較的速く、対して STJ 自身の静電容量は、数 10 pF $\sim$ 数 n F 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 $\sim$ 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を依頼した。設計した回路は、(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 段増幅の電流電圧変換増幅器、(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し 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 2 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) の電流電圧変換増幅器の回路、及び回路シミュレーション結果を図 86 に示す。このシミュレーションにおいて、入力信号として 2 fC (1 eV 相当のエネルギーに対する応答)、増幅器入力側の寄生容量 1 nF を仮定した。また出力側には、 1 M Ω の抵抗と 0.5 nF の出力負荷を仮定している。極低温下において、これまでの知見から MOSFET の閾値が 0.2 V 上昇、飽和電流が 1.5 倍、ポリシリコン抵抗が 8% 上昇するというモデルを導入したシミュレーションを行い、極低温下でも動作するという結果を得た。

また、Hf-STJ の開発においては、韓国 IBS のグループとの共同研究によって X 線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、素子の電流-電圧特性の温度依存性のデータも含めて、論文執筆のための解析を進めている。

COBAND 実験全体の詳細は素粒子構造部門の章に記述されている。

高エネルギー X 線 2 次元検出器を用いた高度物質構造科学研究 (西堀)

SPring-8 における長期利用課題として、単結晶 X 線回折ビームライン BL02B1 において、筑波大学教育研究ユニット招致の Bo Iversen 教授を代表として、2018 年より同研究を推進している。CdTe 半導体を用いた PILATUS 検出器 (1M) を立ち上げ 2019 年 4 月より実験を開始し、COVID-19 により半年延長されて 2022 年 10 月まで実験を継続する。昨年度の成果として、InTe 熱電変換材料の Bragg 散乱の MEM 電子密度解析と散漫散乱の 3 次元差分二体分布関数解析の組み合わせにより InTe 内の 10% の原子が c 軸に沿った Disorder 構造を示すことを発見した。微弱な散漫散乱が観測可能になったのは新しい CdTe 検出器の成果であり、成果は Nature Communications に発表するとともに、筑波大、オーストラリアでプレスリリースを行った。

HSTS の開発およびホウ素二次元物質の研究 (近藤)

(1) ヘテロダインデュアルコム走査トンネル HSTS の開発

デュアルコムを用いた新しい原子分解能の精密分光手法 (ヘテロダインデュアルコム走査トンネル分光法)

を確立し画像を取得済みで、現在論文を仕上げ終え投稿を行う直前の段階にある。

(2) ホウ素二次元物質の研究

ホウ素二次元物質の研究として、ホウ化水素が水に対して化学的に安定であることにに関して負電荷のホウ素ネットワークが強固の要因であること、ホウ素と硫黄の新しい二次元物質を世界初生成、5-7 員環のホウ化水素を世界初生成等に関する論文を発表し、また、ホウ化水素 (HB) シートの基礎的性質の研究に関して別々のテーマで東証一部上場企業 7 社と別々の共同研究を実施している。

〈論文〉

1. F. Hirofumi, *et al.*, (K. Hara, S. H. Kim), “Investigation of the status of Unit 2 nuclear reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography”, PTEP Vol. 2021 Issue 2 (2021) p.023C01.
2. F. Hirofumi, *et al.*, (K. Hara, S. H. Kim), “Study of the Unit-3 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography”, PTEP Vol. 2022 Issue 1 (2022) p.013C02.
3. I. Kurachi, *et al.* (K. Hara) “Intelligent Three-Dimensional Chip-Stacking Process for Pixel Detectors for High Energy Physics Experiments”, JPS Conference Proceedings **34** p.010010 (2020).
4. K. Nakamura, *et al.* (S. Kita, T. Ueda, K. Hara, H. Suzuki) “First Prototype of Finely Segmented HPK AC-LGAD Detectors”, JPS Conference Proceedings **34** p.010016 (2020).
5. 池上陽一, 伊藤正俊, 中村浩二, 原 和彦; 外川学, “CYRIC 陽子ビームを用いた ATLAS シリコン検出器の放射線耐性評価”, 加速器 **18(3)** pp.169-176 (2021).
6. Y. Takeuchi, S.H. Kim, T. Iida, C. Asano, R. Wakasa, G. Maekawa, S. Nakahara, R. Yamane, T. Yoshida *et al.* (COBAND collaboration), “Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND project” (Extended abstract), The 2021 International Symposium on VLSI Technology Systems and Applications (VLSI-TSA) Proceedings of Technical Papers, 115-116 (2021), DOI: 10.1109/VLSI-TSA51926.2021.9440090

〈研究成果発表〉

成果発表の一部は、重複を避けるために関連各部門の研究成果に示してあります。

[国際会議]

1. Sayuka Kita (K. Hara), “A study of AC-LGAD structure for finer pitch readout electrodes”, US-Japan Hawaii Conference, @online, 21-23 April 2021.
2. Sayuka Kita (K. Hara), “Development of finely segmented AC-LGAD sensors by HPK for precise timing trackers”, IEEE NSS/MIC Conf. @Online, 16-23 Oct 2021.
3. Hisanori Suzuki (K. Hara), “Contribution of interface state and bulk damages to the dark current increase in SOI pixel sensor with pinned depleted diode structure”, IEEE NSS/MIC Conf. @Online, 16-23 Oct 2021.
4. Y. Takeuchi *et al.*, (Invited talk) “Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND project”, The 2021 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA), April 19-22, 2021, the Ambassador Hotel Hsinchu, Taiwan (video presentation).

[国内学会]

1. 中村浩二：新型 LGAD 検出器が切り拓く次世代飛跡検出器，宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日)，オンライン (招待講演)
2. 原和彦：宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子炉の透視」を振り返って，宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日)，オンライン
3. 鈴木尚成 (原和彦)：SOI ピクセル検出器を用いた AR-TB 用望遠鏡システム，AR テストビームライン研究会 (2022 年 1 月 13 日)，KEK.
4. 熊倉泰成：HL-LHC ATLAS 内部飛跡検出器アップグレードに向けたシリコンピクセル検出器のノイズ評価，日本物理学会 2021 年度秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン (一般講演)
5. 斉藤功太：HL-LHC ATLAS で用いるピクセル検出器の量産に向けたバンプ接合の熱耐性評価，日本物理学会 2021 年度秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン (一般講演)
6. 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における性能評価，日本物理学会 2021 年度秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン (一般講演)
7. 植田樹：新型 LGAD 飛跡検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性に関する研究，日本物理学会 2021 年度秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン (一般講演)
8. 北彩友海：テストビームを用いた新型 LGAD 飛跡検出器 (AC-LGAD) の開発研究，

- 日本物理学会 2021 年度秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン (一般講演)
9. 鈴木尚紀: SOI ピクセル検出器による KEK テストビームライン AR-TB 用テレスコープシステム構築,
日本物理学会 2021 年度秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン (一般講演)
 10. 鈴木尚紀: 陽子線・ガンマ線照射による PDD 構造 SOI ピクセルセンサの放射線耐性評価,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 11. 大森匠: KEK テストビームライン AR-TB 用テレスコープシステムに用いる SOI ピクセル検出器の性能評価,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 12. 倉持花梨: HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けた形状測定の精度検証と測定の効率化,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 13. 比江森友太: HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの 70 MeV 陽子線照射環境下での放射線耐性評価,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 14. 植田樹: 新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性の不純物濃度依存性の研究,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 15. 北彩友海: 新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の光検出器への応用に関する研究,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 16. 五屋郁美: 新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の光検出器への応用に関する研究,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 17. 齊藤功太: HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けたモジュールのノイズ及びバンプ接合の熱耐性評価,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 18. 村田仁慈: 高輝度 LHC ATLAS 実験での ITk Pixel 検出器の量産にむけた品質検査のための読み出し拡張ボードの開発報告,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 19. 飯坂俊介: 高輝度 LHC ATLAS 実験用ピクセルセンサー量産に向けた品質保証システムの構築,
日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン (一般講演)
 20. 武内勇司: COBAND 実験のための STJ 遠赤外単一光子検出器開発現状,
宇宙史研究センター 2021 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 11 月 26 日), オンライン
 21. 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用極低温増幅器の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2022(2021 年 1 月 27 日), オンライン
 22. 守屋佑希久: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XIII,
日本物理学会第 77 回 年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日), オンライン
 23. 守屋佑希久: COBAND 実験のための極低温増幅器の研究開発,
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン
 24. 大森匠 (原): SOI ピクセル検出器テレスコープシステムを用いた GeV 電子ビームのトラッキング,
ELPH シンポジウム 2022 (2022 年 3 月 11 日), オンライン.
 25. 北彩友海 (原, 中村): Recent development of finely segmented AC-LGAD sensors,
TCHoU workshop, Photon & Particle Detectors Division (2022 年 3 月 22 日), オンライン.
 26. 鈴木尚紀 (原): Precision beam tracker for the KEK AR-TB based on SOI sensor technology ,
TCHoU workshop, Photon & Particle Detectors Division (2022 年 3 月 22 日), オンライン.
 27. 廣瀬茂輝: Production of microstrip silicon sensors for the HL-LHC ATLAS ITk ,
TCHoU workshop, Photon & Particle Detectors Division (2022 年 3 月 22 日), オンライン.
 28. 中村浩二: Preparation of pixel module production for the HL-LHC ATLAS ITk ,
TCHoU workshop, Photon & Particle Detectors Division (2022 年 3 月 22 日), オンライン.

〈競争的資金〉

1. 科学研究費 基盤研究 (B) 「高時間分解能を併せもつ高位置分解能 4 次元半導体検出器の実現」, 2019 - 2022 年度, 研究代表者: 原和彦, 5,200 千円 (直接経費 4,000 千円, 間接経費 1,200 千円) (2021 年度)
2. 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 - 2024 年度, 研究代表者: 中村浩二, 7,020 千円 (2021 年度)
3. 科学研究費 基盤研究 (B) 「超伝導素子による極低閾値検出器開発と sub-GeV 領域暗黒物質探索への展開」 2020-2022 年度, 研究代表者: 武内勇司, 6,240 千円 (直接経費: 4,800 千円, 間接経費: 1,440 千円)(2021 年度)
4. 科学研究費 新学術領域研究 「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い. 新たな応用への架け橋」(高橋忠孝 領域代表) 公募研究 「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, 5,460 千円 (2021 年度)
5. 日米科学技術協力事業 (高エネルギー物理分野) 「高エネルギー加速器実験用の高時間分解能をもつ半導体検出器の開発」 2021-2023, 研究代表者: 中村浩二/Artur Apresyan, 6000 千円 (2021 年度)
6. 日仏素粒子物理学研究所事業 「New Challenge for Internal Pixel Tracker construction」, 2019-2024 年度, 研究代表者: 中村浩二, 250 千円 (2021 年度)

〈受賞〉

1. 原和彦，科学技術賞（科学技術振興部門）文部科学大臣表彰
2. 北彩友海，2021 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
3. 鈴木 尚成，2021 年度筑波大学数理物質科学研究科研究科長賞

〈学位論文〉

(修士論文)

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻，2022 年 2 月

1. 植田 樹：次世代高輝度加速器実験のための高時間分解能を持つ新型半導体検出器 AC-LGAD の放射線耐性の研究，2021 年度修士論文 (2022 年 2 月)
2. 斉藤 功太：HL-LHC ATLAS 実験に向けたストリップセンサー品質保証システムの構築及びクアッド型ピクセルモジュールの性能評価，2021 年度修士論文 (2022 年 2 月)
3. 鈴木 尚成：大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX を用いた KEK テストビームライン用高精度トラッキングシステムの構築，2021 年度修士論文 (2022 年 2 月)
4. 村田 仁慈：高輝度 LHC ATLAS 内部飛跡検出器用ピクセル検出器の量産に向けた多数モジュール同時読出しシステムの開発，2021 年度修士論文 (2022 年 2 月)

第 III 部

資料

13 センター細則

○国立大学法人筑波大学宇宙史研究センター細則

〔平成29年10月13日〕
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87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 87 宇宙史研究センター（朝永センター）のロゴとロゴタイプ

15 競争的資金獲得状況

職名	構成員名	(分担の場合) 研究代表者名	区分	種目	研究題目・寄附の目的等	金額(分担金)
教授	久野成夫		その他	国立極地研究所研究集会	南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討	¥189,000
助教	橋本拓也		科研費補助金・学術研究助成金	研究活動スタート支援	成層圏赤外線天文台で暴く近傍銀河の電離光子放射メカニズム	¥1,430,000
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	¥3,000,000
教授	受川史彦	花垣 和則	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究計画研究	ヒッグス粒子で探る真空と世代構造	¥200,000
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	¥1,170,000
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	¥520,000
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		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	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	¥1,430,000
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キン厚測定	¥130,000
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	¥4,940,000
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	¥22,620,000
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	¥23,270,000
教授	江角晋一		奨学寄附金	伊藤科学振興会/物理学分野研究助成金	原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク物質の研究	¥1,000,000
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	¥12,300,000
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	¥1,100,000
准教授	山崎剛		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	強い相互作用の第一原理計算による軽ハドロン形状因子の総合理解	¥3,700,000
講師	中條達也		共同研究	TYL-FJPPL 日仏事業(KEK-CNRS)	Tomography with photons, jets, and heavy flavors	¥400,000
准教授	原和彦		科研費補助金・学術研究助成金	2019年度 基盤研究(B)	高時間分解能を併せもつ高位置分解能4次元半導体検出器の実現	¥5,200,000
准教授	原和彦	中村浩二	その他	日米科学協力	高エネルギー加速器実験用の高時間分解能をもつ半導体検出器の開発	¥5,000,000
准教授	原和彦	倉知郁夫	その他	TIAかけはし	究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して	¥100,000

16 共同研究・受託研究

職名	構成員名	(海外の場合は国名を括弧で付記) 相手先機関	金額	期間	内容	追記事項
講師	中條達也	CERN欧州原子核研究機構(スイス)		2007-	LHC-ALICE実験、フロー・HF・ジェット研究	
教授	江角晋一	BNLブルックヘブン国立研究所(スイス)		2016-	RHIC-STAR実験、臨界点探索・QCD相構造研究	
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

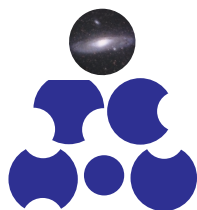
職名	構成員名	(共同の場合) 共同受賞者名	賞名	受賞課題・受賞論文名	受賞年・月・日	団体名	追記事項
准教授	原 和彦		令和3年度文部科学大臣 表彰科学技術賞	素粒子実験半導体センサーの発展と その社会貢献	2021.4.6	文部科学省	
助教	橋本拓也		令和3年度文部科学大臣 表彰若手科学者賞	電離酸素の輝線を用いた様々な最遠 方銀河の観測的研究	2021.4.6	文部科学省	
准教授	原 和彦		学長表彰	素粒子実験半導体センサーの発展と その社会貢献	2021.6.9	筑波大学	
助教	橋本拓也		学長表彰 筑波大学若手教員特別 奨励賞	電離酸素の輝線を用いた様々な最遠 方銀河の観測的研究	2021.6.9	筑波大学	
その他	渡辺展正		KEK理論センター研究会 「熱場の量子論とその応 用」ポスター賞	基本スカラー場を含む行列模型にお ける部分閉じ込め	2021.9	KEK理論センター研 究会「熱場の量子論と その応用」世話人	大学院生(D3)
講師	中條達也		BEST FACULTY MEMBER		2022.2.7	筑波大学	
助教	橋本拓也	井上昭雄 他19名	2021年度日本天文学会 欧文研究報告論文賞	Big Three Dragons: Az = 7.15 Lyman- break galaxy detected in [OIII] 88 μm, [CII] 158 μm, and dust continuum with ALMA	2022.3.4	日本天文学会	
その他	渡辺展正		筑波大学大学院数理工 学質科学研究科 研究科長 賞(2021年度博士論文)	Two-Phase Coexistence of Colors at Large N	2022.3	筑波大学大学院数理工 学質科学研究科	大学院生(D3)
その他	秋山進一郎		学長表彰		2022.3	筑波大学	
その他	菅野 聡		令和3年度物理学学位 プログラムリーダー賞	行列模型と非可換幾何学	2022.3	筑波大学大学院数理工 学質科学研究群物理学 学位プログラム	大学院生(M2)

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	橋本拓也		NHK BS	NHK BS コズミックフロント「すばるとアルマから 親愛なる宇宙へ」に出演し、アルマによる最遠方銀河の観測成果を解説した。	2021.5.27
教授	受川 史彦		ニュートン	研究力でみる大学ランキング(物理学分野 第6位 筑波大学) 所属する研究者として受川の名前と研究を引用	2021年5月号

19 学会活動・各種委員等

職名	構成員名	役職名など	組織名	任期
教授	久野成夫	年会開催地理事	日本天文学会	2019.6－2021.6
教授	久野成夫	研究奨励賞選考委員会委員	日本天文学会	2017.6－2021.6
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編集委員	日本物理学会・理論物理学刊行会	2014.4－
准教授	原和彦	International Advisory Committee	Vertex2020	2012－
准教授	原和彦	MG委員	TIA光量子計測	2018－



筑波大学 数理物質系
宇宙史研究センター

Tomonaga Center for the History of the Universe
(TCHoU)

〒305-8571

茨城県つくば市天王台 1-1-1

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

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

phone: 029-853-3724

fax: 029-853-6305